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

HENRIQUE ROSSI ALTERO

**Representação da estrutura de escoamento bifásico água/ar em unidade de
flotação com emprego de CFD**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2016

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

HENRIQUE ROSSI ALTERO

**Representação da estrutura de escoamento bifásico água/ar em unidade de
flotação com emprego de CFD**

**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

2016

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.

A466r Altero, Henrique Rossi
Representação da estrutura de escoamento bifásico
água/ar em unidade de flotação com emprego de CFD /
Henrique Rossi Altero; orientador Marco Antonio Penalva
Realiz. São Carlos, 2016.

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, 2016.

1. Flotação. 2. FAD. 3. CFD. 4. ADV. 5. DTR. 6.
tratamento de água. 7. Fluent. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **HENRIQUE ROSSI ALTERO**.

Título da dissertação: "Caracterização da estrutura de escoamento bifásico água/ar em unidade de flotação com emprego de CFD".

Data da defesa: 18/04/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

Aprovado

Prof. Dr. **Rodrigo Braga Moruzzi**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Rio Claro)

Aprovado

Prof. Dr. **Erich Kellner**
(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. Associado **Paulo César Lima Segantine**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Dr. Marco Antonio Penalva Reali, pela oportunidade de realizar esse trabalho, pela confiança em mim depositada e pelos numerosos ensinamentos, meu sincero Muito Obrigado!

Ao Professor Dr. Paulo Seleglim, pelos conselhos durante a qualificação e pela gentileza em ceder o cluster para a realização das simulações.

Ao Professor Dr. Woodrow Nelson Lopes Roma pela ajuda com a Sonda Micro ADV e por ceder esse equipamento para a realização das análises deste trabalho.

À Professora Dra. Lyda Patricia Sabogal Paz por gentilmente ceder a sonda de condutividade para a realização dos ensaios com traçador.

Ao Professor Dr. Luiz Antonio Daniel pelos comentários e sugestões durante a qualificação desse trabalho.

Aos Professores Dr. Rodrigo Moruzzi e Dr. Erich Kellner pela participação na banca e preciosas recomendações quanto ao trabalho.

Aos amigos de pós graduação Paulo, Amanara e Jonas, por compartilhar o uso dos equipamentos e por me ajudarem incontáveis vezes.

Aos técnicos Maria Teresa e Alcino de Paula, pela ajuda e suporte na realização do trabalho, sem vocês seria muito mais difícil.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, pela ajuda e suporte com tudo aquilo que um pesquisador precisa fazer além da pesquisa.

Às instituições de fomento CAPES e CNPQ pela concessão de bolsa no início deste trabalho.

À minha companheira Stephanie, pelo apoio e companhia nessa jornada, obrigado por me incentivar e me ouvir.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, pelo apoio e suporte, sem vocês eu não teria conseguido.

Ao Criador, minha eterna gratidão.

RESUMO

ALTERO, H. R. Representação da estrutura de escoamento bifásico água/ar em unidade de flotação com emprego de CFD. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 110p., 2016.

O processo de flotação por ar dissolvido antecedendo a filtração, constitui hoje técnica já consolidada para clarificação de água para abastecimento. Apesar de apresentar elevada eficiência de remoção de partículas em suspensão e das diversas vantagens associadas a sua utilização, ainda existem particularidades deste processo pouco conhecidas. Visando compreender melhor a flotação por ar dissolvido e contribuir para a otimização das unidades existentes e também nos projetos de novas unidades, foram utilizadas técnicas de fluidodinâmica computacional para estudar as condições de escoamento entre água e ar observadas numa unidade piloto de flotação. A flotação foi investigada através de simulações em ambiente de CFD, acoplado a experimentos laboratoriais em instalação piloto de flotação por ar dissolvido. Estes últimos compreenderam a execução de ensaios com traçador para obtenção das curvas de distribuição de tempo de residência na unidade em questão e também por testes com sonda do tipo Micro ADV para levantamento do perfil de velocidades de escoamento no interior da unidade piloto. Os resultados das análises experimentais com sonda Micro ADV indicaram a presença de escoamento estratificado na região superior da zona de separação da unidade piloto. As curvas de distribuição do tempo de residência apontaram para escoamento do tipo pistonado. O tempo de detenção observado nos ensaios foi de 19,29 e 18,66 minutos respectivamente para escoamento somente de água e sem recirculação e escoamento entre água e ar. As simulações em CFD confirmaram a presença de escoamento estratificado na zona de separação e também a presença de uma manta de microbolhas de ar na mesma. Os resultados foram sensíveis ao diâmetro de microbolhas testado, com maior concentração de ar na zona de separação quando testados diâmetros de microbolhas menores que 60 μm . As curvas de distribuição de tempo de residência obtidas nas simulações em CFD foram capazes de representar o escoamento entre água e ar. O tempo de detenção hidráulico simulado foi de 14,24 e 18,90 minutos respectivamente para as mesmas condições experimentais testadas. De uma maneira geral, as simulações em CFD foram capazes de reproduzir as condições de escoamento entre ar e água observadas na unidade piloto de flotação, os resultados computacionais são condizentes com aqueles obtidos nos ensaios experimentais.

Palavras-chave: flotação; FAD; CFD; ADV; DTR; tratamento de água; Fluent.

ABSTRACT

ALTERO, H. R. Representation of biphasic water/air flow structure in a flotation unit using CFD. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 110p., 2016.

The dissolved air flotation process preceding filtration, consist in established technique for clarification of water supply. Despite presenting high suspended particle removal efficiency and the various advantages associated with their use, there are still a few particularities of this process slightly unknown. To better understand the dissolved air flotation and contribute to the optimization of the existing units and also in projects of new units, computational fluid dynamics techniques were used to study the flow conditions between water and air observed in a flotation pilot plant. The flotation process was investigated in CFD environment, coupled to laboratory experiments in dissolved air flotation scale pilot plant. The latter comprised running tests with tracer to obtain the residence time distribution curves in the pilot plant, tests with micro ADV probe were also conducted for raising the flow velocity profile within the unit. The results of micro ADV experimental analyzes indicated the presence of stratified flow in the upper region of the separation zone of the pilot plant. The residence time distribution curves pointed to plug flow. The retention time observed in the experiments were 19,29 and 18,66 minutes, respectively for the flow of water only and without recirculation and flow of water and air. The CFD simulations confirmed the presence of stratified flow in the separation zone and also the presence of a microbubble air blanket therein. The results were sensitive to the diameter of microbubbles tested, with bigger air concentration in the separation zone when tested with microbubbles diameters smaller than 60 micrometers. The residence time distribution curves obtained in CFD simulations were able to represent the water and air flow. The simulated hydraulic retention times obtained were 14,24 and 18,90 minutes, respectively, for the same experimental conditions. In general, the CFD simulations were able to reproduce the flow conditions observed between air and water in the flotation pilot plant, the computational results were consistent to those obtained in the experiments.

Keywords: flotation; DAF; CFD; ADV; RTD; water treatment; Fluent.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO.....	34
FIGURA 2 – BOCAIS INJETORES. FONTE: MECA (2014).	35
FIGURAS 3 E 4 – COMPORTA PARA CONTROLE DA VELOCIDADE DE ENTRADA NA ZC. FONTE: MAIA (2010).	35
FIGURA 5 – CÂMARA DE SATURAÇÃO.....	36
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DA UPFAD. ADAPTADO: MAIA (2010).	37
FIGURA 7 – CURVA DE OPERAÇÃO DA CÂMARA DE SATURAÇÃO PARA OS BOCAIS DE INJEÇÃO.....	39
FIGURA 8 – MICRO ADV SONTEK. FONTE: SONTEK (2015).....	40
FIGURA 9 - SONDA MICRO ADV SONTEK ACOPLADA A UPFAD.....	41
FIGURA 10 - COMPUTADOR ACOPLADO À SONDA MICRO ADV. SOFTWARE PARA COLETA DE DADOS FORNECIDO PELA SONTEK - HORIZONADV.....	42
FIGURA 11 – MALHA DE PONTOS E GEOMETRIA DA UPFAD PARA OS TESTES COM SONDA MICRO ADV.....	43
FIGURA 12 – GEOMETRIA DA UPFAD PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS ESTÍMULO-RESPOSTA.....	49
FIGURA 13- COMPARATIVO ENTRE MODELOS DE TURBULÊNCIA. DNS, LES E RANS. ADAPTADO DE: WWW.UTTEI.ENEA.IT/COMBUSTIONE-SOSTENIBILE/IMG-COMBUSTIONE-SOSTENIBILE.....	54
FIGURA 14 - DIVISÕES E REGIÕES NAS PROXIMIDADES DA PAREDE. ADAPTADO: ANSYS, 2010.	56
FIGURA 15 – ESQUEMA DAS OPÇÕES SELECIONADAS PARA A SIMULAÇÃO DAS MICROBOLHAS DE AR NAS SIMULAÇÕES DO GRUPO I. VALORES DE DIÂMETRO EM μm , FRAÇÕES EM PORCENTAGEM.....	61
FIGURA 16 – ACÚMULO DE MICROBOLHAS NOS TERMINAIS DA SONDA MICRO ADV.....	67
FIGURA 17 – PERFIL DE VELOCIDADES DA ZS, COLETAS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$), VISTA LATERAL. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 48,3 \text{ m/h}$, $PSAT = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$	68
FIGURA 18 - PERFIL DE VELOCIDADES DA ZS, COLETAS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$), VISTA FRONTAL. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 48,3 \text{ m/h}$, $PSAT = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$	69
FIGURA 19 - PERFIL DE VELOCIDADES DA ZS, COLETAS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$), VISTA LATERAL ($Z > 1,5\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 48,3 \text{ m/h}$, $PSAT = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$	70
FIGURA 20 - PERFIL DE VELOCIDADES DA ZS, COLETAS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$), VISTA LATERAL ($Z < 1,5\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 48,3 \text{ m/h}$, $PSAT = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$	70
FIGURA 21- PERFIL DE VELOCIDADES DA ZS, COLETAS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$), VISTA EM PERSPECTIVA. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 48,3 \text{ m/h}$, $PSAT = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$	71
FIGURA 22 - DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS POR ESCHER (2011). PERFIL DE VELOCIDADES DA ZS, COLETAS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,3 \text{ m/h}$, $AV = 7,87 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 47,2 \text{ m/h}$, $PSAT = 4,5 \text{ kgf/cm}^2$. ADAPTADO DE: ESCHER (2011).	73
FIGURA 23 – ENSAIO 1. CURVA $E\theta$ EXPERIMENTAL E PARA OS MODELOS DPI, DGI, N-CSTR EM FUNÇÃO DO TEMPO ADIMENSIONAL θ . $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 11,5 \text{ m/h}$, $AV = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 44,2 \text{ m/h}$	75
FIGURA 24 - ENSAIO 1. CURVA $E\theta$ EXPERIMENTAL VERSUS MODELO DPI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 11,5 \text{ m/h}$, $AV = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 44,2 \text{ m/h}$	76
FIGURA 25 - ENSAIO 1. CURVA $E\theta$ EXPERIMENTAL VERSUS MODELO DGI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 11,5 \text{ m/h}$, $AV = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 44,2 \text{ m/h}$	76
FIGURA 26 - ENSAIO 1. CURVA $E\theta$ EXPERIMENTAL VERSUS MODELO N-CSTR. $N = 3$, $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 11,5 \text{ m/h}$, $AV = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 44,2 \text{ m/h}$	77
FIGURA 27- ENSAIO 2. CURVA $E\theta$ EXPERIMENTAL E PARA OS MODELOS DPI, DGI, N-CSTR EM FUNÇÃO DO TEMPO ADIMENSIONAL θ . $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 48,3 \text{ m/h}$	77
FIGURA 28- ENSAIO 2. CURVA $E\theta$ EXPERIMENTAL VERSUS MODELO DPI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 48,3 \text{ m/h}$	78
FIGURA 29- ENSAIO 2. CURVA $E\theta$ EXPERIMENTAL VERSUS MODELO DGI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCF = 48,3 \text{ m/h}$	78

FIGURA 30 - ENSAIO 2. CURVA $E\theta$ EXPERIMENTAL VERSUS MODELO N-CSTR. $N = 3$, $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCf = 48,3 \text{ m/h}$	79
FIGURA 31 – SIMULAÇÃO FUNÇÕES DE PAREDE <i>ENHANCED WALL FUNCTION</i> . (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. DIÂMETRO BOLHAS $80 \mu\text{M}$. RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y =$ $0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCf = 48,3 \text{ m/h}$	81
FIGURA 32 – SIMULAÇÃO FUNÇÕES DE PAREDE <i>NON EQUILIBRIUM WALL FUNCTION</i> . (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. DIÂMETRO BOLHAS $80 \mu\text{M}$. RESULTADOS NO PLANO CENTRAL.... ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCf = 48,3 \text{ m/h}$	82
FIGURA 33 – SIMULAÇÃO FUNÇÕES DE PAREDE <i>SCALABLE WALL FUNCTION</i> . (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. DIÂMETRO BOLHAS $80 \mu\text{M}$. RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y =$ $0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCf = 48,3 \text{ m/h}$	82
FIGURA 34 – SIMULAÇÃO FUNÇÕES DE PAREDE <i>STANDARD WALL FUNCTION</i> . (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. DIÂMETRO BOLHAS $80 \mu\text{M}$. RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y =$ $0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCf = 48,3 \text{ m/h}$	83
FIGURA 35 – SIMULAÇÃO FUNÇÕES DE PAREDE MODELO SST. (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. DIÂMETRO BOLHAS $80 \mu\text{M}$. RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e =$ $4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $VCf = 48,3 \text{ m/h}$	84
FIGURA 36 – SIMULAÇÃO I – GRUPO I – DIÂMETRO BOLHAS $40 \mu\text{M}$. (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. MODELO MULTIFÁSICO <i>EULERIAN</i> . MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \epsilon$, <i>STANDARD</i> <i>WALL FUNCTIONS</i> . RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$,	85
FIGURA 37 – SIMULAÇÃO II – GRUPO I – DIÂMETRO BOLHAS $60 \mu\text{M}$. (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. MODELO MULTIFÁSICO <i>EULERIAN</i> . MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \epsilon$, <i>STANDARD</i> <i>WALL FUNCTIONS</i> . RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$,	86
FIGURA 38 – SIMULAÇÃO III – GRUPO I – DIÂMETRO BOLHAS $80 \mu\text{M}$. (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. MODELO MULTIFÁSICO <i>EULERIAN</i> . MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \epsilon$, <i>STANDARD</i> <i>WALL FUNCTIONS</i> . RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$,	86
FIGURA 39 – SIMULAÇÃO IV – GRUPO I – DIÂMETRO BOLHAS $100 \mu\text{M}$. (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. MODELO MULTIFÁSICO <i>EULERIAN</i> . MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \epsilon$, <i>STANDARD</i> <i>WALL FUNCTIONS</i> . RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$,	87
FIGURA 40 – SIMULAÇÃO V – GRUPO I – DIÂMETRO BOLHAS $120 \mu\text{M}$. (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. MODELO MULTIFÁSICO <i>EULERIAN</i> . MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \epsilon$, <i>STANDARD</i> <i>WALL FUNCTIONS</i> . RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$,	87
FIGURA 41 – SIMULAÇÃO VI – GRUPO I – DIÂMETROS DE MICROBOLHAS 20, 40, 60, 80 E $100 \mu\text{M}$, <i>POPULATION</i> <i>BALANCE DISCRETO HOMOGÊNEO</i> . (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. MODELO MULTIFÁSICO <i>EULERIAN</i> . MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \epsilon$, <i>STANDARD WALL FUNCTIONS</i> . RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/}$ $\text{m}^3\text{Água}$,	89
FIGURA 42 – SIMULAÇÃO VII – GRUPO I – DIÂMETROS DE MICROBOLHAS - FASE SECUNDÁRIA (1): 10, 20, 30, 40 E 50 μM . FASE SECUNDÁRIA (2): 60, 70, 80, 90 E $100 \mu\text{M}$. <i>POPULATION BALANCE DISCRETO NÃO HOMOGÊNEO</i> . (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. MODELO MULTIFÁSICO <i>EULERIAN</i> . MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \epsilon$, <i>STANDARD WALL FUNCTIONS</i> . RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y =$ $0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TASZS = 12,5 \text{ m/h}$, $AV = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$,	90
FIGURA 43 – SIMULAÇÃO VIII – GRUPO I – DIÂMETROS DE MICROBOLHAS 20, 40, 60, 80 E $100 \mu\text{M}$. <i>POPULATION</i> <i>BALANCE DISCRETO HOMOGÊNEO</i> . INTERAÇÃO ENTRE MICROBOLHAS ATIVADA. (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. MODELO MULTIFÁSICO <i>EULERIAN</i> . MODELO DE TURBULÊNCIA	

<i>k</i> – ϵ , STANDARD WALL FUNCTIONS. RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2m$) $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 12,5 m/h$, $AV = 8,0 gAr/m^3\acute{A}gua$,	91
FIGURA 44 – SIMULAÇÃO IX – GRUPO I – DIÂMETROS DE MICROBOLHAS - FASE SECUNDÁRIA (1):10, 20, 30, 40 E 50 μM . FASE SECUNDÁRIA (2): 60, 70, 80, 90 E 100 μM . POPULATION BALANCE DISCRETO NÃO HOMOGÊNEO. INTERAÇÃO ENTRE MICROBOLHAS ATIVADA. (A) FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE AR, (B) VETORES DE VELOCIDADE DA ÁGUA. MODELO MULTIFÁSICO EULERIAN. MODELO DE TURBULÊNCIA <i>k</i> – ϵ , STANDARD WALL FUNCTIONS. RESULTADOS NO PLANO CENTRAL ($Y = 0,2m$). $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 12,5 m/h$, $AV = 8,0 gAr/m^3\acute{A}gua$,	91
FIGURA 45- SIMULAÇÃO A. CURVA $E\theta$ E CURVAS DOS MODELOS DPI, DGI, N-CSTR EM FUNÇÃO DO TEMPO ADIMENSIONAL θ . $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 11,5 m/h$, $AV = 0 gAr/m^3\acute{A}gua$, $VCF = 44,2 m/h$...	94
FIGURA 46 – SIMULAÇÃO A. CURVA $E\theta$ VERSUS MODELO DPI. $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 11,5 m/h$, $AV = 0 gAr/m^3\acute{A}gua$, $VCF = 44,2 m/h$	94
FIGURA 47 – SIMULAÇÃO A. CURVA $E\theta$ VERSUS MODELO DGI. $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 11,5 m/h$, $AV = 0 gAr/m^3\acute{A}gua$, $VCF = 44,2 m/h$	95
FIGURA 48 – SIMULAÇÃO A. CURVA $E\theta$ VERSUS MODELO N-CSTR. $N = 2$, $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 11,5 m/h$, $AV = 0 gAr/m^3\acute{A}gua$, $VCF = 44,2 m/h$	95
FIGURA 49 - SIMULAÇÃO B. CURVA $E\theta$ E CURVAS DOS MODELOS DPI, DGI, N-CSTR EM FUNÇÃO DO TEMPO ADIMENSIONAL θ . $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 12,5 m/h$, $AV = 8,0 gAr/m^3\acute{A}gua$, $VCF = 48,3 m/h$	96
FIGURA 50 - SIMULAÇÃO B. CURVA $E\theta$ VERSUS MODELO DPI. $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 12,5 m/h$, $AV = 8,0 gAr/m^3\acute{A}gua$, $VCF = 48,3 m/h$	96
FIGURA 51 - SIMULAÇÃO B. CURVA $E\theta$ VERSUS MODELO DGI. $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 12,5 m/h$, $AV = 8,0 gAr/m^3\acute{A}gua$, $VCF = 48,3 m/h$	97
FIGURA 52 - SIMULAÇÃO B. CURVA $E\theta$ VERSUS MODELO N-CSTR. $N = 7$, $Q_e = 4,6 m^3/h$, $TASZS = 12,5 m/h$, $AV = 8,0 gAr/m^3\acute{A}gua$, $VCF = 48,3 m/h$	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS DE OPERAÇÃO DA CÂMARA DE SATURAÇÃO PARA OS BOCAIS DE INJEÇÃO.....	39
TABELA 2 – PARÂMETROS OPERACIONAIS UPFAD – ENSAIOS COM MICRO ADV.....	44
TABELA 3 – PARÂMETROS OPERACIONAIS UPFAD – ENSAIOS ESTÍMULO RESPOSTA.....	50
TABELA 4 – VALORES DAS CONSTANTES $C\varepsilon1$, $C\varepsilon2$, σk E $\sigma\varepsilon$ PARA O MODELO $k - \varepsilon$. FONTE: ANSYS, 2010.....	55
TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DA MALHA – SIMULAÇÕES DO GRUPO I.....	62
TABELA 6 - ESTATÍSTICAS DA MALHA – SIMULAÇÕES DO GRUPO II	64
TABELA 7 – RESULTADOS PARA OS PARÂMETROS DOS MODELOS DE DISPERSÃO DE PEQUENA INTENSIDADE (DPI), GRANDE INTENSIDADE (DGI), N-CSTR EM SÉRIE E DEMAIS VARIÁVEIS. ENSAIO 1 – SEM RECIRCULAÇÃO.	74
TABELA 8 – RESULTADOS PARA OS PARÂMETROS DOS MODELOS DE DISPERSÃO DE PEQUENA INTENSIDADE (DPI), GRANDE INTENSIDADE (DGI), N-CSTR EM SÉRIE E DEMAIS VARIÁVEIS. ENSAIO 2 – COM RECIRCULAÇÃO (9,1%).	74
TABELA 9 – RESULTADOS PARA OS PARÂMETROS DOS MODELOS DE DISPERSÃO DE PEQUENA INTENSIDADE (DPI), GRANDE INTENSIDADE (DGI), N-CSTR EM SÉRIE E DEMAIS VARIÁVEIS. SIMULAÇÃO A – ESCOAMENTO MONOFÁSICO – ÁGUA.	93
TABELA 10 – RESULTADOS PARA OS PARÂMETROS DOS MODELOS DE DISPERSÃO DE PEQUENA INTENSIDADE (DPI), GRANDE INTENSIDADE (DGI), N-CSTR EM SÉRIE E DEMAIS VARIÁVEIS. SIMULAÇÃO B – ESCOAMENTO BIFÁSICO – AR-ÁGUA.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADV – Acoustic Doppler Velocimeter

CFD – Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional)

COV – Composto orgânico volátil

DTR – Distribuição de Tempo de Residência

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

USP – Universidade de São Paulo

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

OMS – Organização Mundial da Saúde

PLANASA – Plano Nacional de Saneamento

PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

UPFAD – Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido

UV – Ultravioleta

FAD – Flotação por Ar Dissolvido

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 – Tempo de Detenção Hidráulico

ZC – Zona de Contato

ZS – Zona de Separação

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVO	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1. FAD - CONCEITUAÇÃO	24
3.2. FAD - FATORES INTERFERENTES	25
3.3. CFD – CONCEITUAÇÃO	28
3.4. CFD – APLICAÇÃO EM TRATAMENTO DE ÁGUA E FAD	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1. ANÁLISES EXPERIMENTAIS – UNIDADE PILOTO	34
4.1.1. PARÂMETROS OPERACIONAIS	38
4.2. LEVANTAMENTO DOS PERFIS DE VELOCIDADES COM SONDA MICRO-ADV	40
4.3. ENSAIOS ESTÍMULO-RESPOSTA	45
4.4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS – CFD	50
4.4.1. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO	51
4.4.2. PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	58
5. RESULTADOS	65
5.1. ENSAIOS EXPERIMENTAIS – MICRO ADV	65
5.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS – ESTÍMULO-RESPOSTA	73
5.3. SIMULAÇÕES EM CFD	80
5.3.1. GRUPO I	80
5.3.2. GRUPO II	92
6. CONCLUSÕES	98
7. RECOMENDAÇÕES	100
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1. INTRODUÇÃO

A crise hídrica enfrentada em algumas regiões do país nos últimos anos tem exposto, entre tantas coisas, a fragilidade de nossos sistemas de saneamento, que colocam em risco o abastecimento público de milhões de pessoas, e de forma quase direta sua saúde. A gestão dos recursos hídricos nesse cenário se torna ainda mais desafiadora, e envolve a alocação e integração entre os diferentes usuários da água, de forma eficiente, zelando pela sua qualidade e disponibilidade, em um país de dimensões continentais, tão desigual em termos de disponibilidade hídrica.

Entre as décadas de 70 e 80, o setor de saneamento recebeu elevados investimentos através do PLANASA, nesse período houve aumento significativo nos índices de atendimento à população, passando de 11,9 milhões para 49,6 milhões e de 6,1 milhões para 17,4 milhões de pessoas atendidas pelos sistemas de distribuição de água e coleta de esgoto respectivamente (PAGNOCCHESCHI, 2000). Nas décadas seguintes, apesar da redução dos investimentos, o setor continuou sua expansão, ainda que de forma morosa, especialmente nos serviços de coleta e tratamento de esgoto sanitário. Segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), em 2008 99,4% dos municípios apresentavam abastecimento de água por rede de distribuição em pelo menos um distrito ou parte dele, enquanto apenas 55,2% dispunham de rede coletora de esgoto sanitário (BRASIL, 2010).

O setor de abastecimento público de água, apesar de apresentar números mais consolidados no país, ainda é deficitário, bastante desigual e em diversas regiões precário, ainda segundo a PNSB, em 2008 cerca de 12 milhões de residências não tinham acesso à água e, no âmbito da qualidade da água fornecida, 6,6% dos municípios distribuíam a água sem nenhuma forma de tratamento. Para chegar até o seu destino a água enfrenta um cenário ainda pior, as redes de distribuição são antigas, fragmentadas e muitas vezes incapazes de atender a demanda. O resultado é um índice de perdas elevado, 37% na média nacional (BRASIL, 2014).

A expansão urbana e populacional, aliada a maior demanda por serviços e produtos, implica em pressões sobre os sistemas produtores, que em muitos casos operam próximos de sua capacidade máxima. Muitas estações foram construídas ainda

no período do PLANASA e apresentam profundas limitações tecnológicas e operacionais. A situação é agravada pela crescente deterioração dos mananciais superficiais, em especial nas regiões densamente povoadas, gerando um ciclo vicioso, em que a água se torna cada vez mais escassa e mais difícil de ser tratada. A falta de planejamento e investimentos tanto em expansão como modernização dos sistemas produtores de água e de tratamento de esgoto figura entre os maiores vilões do setor.

Diante desse panorama de crise, há uma intensificação na busca de novas tecnologias e soluções que permitam aumentar a oferta de água, tanto por parte dos setores da sociedade civil quanto na academia. Em um cenário de limitação na oferta de um produto, as primeiras opções para aumentar a disponibilidade desse produto frequentemente são: aumento da produção através de expansão dos meios produtores e exploradores, melhorias no processo produtivo através de novas tecnologias ou aprimoramento das técnicas existentes, reaproveitamento e reutilização de matérias primas e até mesmo de produtos. Esses aspectos produtivos de mercado são facilmente aplicáveis no setor de água para abastecimento público, este trabalho se insere nesse contexto de escassez de água, buscando contribuir para a solução deste problema, através da expansão do conhecimento sobre um processo de tratamento de água, com foco em otimização e aperfeiçoamento.

O tratamento de água consiste, de forma bastante simplificada, em operações e processos subsequentes para remoção das características indesejáveis ao consumo humano. A aplicação de múltiplas barreiras de proteção é considerada pela OMS a metodologia de melhor custo benefício para o tratamento da água (WHO, 2004). Esta cadeia de processos varia conforme a água a ser tratada, de forma bastante semelhante a uma matéria prima, que precisa ser trabalhada para se tornar um produto. A água bruta pode variar em qualidade, exigindo em algumas situações apenas um tratamento simplificado, em outros casos são necessários processos avançados para atender aos parâmetros estabelecidos na legislação e garantir a segurança dos usuários.

A flotação por ar dissolvido é um dos diversos processos conhecidos para tratamento de água, sendo utilizada a mais de 40 anos no mundo. No Brasil a flotação começou a ser utilizada ainda na década de 80, e hoje faz parte de estações de tratamento em diversas cidades, como Jaú-SP, Caraguatatuba-SP, São José dos

Pinhais-SP, Aracruz-ES, Manaus-AM, Carmo do Rio Claro-MG, Betim-MG, Curitiba-PR, Foz do Iguaçu-PR, entre outras.

A clarificação de águas através da flotação é bastante vantajosa em situações de baixa disponibilidade de área, devido as elevadas taxas de aplicação superficial utilizadas nesse processo (EDZWALD; WALSH, 1992; SCHOFIELD, 2001), outra aplicação bastante eficiente deste processo é na clarificação de águas com elevados índices de cor e com presença de algas (ZABEL, 1985).

Apesar de bastante estabelecido, o processo de flotação apresenta certos mecanismos e particularidades ainda pouco conhecidos, objetos de pesquisas científicas por todo o mundo. O grupo de pesquisa do LATAR é referência neste tema no Brasil, sendo responsável por múltiplos trabalhos de pesquisa na área. Moruzzi (2005) estudou a influência do tamanho de partículas, velocidade e tempo na zona de reação e suas influências na eficiência da flotação, Escher (2011) avaliou a influência da taxa de aplicação superficial e da concentração de ar na eficiência da flotação, Souza (2012) estudou o gradiente médio de velocidade na zona de contato e seus efeitos na clarificação de águas através da flotação, Pioltine (2013) examinou a eficiência da flotação quanto ao tamanho das partículas floculadas.

Todos esses trabalhos apresentam um denominador comum, a investigação de diferentes variáveis que influenciam na eficiência do processo de flotação, outro aspecto comum entre estes trabalhos é a utilização de uma unidade piloto de flotação, construída como plataforma de estudos da flotação no LATAR, a Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido (UPFAD) é bastante versátil, permitindo diferentes ajustes e variações no seu funcionamento, condições ideais para o estudo do processo.

Os mecanismos de estudo científico basearam-se por muitos anos no binômio: teoria e prática, por um lado o desenvolvimento puramente matemático e teórico, por outro lado a prática experimental, engenharia e realização de experimentos científicos. (SIVA KUMAR; PHILOMINATHAN, 2011). Ambos os métodos têm por objetivo aprofundar o conhecimento acerca de determinado problema. No século passado, com o advento da computação, surge uma terceira alternativa para a compreensão de diversos problemas, especialmente aqueles que se referem ao escoamento de fluidos, a mistura

da experimentação com a fundamentação teórica em ambiente computacional, que auxilia a compreensão e complementa o conhecimento na área (ANDERSON JR., 1995).

A aplicação de modelos de predição das propriedades do escoamento em ambiente computacional é conhecida como CFD (em inglês: Computational Fluid Dynamics – CFD), e consiste na obtenção de soluções numéricas através da discretização do meio contínuo e aproximação das variáveis de interesse em pontos do domínio (ANSYS, 2010; ZHANG, 2006; WOLS, 2011). Essa tarefa traduz-se na execução de uma enorme quantidade de cálculos e operações algébricas, que exigem grande capacidade de processamento. O aumento no poder computacional nas últimas décadas tornou viável a execução desse tipo de problemas em tempos relativamente curtos, permitindo a realização de simulações cada vez mais complexas. Outros fatores têm contribuído para a expansão da fluidodinâmica computacional observada nos últimos anos, como o surgimento de pacotes de softwares comerciais mais amigáveis e a manutenção de códigos livres com suporte e comunidades de compartilhamento de informações online.

A utilização de CFD nas indústrias automobilísticas, naval, aeroespacial e mecânica é uma realidade nos dias de hoje. Outros setores industriais e comerciais incorporam tais ferramentas no processo de produção e desenvolvimento de seus produtos, como uma forma de reduzir custos com protótipos e experimentos, e no aperfeiçoamento dos aspectos de desempenho dos produtos e processos envolvidos. Além das aplicações comerciais, o CFD está presente na pesquisa acadêmica, seja na simulação de modelos climáticos, de dispersão de poluentes, seja no desenvolvimento de máquinas mecânicas, veículos e numa infinidade de outras aplicações. No tratamento de água a presença desse tipo de simulação se tornou realidade em um grande número de trabalhos científicos, os principais processos estudados são a flotação, desinfecção por UV, desinfecção por ozônio, decantação e até mesmo filtração.

Desta forma, a utilização de simulações em CFD conjuntamente com a obtenção de dados experimentais em laboratório, com o objetivo de representar o escoamento observado no processo de flotação por ar dissolvido, constitui uma poderosa ferramenta, capaz de fornecer dados valiosos para a compreensão do processo e o aprimoramento de projetos que utilizem essa forma de tratamento.

2. OBJETIVO

Este trabalho teve por objetivo geral representar o escoamento composto por água e ar observado na unidade piloto de flotação por ar dissolvido empregando modelo computacional em CFD.

Os objetivos específicos deste trabalho:

- Obter o perfil de velocidades do escoamento multifásico da água e ar (microbolhas) na unidade piloto através de análises com sonda micro ADV;
- Determinar as curvas de distribuição de tempo de residência da unidade piloto através ensaio estímulo resposta com traçador;
- Calibrar e validar as simulações em ambiente computacional da unidade piloto operando sob condições estabelecidas e encontrar o melhor conjunto de parâmetros e variáveis de CFD capazes de representar o escoamento bifásico ar-água no interior da unidade;
- Avaliar diferentes configurações operacionais e seus efeitos sobre a eficiência do processo através de simulações em ambiente computacional utilizando os parâmetros ajustados para a unidade piloto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FAD - CONCEITUAÇÃO

A separação de fases através da flotação vem sendo utilizada desde o fim do século XIX, inicialmente era aplicada na recuperação de partículas em processos industriais, em especial na indústria de mineração (REALI, 1984). Somente na década de 1920 que a flotação foi introduzida como processo de purificação de água, como alternativa aos processos de clarificação convencionais (KIURU, 2001).

A flotação consiste na separação de partículas dispersas em um meio líquido através da diferença entre a densidade das fases. A inserção de um gás (ar) no meio e a consequente combinação desse gás às partículas resulta na redução de sua densidade, permitindo a remoção do então lodo flotado na superfície através de raspadores. (METCALF; EDDY, 2003).

Existem diferentes formas de se introduzir o ar numa unidade de flotação, a maneira mais comum, e amplamente utilizada no tratamento de água, é a adição de uma corrente saturada com ar dissolvido, caracterizando dessa forma a flotação por ar dissolvido (FAD). O processo de saturação ocorre através da pressurização de uma fração do próprio efluente, que é direcionado a uma câmara onde ocorre o contato com o ar. A introdução desta corrente com ar dissolvido ocorre em bocais no início da unidade de flotação, que são responsáveis pela formação de microbolhas de ar devido à repentina queda de pressão a qual o líquido é submetido. (EDZWALD; HAARHOFF, 2011).

A FAD apresenta certas vantagens frente aos processos de clarificação convencionais, dentre os quais se destaca a sedimentação. Tanto a FAD quanto a sedimentação dependem da ação de uma força motriz externa capaz de realizar a separação entre a água e as partículas.

Na sedimentação, a separação ocorre através da ação da força peso, que é constante. Dessa forma para remover partículas com baixa massa específica é necessário um maior tempo de sedimentação, o que implica em unidades de grandes proporções. Nessas situações, a FAD se torna uma alternativa muito mais eficiente para

tratamento de águas com baixa turbidez, cor elevada e com presença de algas, características muito comuns em águas de reservatórios (SCHOFIELD, 2001).

A possibilidade de se trabalhar com taxas de aplicação hidráulicas elevadas reduz significativamente o tamanho das unidades, que reflete em menores custos de implantação (EDZWALD; WALSH, 1992; SCHOFIELD, 2001). Outros benefícios atribuídos à FAD: redução na quantidade de produtos químicos utilizados; lodo produzido apresenta maior teor de sólidos podendo dispensar o adensamento em algumas situações; remoção de COV, sabor e odor devido ao arraste pelas microbolhas de ar (REALI, 1991).

Em contrapartida, a FAD também apresenta algumas desvantagens, dentre as mais patentes: aumento no consumo energético e maior complexidade operacional, aspectos que influenciam nos custos operacionais (SCHOFIELD, 2001).

3.2. FAD - FATORES INTERFERENTES

O primeiro passo para a utilização da flotação por ar dissolvido em um sistema de tratamento de água para abastecimento ocorre antes mesmo da própria unidade de FAD, a desestabilização das partículas e a formação de flocos é essencial para o correto funcionamento da flotação (REALI, 1991).

Segundo Edzwald (2010), os tempos de floculação empregados nas unidades de FAD vêm diminuindo ao longo dos anos, de 20 a 30 minutos nos anos 80 para 10 min na década seguinte, o autor atribui tal mudança a novas descobertas tecnológicas e na expansão do conhecimento sobre o processo. Pioltine e Reali (2011) realizaram estudo acerca da influência do tempo de floculação e do tamanho dos flocos na eficiência da flotação por ar dissolvido, os autores avaliaram tempos de floculação de 10 e 17 minutos para recirculação de 6, 8 e 10%. Os resultados mostraram uma melhor eficiência para o tempo de floculação de 17 minutos e 6% de recirculação, os resultados para o tempo de floculação de 10 minutos também foram considerados bons, quanto ao tamanho dos flocos, os autores observaram tamanhos menores para tempo de floculação de 10 minutos.

As unidades de flotação são divididas em duas partes: Zona de Contato (ZC) e Zona de Separação (ZS). Na primeira tem-se a entrada da água contendo os flocos e a injeção da corrente de recirculação e consequente formação das microbolhas de ar, nesta etapa ocorrem as colisões entre microbolhas e flocos e a formação dos agregados flocobolhas, na ZS, os agregados formados emergem à superfície onde são removidos, enquanto a água clarificada é encaminhada a porção inferior da unidade, onde é coletada. Os processos que se desenvolvem na ZC são de fundamental importância para o sucesso da flotação, deste modo inúmeros trabalhos dedicam especial atenção para a influência dos parâmetros como tempo de detenção hidráulico, gradiente médio de velocidade, taxa de aplicação hidráulica na zona de contato, na eficiência do processo.

Reali e Patrizzi (2007) avaliaram os padrões de escoamento na ZC de uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido e a interferência do tempo de detenção e da taxa de aplicação superficial na qualidade da água obtida. Os autores realizaram 8 ensaios com diferentes valores para o tempo de detenção e a taxa de aplicação superficial, para a avaliação do escoamento na ZC e ZS utilizou-se sonda Micro ADV para leitura do campo de velocidades. As melhores eficiências foram observadas com TDH de 34 s e TASzc de 180 m/h. As eficiências para os demais testes também foram consideradas satisfatórias pelos autores. Quanto aos padrões de escoamento, os autores observaram resultados semelhantes aos apresentados por Lundh et al. (2002), com alto grau de mistura na região inferior e transformação para escoamento pistonado ao longo da altura da ZC.

A colisão entre as partículas e as microbolhas é essencial no processo de flotação, todavia, a colisão não implica necessariamente em adesão entre bolhas e flocos, tal fenômeno depende, dentre diversos fatores, do tamanho das microbolhas, de certas propriedades como a hidrofobicidade das partículas e do ângulo de contato entre partículas e microbolhas. Moruzzi e Reali (2010) avaliaram a distribuição de tamanhos de microbolhas em unidade piloto de flotação através de análise de imagens, também foram investigadas a influência do tempo de detenção hidráulico, taxa de aplicação superficial, pH e concentração de ar na eficiência do processo. Os autores observaram uma relação entre o TDH e a concentração de ar na ZC e seus efeitos no grau de mistura observado – pouca mistura em TDH alto e sem ar, muita mistura com TDH baixo e alta

concentração de ar. Quanto à distribuição de tamanho de microbolhas, a faixa de diâmetros preponderante situa-se entre 10 e 100 μm , enquanto o diâmetro médio observado foi de 40 a 50 μm , resultados semelhantes aos encontrados na literatura. Os autores concluíram que todos os parâmetros investigados podem modificar a distribuição de tamanhos de microbolhas na zona de contato.

Moruzzi e Reali (2014) estudaram os dispositivos de coleta de água flotada e seus efeitos em uma unidade piloto de flotação, foram testados dois dispositivos de coleta em duas condições de operação, convencional ou alta taxa com a presença de módulos lamelares na Zona de Separação da unidade piloto. Os autores investigaram diferentes valores para taxa de aplicação superficial (TAS) na unidade e com base nos resultados obtidos realizaram testes adicionais variando-se a taxa de recirculação. Adicionalmente foram levantadas as curvas de distribuição de tempo de residência na unidade piloto e a melhor condição de escoamento com base nos modelos teóricos de escoamento. Os resultados indicaram que o dispositivo de coleta composto por fundo falso perfurado apresentou melhores resultados quando comparado com o tubo perfurado tipo manifold tanto para operação convencional, quanto alta taxa. Contudo, quando operada com os módulos lamelares, a unidade piloto não apresentou distribuição equitativa de vazão dentro dos módulos para ambos dispositivos de coleta. Com relação aos ensaios estímulo resposta, os autores encontraram resultados condizentes com aqueles obtidos por outros autores, com o aumento da recirculação implicando em aumento da dispersão do escoamento.

Lundh et al. (2002) avaliaram a influência da configuração da ZC na estrutura de escoamento de uma unidade piloto de flotação. Os autores utilizaram sonda Micro ADV para levantar o perfil de velocidades na unidade de flotação. Foram testadas diferentes configurações geométricas da ZC, alterando a altura e inclinação do anteparo entre a ZC e a ZS e o comprimento da ZC. Os resultados indicaram escoamento tipo pistonado na metade superior da ZC quando operadas com altura do anteparo maior, enquanto na região inferior da ZC a predominância era de mistura intensa. O padrão de escoamento observado na ZS apresentou comportamento estratificado para situações em que a velocidade de crossflow, definida como a velocidade de passagem entre a zona de contato e a zona de separação numa unidade de flotação, foi maior que 37 m/h. A

presença de escoamento estratificado foi considerada um fator desejável para o aumento na eficiência da flotação.

Segundo Edzwald (2007), a presença de escoamento estratificado aumenta a eficiência da flotação, através do mesmo princípio de adição de área de separação aplicado à sedimentação de alta taxa, onde são utilizadas placas inclinadas. Dessa forma tornam-se possíveis taxas de aplicação superficial de 20 a 40 m/h, enquanto unidade de flotação comum podem operar na faixa de 5 a 15 m/h.

3.3. CFD – CONCEITUAÇÃO

A fluidodinâmica computacional (CFD) consiste na obtenção de soluções numéricas para problemas que compreendem o escoamento de fluidos através de simulações em ambiente computacional. As aplicações são as mais variadas: transferência de massa, transferência de calor, reações bioquímicas e químicas, escoamentos internos e externos, modelação do clima, e outros tantos fenômenos de relevância econômica, ambiental e acadêmica.

A fundamentação matemática para descrever os problemas que tratam do escoamento de fluidos compreende a utilização das equações de Navier-Stokes e da continuidade, que juntas formam um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares acopladas. Tais equações apresentam características que dificultam a sua resolução, e em geral, as soluções analíticas possíveis representam casos particulares. Portanto, na prática, não existe solução analítica geral para essas equações, neste sentido, a utilização de soluções numéricas se torna uma alternativa interessante para obter aproximações sobre esse tipo de problemas (FOX et al., 2010; POTTER; WIGGERT, 2004).

Os experimentos realizados utilizando as ferramentas de CFD apresentam vantagens quando comparados com a elaboração de experimentos práticos, como exemplo pode-se citar o menor custo relacionado a sua execução; resposta relativamente rápida; grande quantidade de dados e variáveis podem ser estudados com pouco trabalho e custo adicional, parametrização e otimização de resultados; nível de detalhamento dos resultados é praticamente ilimitado; similaridade de escala, ou seja,

não são necessários coeficientes de mudança de escala; possibilidade de estudar situações em condições inexecutáveis, como ambientes extremos, perigosos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995; ANDERSON JR., 1995). Talvez uma das maiores vantagens associadas a essa abordagem na resolução de problemas com escoamento, seja a possibilidade de visualizar os resultados de forma gráfica e interativa, com a capacidade de manipular o conjunto solução como um todo e extrair deste as informações pertinentes.

Existem inúmeros códigos de CFD disponíveis para utilização, seja gratuitos ou pagos, os pacotes comerciais mais comuns são CFX, FLUENT (ANSYS), CFD-FASTRAN (ESI), PHOENICS (CHAM), CFD++ (METACOMP), dentre outros. Na esfera dos códigos livres, existem inúmeros códigos, muitos dos quais bastante específicos, com destaque para o OPENFOAM, com uma grande biblioteca de rotinas e aplicações. O pacote de softwares da ANSYS, dos quais fazem parte o CFX e o FLUENT, é um dos códigos comerciais mais robustos disponíveis no mercado, estão inclusos no pacote diversos modelos para aplicações industriais, escoamentos multifásicos, e contam ainda com interface bastante intuitiva e amigável. A utilização de pacotes comerciais ou códigos livres, depende de diferentes fatores, como a disponibilidade de licenças, aplicabilidade do software ao problema proposto, custos com capacitação, dentre outros (ANSYS, 2010; ANSONI, 2015).

Embora os experimentos em CFD sejam muito proveitosos para o entendimento dos processos em análise, estes não dispensam a realização de experimentos práticos. Os dados experimentais são extremamente importantes pois servem como parâmetro comparativo para validação dos resultados das simulações computacionais (WOLS, 2011). Uma das desvantagens associadas ao uso de CFD está na incapacidade de interpretar corretamente os resultados, dado que qualquer simulação retorna um resultado, que depende diretamente dos parâmetros fornecidos para sua execução, cabe ao usuário interpretar e utilizar os resultados com critério.

3.4. CFD – APLICAÇÃO EM TRATAMENTO DE ÁGUA E FAD

A utilização de simulações em CFD aplicadas ao tratamento de água para abastecimento é relativamente recente, contudo o número de trabalhos realizados tem aumentado substancialmente nos últimos anos, mostrando uma tendência bastante evidente em se aplicar a fluidodinâmica computacional cada vez mais para contribuir na análise e solução de problemas em diferentes áreas do conhecimento. Dentre os diferentes processos e operações unitárias usualmente praticadas no tratamento de água, a modelação de sistemas de desinfecção por UV e ozônio juntamente com a flotação por ar dissolvido são as que apresentam maior número de artigos científicos publicados. (GYURÉK; FINCH, 1998; RAUEN et al., 2008; WOLS, 2011; BONDELIND, 2011; LAGHKOMI et al., 2012 e 2015),

Por se tratar de um processo complexo, os estudos em CFD acerca da FAD apresentam diferentes abordagens e graus de complexidade, os modelos podem variar: duas ou três dimensões, uma fase ou até quatro fases: água, ar, flocos e agregados floco-bolhas. As simplificações também estão presentes em maior ou menor medida. Embora seja desejável inserir o maior número de variáveis e formulações para buscar um modelo mais fidedigno, muitas vezes o custo computacional se torna elevado, demandando por simplificações (BONDELIND, 2011).

Ta et al. (2001) realizaram experimentos em escala real, utilizando câmera submersa para captura de imagens e sonda ADV para levantamento do perfil de velocidades no tanque de flotação. Tais dados foram comparados com modelo computacional em 3D para escoamento monofásico e bifásico, através da abordagem Eulerian-Eulerian. Os autores também simularam as partículas, bem como a eficiência de sua remoção através da abordagem de Lagrange, onde ocorre o rastreamento das partículas e seu curso no tanque. Os resultados das simulações foram capazes de representar o escoamento na região próxima à superfície d'água, entretanto para a região de fluxo reverso o modelo apresentou resultados divergentes dos observados nas medições com ADV. A eficiência de remoção de partículas foi de 80% para partículas entre 10 e 100 μm . Os autores consideram os resultados de eficiência como preliminares

e altamente dependentes das simplificações adotadas, demandando investigações adicionais.

Bondelind et al. (2010) estudaram a modelação em fluidodinâmica computacional da flotação por ar dissolvido, identificando os principais parâmetros associados com a adequação de um modelo. Os autores realizaram simulações em 2D e em 3D, utilizando o software Fluent, a modelação foi realizada com base no modelo Eulerian-Lagrangian, com duas fases: ar e água. Os dados experimentais utilizados para comparação e validação dos resultados foram obtidos de Lundh et al. (2002). Os resultados indicaram que o modelo de turbulência utilizado, $k-\epsilon$, juntamente com as funções de parede, representou de forma adequada a turbulência na unidade de flotação. Os autores concluíram ainda que modelos que utilizam geometria em 3D podem representar melhor certos fenômenos como a quebra da coluna de estratificação na zona de separação, entretanto os autores indicaram a necessidade de se realizar estudos mais aprofundados, utilizando por exemplo o regime transiente.

Guimet et al. (2007) também buscaram representar a FAD, em particular a estratificação na zona de separação, através da modelação computacional. Os autores realizaram simulações com geometria em 2D, tanto para sistemas monofásicos quanto bifásicos, água-ar. Os dados experimentais utilizados para validação dos resultados foram obtidos do trabalho de Lundh et al. (2002) e também em uma estação piloto de uma indústria. Os resultados indicaram que o modelo estudado permite reproduzir com boa representatividade o processo de flotação na zona de separação, sendo capaz de representar a estratificação presente nessa zona.

Lakghomi et al. (2012) estudaram a agregação de bolhas e a estratificação do escoamento e seus efeitos na eficiência da FAD. Os autores propuseram um modelo teórico para relacionar a estratificação e a remoção de bolhas na zona de separação de uma unidade de flotação. Simulações em CFD foram realizadas com o objetivo de encontrar condições operacionais que resultassem no padrão de escoamento estratificado. Os autores realizaram as simulações em 2D, utilizando modelo proposto por Bondelind et al. (2010), foram realizadas simulações com e sem agregação de bolhas, os diâmetros de bolhas testados foram de 20 a 80 μm , com distribuição populacional, e 80 μm respectivamente para as simulações com interação entre bolhas e sem interação.

Os resultados indicaram que o aumento na fração de ar resulta na ocorrência do padrão de escoamento estratificado e que este implica em maior eficiência na remoção de bolhas. Por outro lado, foi observado que um aumento na taxa de aplicação superficial inibiu a formação deste padrão de escoamento. Os autores verificaram que a inclusão da interação entre bolhas é fundamental para a correta representação do escoamento nas unidades de flotação por parte dos modelos em CFD.

Em trabalho posterior, Lakghomi et al. (2015) propuseram um modelo para determinar a eficiência do processo de flotação. Além do modelo teórico, foram realizadas simulações em CFD com o objetivo de avaliar o impacto das diferentes variáveis operacionais na eficiência do processo. As simulações foram realizadas no software Fluent em 2D, com quatro fases: água, ar, flocos e agregados floco-bolhas. As variáveis operacionais testadas foram: concentração de ar, taxa de aplicação superficial, tamanho das bolhas e tamanho dos flocos. Os autores puderam extrair do modelo em CFD curvas de desempenho para a remoção de partículas versus: distribuição de tamanho de bolhas, fração de ar e tamanho de partículas. Os autores concluíram ainda que a estratificação do escoamento melhora a eficiência do processo e que a ocorrência de tal padrão de escoamento está associada ao aumento na fração de ar até um ponto de ótimo.

Pinto (2013) estudou a flotação por ar dissolvido em ambiente computacional utilizando CFX. A autora reproduziu as condições experimentais de outros trabalhos, realizados em uma unidade piloto de flotação. Os resultados comparativos foram analisados quanto ao gradiente médio de velocidades, concentração de microbolhas de ar no interior da ZS e comportamento dos vetores de velocidade tanto na ZC quanto na ZS da unidade. Os resultados concentraram-se em dois grupos de modelos, aqueles utilizando a condição de parede porosa a fase gasosa na superfície da piloto, e aqueles em que modelou-se a superfície livre da água. Para o primeiro grupo, o modelo foi capaz de representar a concentração de microbolhas na ZS de forma adequada, os demais parâmetros no entanto apresentaram comportamento fora do esperado. Nas simulações com superfície da água, os resultados obtidos foram opostos, com melhor representação dos vetores de velocidade na piloto e má representação da concentração de microbolhas. A autora conclui que os modelos obtidos necessitam de estudos complementares, para

que possam ser utilizados de forma confiável para a representação das condições de escoamento interno numa unidade de flotação por ar dissolvido.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. ANÁLISES EXPERIMENTAIS – UNIDADE PILOTO

A unidade piloto de flotação por ar dissolvido dispõe dos processos unitários de coagulação, floculação e flotação, o sistema de abastecimento é composto por quatro reservatórios com capacidade total de 60 m³ e todos os demais equipamentos para dosagem de químicos e agitação. A coagulação é realizada em misturador do tipo tubular em linha, já a floculação ocorre em câmaras anexas ao flotador, tais câmaras possuem configuração geométrica variável, permitindo ajustar as condições de floculação para estudar seus efeitos na flotação. Os processos unitários realizados antes da flotação exercem grande influência na eficiência da clarificação da água através da flotação (REALI, 1991), tais processos e seus efeitos na flotação são temas recorrentes de trabalhos científicos, como exemplos os trabalhos de Sohn et al. (2009) e Pioltine (2013), portanto a existência desses processos na UPFAD é fundamental.

Figura 1 – Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido

A câmara de flotação é dividida em duas partes, a Zona de Contato (ZC) e a Zona de Separação (ZS), no início da primeira existem três bocais injetores, responsáveis por introduzir a vazão de recirculação saturada de ar (Figura 2). A divisão entre as duas zonas presentes no flotador é realizada através de um anteparo. Na entrada da ZC está instalada uma comporta para controlar a área de entrada para o processo de flotação (Figuras 3 e 4).

Figura 2 – Bocais Injetores. Fonte: Meca (2014).

Figuras 3 e 4 – Comporta para controle da velocidade de entrada na ZC. Fonte: Maia (2010).

O fundo da ZS é constituído de uma placa perfurada, para coleta da água clarificada, após a passagem pelo manifold, a água é encaminhada para um vertedor triangular com altura ajustável. A modificação na altura do vertedor possibilita controlar o

nível de água na câmara de flotação e consequentemente a modificação na velocidade de cross-flow.

Parte do efluente encaminhado para o vertedor final é redirecionado à câmara de saturação (Figura 5), responsável pela dissolução de ar na corrente de recirculação através do contato do ar com a água sob alta pressão. O interior da câmara de saturação é composto por recheio plástico, com propósito de melhorar a eficiência da transferência de massa. A recirculação é realizada através de bomba do tipo deslocamento positivo, a vazão de recirculação pode ser controlada através de registro instalado na linha de recalque, medidor de vazão tipo eletromagnético e rotâmetro. O controle do nível na câmara de saturação é realizado automaticamente através de eletrodos e válvulas solenoides, há ainda manômetros, válvula de alívio e demais dispositivos de segurança e de controle operacional da câmara de saturação.

Figura 5 – Câmara de Saturação.

Também fazem parte da UPFAD dois aquecedores a gás, para controle da temperatura da água, um painel elétrico com computador e software de controle dos equipamentos da piloto, uma bomba de recirculação instalada na floculação, que possibilita o funcionamento dos processos de floculação e flotação com vazões distintas e um compressor de ar para fornecimento de ar comprimido para a câmara de saturação.

A UPFAD foi projetada e construída tendo como premissas o total controle das variáveis interferentes ao processo e a possibilidade de se modificar uma extensa quantidade de parâmetros e condições operacionais, permitindo investigar os efeitos dessas diferentes variáveis na clarificação de água para abastecimento através da flotação por ar dissolvido. Soma-se à excelente flexibilidade das condições operacionais uma lista bastante abrangente de trabalhos realizados na UPFAD nos últimos anos, que permite comparar resultados, reproduzir experimentos e compartilhar conhecimentos entre o grupo de pesquisa, motivos que levaram à seleção da UPFAD como plataforma para a execução dos ensaios experimentais propostos. Na Figura 6 está representado o fluxograma de processo da UPFAD, contendo os principais equipamentos e dispositivos de controle e operação.

Figura 6 – Fluxograma da UPFAD. Adaptado: Maia (2010).

4.1.1. PARÂMETROS OPERACIONAIS

A concentração de ar disponível para o processo de flotação pode ser obtida através da Equação (1), por meio da relação entre ar e volume de água. (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 [g de ar/m³ de água];

f : fator de eficiência da câmara de saturação (CS da UPFAD = 0,9);

P : pressão relativa na câmara de saturação [KPa];

P_{atm} : pressão atmosférica [KPa] (São Carlos-SP = 96 KPa);

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

R : razão de recirculação.

Os valores mais comuns para a recirculação, concentração de microbolhas (A/V) e pressão na câmara de saturação encontram-se na faixa de 6 a 12 %, 6 a 10 g de ar/m³ de água e 4 a 6 kgf/cm², respectivamente (EDZWALD, 2010). A quantidade de ar disponível para a flotação implica diretamente em gasto energético, através das bombas de recirculação e pressurização do sistema. A determinação do ponto de ótima eficiência do sistema para a variável A/V é essencial para a otimização do processo. Escher (2011) observou que a FAD, quando operada em taxas de aplicação elevadas se torna bastante sensível às variações na relação A/V , tanto para mais quanto para menos, sendo crucial a realização de ensaios para a obtenção da melhor relação. Para a realização dos ensaios experimentais deste trabalho, adotou-se uma razão A/V de 8 g de ar/m³ de água.

Os bocais de injeção da corrente de recirculação na UPFAD, funcionam por diferencial de pressão. A determinação da pressão na câmara de saturação é função da vazão de recirculação aplicada ao conjunto, portanto foram tomadas medidas em campo

para levantamento da curva de funcionamento da câmara de saturação, os dados obtidos estão apresentados na Figura 7 e Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de operação da Câmara de Saturação para os bocais de injeção

PRESSÃO kgf/cm ²	VAZÃO L/h	RECIRCULAÇÃO %	A/V g Ar/m ³ H ₂ O
0,7	160	3,48	0,42
1,2	240	5,22	1,11
2,1	320	6,96	2,59
3,55	370	8,04	5,07
4,1	390	8,48	6,16
4,75	410	8,91	7,48
5,05	420	9,13	8,14

Figura 7 – Curva de operação da Câmara de Saturação para os bocais de injeção.

Portanto para atingir 8 g de Ar/m³ de água, é necessária uma vazão de recirculação de 9,1 %, totalizando aproximadamente 418,8 L/h. Nessas condições, a pressão exercida na câmara de saturação é de aproximadamente 5,0 kgf/cm².

4.2. LEVANTAMENTO DOS PERFIS DE VELOCIDADES COM SONDA MICRO-ADV

Para levantamento dos perfis de velocidade na UPFAD foram realizados ensaios utilizando sonda do tipo Micro ADV 16 MHz da Sontek. A determinação da velocidade de um fluido pelo método ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) ocorre através da emissão de pares de pulsos de ultrassom, que são refletidos pelas partículas presentes no fluido e capturados de volta pela sonda. O dispositivo calcula a velocidade do fluido a partir do desvio de frequência observado entre os sinais de retorno captados. Este tipo de equipamento apresenta medidas extremamente confiáveis dentro de certas faixas de velocidade, que dependem da frequência do equipamento e podem ser ajustadas pelo usuário (SONTEK, 2001).

Figura 8 – Micro ADV Sontek. Fonte: Sontek (2015)

Um dos fatores limitantes para a utilização desse tipo de sonda é a atenuação do sinal devido à elevada concentração de partículas em suspensão na água. Por outro lado, a completa ausência de partículas também pode prejudicar as leituras de velocidade, levando a medições imprecisas (SONTEK, 2001).

Lundh et al. (2002) realizaram testes extensivos com sonda Micro ADV em unidade piloto de flotação, os autores avaliaram a viabilidade desse tipo de equipamento para a leitura de velocidades em escoamento com manta de microbolhas. Os resultados indicaram que apesar da atenuação e dispersão do sinal pelas microbolhas de ar, a sonda foi capaz de captar os pulsos de retorno, apresentando relação sinal ruído entre 45 e 50 dB e coeficiente de correlação elevados, entre 90 e 98%. Os autores concluíram que o ponto de medição foi alterado para uma região próxima ao transmissor, que as velocidades medidas apresentaram valores menores que os reais, entretanto com direções e sentidos corretos.

Figura 9 - Sonda Micro ADV Sontek acoplada a UPFAD

A sonda Micro ADV utilizada tem faixa de leitura entre 3 e 250 cm/s, e o ponto de leitura situa-se a cinco centímetros do transmissor. O aparato experimental é composto pela sonda, equipamento de coleta e interpretação de dados, computador e software fornecido pelo fabricante. Para fixação da sonda na unidade piloto utilizou-se de suporte metálico em formato de quadro com eixo guia móvel acoplado ao bordo superior da UPFAD. Nas Figura 9 e Figura 10 são apresentados os dispositivos utilizados para a realização dos ensaios.

Figura 10 - Computador acoplado à sonda Micro ADV. Software para coleta de dados fornecido pela Sontek - HorizonADV

Optou-se por valores operacionais e configurações geométricas da unidade piloto que representassem as condições testadas por Escher (2011), Reali e Patrizzi (2007), que também realizaram ensaios com Micro ADV. Os demais parâmetros de operação e variáveis foram fixados em condições semelhantes a outros trabalhos realizados na piloto, a fim de se obter um universo maior de dados referenciais e comparativos. Com relação à malha de pontos utilizada para o levantamento dos perfis de velocidade, conforme recomendações apresentadas nos trabalhos de Pinto (2013) e Escher (2011), considerou-se uma malha com maior número de pontos, visando uma melhor resolução nos valores de velocidade dentro da piloto para efeitos de comparação e validação do modelo computacional. As análises foram realizadas na secção intermediária longitudinal

da piloto ($Y = 0,2 \text{ m}$), com espaçamento de aproximadamente $6,25 \text{ mm}$ na direção do comprimento da zona de separação, totalizando 15 colunas, e $6,4 \text{ mm}$ na altura da ZS, totalizando 29 linhas. Devido a limitações físicas dos dispositivos de coleta e da própria sonda, não foram coletados os dados da linha 29 (fundo da piloto) e também da coluna 15 (parede mais distante da ZC). No total foram coletadas 392 amostras. A configuração geométrica da piloto para os testes com sonda Micro ADV e a malha de dados estão ilustrados na Figura 11.

Figura 11 – Malha de pontos e geometria da UPFAD para os testes com sonda micro ADV

Os parâmetros de operação da unidade piloto e de configuração da sonda Micro ADV para a realização dos ensaios são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros operacionais UPFAD – Ensaio com Micro ADV

Parâmetro	Valor
Vazão de alimentação	4,6 m ³ /h
Vazão de recirculação	9,1% (0,42 m ³ /h)
Concentração de ar (A/V)	8,0 g de Ar/m ³ de água
Pressão na câmara de saturação	5,0 kgf/cm ²
Taxa de aplicação superficial na ZC	176,7 m/h
Taxa de aplicação superficial na ZS	12,5 m/h
Velocidade de entrada na ZC	180,2 m/h
Altura da ZC	2,01 m
Largura da ZC	0,073 m
Velocidade de cross-flow	48,3 m/h
Comprimento da ZS	1,0 m
Profundidade da ZS	1,92 m
Malha de pontos ADV	
Distância entre pontos em X	6,25 mm
Total de pontos em X	14 pontos
Distância entre pontos em Z	6,40 mm
Total de pontos em Z	28 pontos
Plano de medidas em Y	0,2 m (centro piloto)
Frequência Micro ADV	50 Hz
Tempo de leitura	1 min
Temperatura da água	24±0,5°

O tempo e a frequência de coleta de dados, 1 min e 50 Hz, selecionados para a realização dos ensaios foram similares aos valores encontrados na literatura. Escher (2011) utilizou 2 minutos e 50 Hz, Reali e Patrizzi (2007) utilizaram 1 minuto e 50 Hz e Lundh et al. (2002) utilizaram 5 minutos. A sonda Micro ADV estava configurada para a faixa de operação de 30 cm/s, velocidade do som na água de 1531,5 m/s, que correspondem a 24 °C e salinidade de 34,5 ppt. As coletas foram realizadas de modo contínuo, com intervalo de aproximadamente 1 minuto desde o reposicionamento da sonda até o início da coleta, como forma de garantir que a movimentação da sonda na massa líquida não interferisse na velocidade do escoamento.

Os dados obtidos foram tratados conforme recomendação do fabricante, sendo aproveitados os valores com fator de correlação entre as fases maior que 70% e com relação sinal ruído maior que 15 dB, recomendada para amostras coletadas com frequência superior a 25 Hz. Este conjunto de restrições garante a qualidade dos dados e maior confiabilidade dos resultados obtidos (SONTEK, 2001).

4.3. ENSAIOS ESTÍMULO-RESPOSTA

A caracterização do escoamento em reatores e dispositivos submetidos a qualquer tipo de escoamento, como já mencionada anteriormente, é ferramenta importante para o conhecimento e otimização dos processos de desenvolvimento e operação desses dispositivos. Entretanto é extremamente custoso, quando possível, conhecer a real distribuição do campo de velocidades em todos os pontos de um fluido, escoando por um determinado dispositivo. Deste modo, recorre-se a alternativas de custo benefício que combinam facilidade na obtenção dos dados e resultados relevantes. Os ensaios do tipo estímulo resposta são um exemplo de alternativa para se estudar o comportamento dos escoamentos. Neste trabalho, a realização de ensaios de estímulo-resposta torna-se importante também para efeitos de comparação e validação dos dados computacionais, obtidos através das simulações em CFD.

As partículas que compõem o fluido se comportam de maneira distinta entre si, percorrendo caminhos diferentes, por exemplo, o regime turbulento apresenta alta variabilidade espacial do movimento das partículas, pouca ou nenhuma previsibilidade. Em decorrência desse comportamento individualizado, os tempos de permanência das partículas em uma determinada região do escoamento variam, o tempo de residência é denominado como o tempo de percurso entre a entrada e a saída de um volume de controle, reator, ou equipamento qualquer (LEVENSPIEL, 2000).

A variável tempo de residência é fortemente influenciada pelas condições de escoamento, pela geometria da região sob escoamento, pelas próprias condições e características intrínsecas ao fluido, algumas características e padrões podem ser observados ao se analisar as curvas de distribuição de tempo de residência de um reator. Ensaio do tipo estímulo resposta consiste em impor uma perturbação na corrente de

entrada e na medição da resposta a essa perturbação na corrente de saída, o resultado obtido é a distribuição de tempo de residência para o reator, ou a curva de DTR (LEVENSPIEL, 2000). Em geral, as perturbações ocorrem através de pulsos ou degraus, onde é realizada a adição de um traçador, que consiste numa substância com baixas propriedades reativas, que não interfira no escoamento e de fácil medição.

Algumas anomalias e comportamentos típicos dos escoamentos como, por exemplo, escoamento em caminhos preferenciais, curto circuitos hidráulicos, zonas mortas, regiões de estagnação e mistura, podem ser estudados através da análise das curvas de DTR. Muitos trabalhos científicos exploram esse tipo de análise, entre eles, aplicados à FAD: Lundh et al. (2002), Shawwa e Smith (1998), Moruzzi e Reali 2014, Reali e Patrizzi (2007).

A obtenção de curvas de DTR a partir de um experimento é dada a partir da análise da função E , sendo $E(t).dt$ a fração de elementos de fluido que deixam o sistema no intervalo $t + dt$, considerando a soma de todas as frações de material igual a unidade tem-se:

$$\int_0^{\infty} E dt = 1 \quad (2)$$

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (3)$$

Onde:

$C(t)$: função concentração do traçador pelo tempo;

Para complementar a exploração das curvas de DTR e comparar as características do escoamento em reatores diferentes, utiliza-se a função normalizada $E(\theta)$, portanto tem-se:

$$E(\theta) = \bar{\theta}_h \cdot E(t) \quad (4)$$

Onde:

$\bar{\theta}_h$: tempo de detenção hidráulica teórico médio;

θ : razão entre o tempo e o tempo de detenção hidráulica teórico médio;

Nas Equações (5) e (6) são apresentados o tempo de detenção hidráulica médio e a variância, que indica a dispersão da distribuição:

$$\bar{\theta}_h = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt \quad (5)$$

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \bar{\theta}_h)^2 \cdot E(t) dt \quad (6)$$

Onde:

σ^2 : variância (dispersão) da curva;

No estudo de reatores através de ensaios estímulo-resposta é muito comum lançar mão de modelos de ajuste de escoamento não ideal para obter parâmetros comparativos dos reatores e seu desempenho frente a outros sistemas. Alguns modelos de representação dos desvios da idealidade foram aplicados aos ensaios realizados neste trabalho, foram selecionados três modelos que se adequassem aos critérios de simplicidade e realismo físico. Os modelos de dispersão de pequena intensidade $[(D/u.L) < 0,01]$, dispersão de grande intensidade $[(D/u.L) > 0,01]$ e modelo de tanques de mistura em série (N-CSTR) foram selecionados e suas respectivas equações são apresentadas abaixo:

$$E(\theta) = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \left(\frac{D}{u.L}\right)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4 \cdot \left(\frac{D}{u.L}\right)}\right] \quad (7)$$

Onde:

D : coeficiente de dispersão longitudinal;

u : velocidade média de percurso longitudinal;

L : comprimento;

$$E(\theta) = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \left(\frac{D}{u \cdot L}\right)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4 \cdot \theta \cdot \left(\frac{D}{u \cdot L}\right)}\right] \quad (8)$$

Onde:

D : coeficiente de dispersão longitudinal;

u : velocidade média de percurso longitudinal;

L : comprimento;

A Equação (8) aplica-se a condição de vaso aberto.

$$E(\theta) = \frac{N(N \cdot \theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N \cdot \theta} \quad (9)$$

Onde:

N : número de tanque em série;

Para o cálculo da variância, utiliza-se a equação abaixo:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\theta_h} = \int_0^{\infty} (\theta - 1)^2 \cdot E(\theta) \cdot d\theta \quad (10)$$

Onde:

σ^2 : variância (dispersão) da curva;

A geometria da piloto para a realização dos ensaios de estímulo-resposta foi ligeiramente modificada para atender as demandas específicas do ensaio. Um pulso de aproximadamente 10 segundos contendo um litro de uma solução a 200 g/L de cloreto de sódio foi introduzido na última câmara de floculação. Devido à impossibilidade de se inserir o pulso em um ponto mais próximo da entrada da piloto, optou-se por utilizar a última câmara de floculação. A coleta das amostra foi feita na saída de água localizada no fundo do primeiro cone da UPFAD, abaixo da ZS. Na Figura 12 está representada a geometria da piloto para os ensaios de estímulo-resposta.

Figura 12 – Geometria da UPFAD para a realização dos ensaios estímulo-resposta

A partir da inserção do pulso, dados de condutividade foram coletados em uma sonda de condutividade Vernier, acoplada a software de coleta de dados. A sonda possui três faixas de operação que varia de 0 a 200, 0 a 2000 ou 0 a 20000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para a coleta de amostras a faixa de operação mais ampla foi selecionada. As amostras foram coletadas a cada 10 segundos e o tempo total do ensaio foi de uma hora, na Tabela 3 são apresentados os parâmetros operacionais dos ensaios estímulo-resposta.

Foram realizados ensaios em duplicata em duas condições: sem a recirculação e a injeção de ar e com a recirculação e a injeção de ar. A tomada da recirculação foi modificada para montante da piloto, de modo que a saída não foi reinserida na UPFAD.

Tabela 3 – Parâmetros operacionais UPFAD – Ensaios estímulo resposta

Parâmetro	Valor
Vazão de alimentação	4,6 m ³ /h
Vazão de recirculação	9,1% (0,42 m ³ /h)
Concentração de ar (A/V)	8,0 g de Ar/m ³ de água
Taxa de aplicação superficial na ZC	176,7 m/h
Taxa de aplicação superficial na ZC sem recirculação	162,0 m/h
Taxa de aplicação superficial na ZS	12,5 m/h
Taxa de aplicação superficial na ZS sem recirculação	11,5 m/h
Velocidade de entrada na ZC	180,2 m/h
Altura da ZC	2,01 m
Largura da ZC	0,073 m
Velocidade de cross-flow	48,3 m/h
Velocidade de cross-flow sem recirculação	44,2 m/h
Comprimento da ZS	1,0 m
Profundidade da ZS	1,92 m
Traçador	Cloreto de Sódio
Concentração da solução	200 g/L
Volume da solução	1 L
Tipo de estímulo	Pulso
Tempo aproximado do pulso	10 s
Intervalo de coleta	10 s
Tempo total do ensaio	1 h
Temperatura da água	24±0,5°

4.4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS – CFD

As simulações em CFD foram realizadas com o software FLUENT na versão 14.5.7, as geometrias e malhas foram criadas utilizando os subcomponentes Design Modeler e Meshing, que fazem parte do pacote de softwares da ANSYS. Embora o trabalho de Pinto (2013) tenha utilizado o CFX, grande parte dos trabalhos encontrados na literatura que aplicam CFD no estudo da flotação por ar dissolvido, utilizam o FLUENT, dessa forma optou-se por buscar uma nova ferramenta, visando expandir as possibilidades da pesquisa e a comparação com maior quantidade de trabalhos previamente desenvolvidos.

Para a execução das simulações foi utilizado um cluster pertencente ao Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETEF), coordenado pelo professor Paulo Seleglim Jr. da EESC USP, que gentilmente permitiu a utilização deste equipamento. O cluster é composto por 10 nós de processamento, sendo 6 nós com dois processadores Intel Xeon de 6 núcleos funcionando a 2.66 GHz acoplados a 24 Gb de memória RAM. Os demais nós estão equipados com dois processadores Intel Xeon de 8 núcleos funcionando a 2.2 GHz acoplados a 32 Gb de memória RAM. O cluster possui sistema de acesso remoto e software gerenciador de fila, permitindo utilização por diferentes usuários e alocação eficiente dos trabalhos. A licença adquirida pelo NETEF permite a execução de 60 tasks simultâneos para as simulações.

4.4.1. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO

4.4.1.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES

Para descrever o comportamento dos escoamentos, são utilizados equacionamentos matemáticos que relacionam a conservação da massa, quantidade de movimento e energia. A lei da conservação da massa garante que nenhuma matéria será criada ou extinta no volume de controle e a equação da continuidade é a formulação matemática que garante a observância desta lei.

As equações de Navier-Stokes são a representação matemática do princípio da conservação da quantidade de momento aplicado aos fluidos, em que a taxa de variação temporal de momento é igual à resultante das forças que atuam sobre o fluido. Tais equações foram derivadas a partir da segunda lei de Newton aplicada a conservação da quantidade de movimento, são equações diferenciais parciais que relacionam os componentes de tensão com a taxa de deformação. Nas equações (11) e (12) são apresentadas, em notação vetorial, respectivamente a Equação diferencial da continuidade e as Equações de Navier Stokes para fluidos Newtonianos e escoamento compressível:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) + \nabla \cdot \left(-\frac{2\mu}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) + f_i \quad (12)$$

Onde:

ρ : densidade do fluido;

$\mathbf{u}$: vetor velocidade;

p : pressão;

μ : viscosidade dinâmica;

f_i : forças externas agindo sobre o escoamento como por exemplo a gravidade (ρg);

$\lambda = \frac{2}{3}\mu$: hipótese de Stokes para a relação entre o primeiro e o segundo coeficiente de viscosidade;

As equações (11) e (12) formam um sistema de equações diferenciais parciais (EDPs) não lineares acopladas. A presença de termos não lineares nessas EDPs resulta na inexistência de uma solução analítica geral, o conjunto de soluções analíticas possíveis é bastante reduzido, restrito a certos casos particulares. Na grande maioria dos escoamentos, inclusive aqueles de interesse em aplicações industriais e comerciais, recorre-se à solução das equações através de métodos numéricos.

A solução numérica é obtida através da discretização do domínio, na qual o meio contínuo é subdividido em pontos, denominados nós, que compõem uma malha. As EDPs são também discretizadas e aplicadas sobre essa malha de nós, obtendo-se os valores para cada variável das equações em cada nível temporal. Os métodos de discretização mais comuns empregados são: métodos das diferenças finitas, dos elementos finitos, volume finitos e ainda métodos espectrais.

4.4.1.2. TURBULÊNCIA

Para certos tipos de escoamentos, como, por exemplo, os escoamentos laminares, as equações governantes podem ser simplificadas e tornam-se relativamente simples de se resolver, entretanto a maior parte dos escoamentos de interesse, seja na área de tratamento de água, seja em outras áreas da engenharia, envolve escoamentos turbulentos.

A turbulência é um fenômeno de aleatoriedade e dissipação energética, que ocorre em grande parte dos escoamentos observados na natureza. A modelagem da turbulência em CFD pode ser feita por diferentes técnicas, em geral quão mais acurada a solução maior o tempo necessário para a solução, portanto é fundamental analisar a relação de custo benefício e selecionar um modelo capaz de fornecer as informações necessárias com o menor custo computacional possível.

A ocorrência da turbulência nos escoamentos se dá através de sequências de vórtices, que atuam drenando energia do escoamento e transferindo para vórtices de menor escala, em uma verdadeira escada, ou cascata, até a dissipação energética através de tensões viscosas (KUNDU; COHEN, 2002).

Uma vez que o mecanismo de atuação da turbulência nos escoamentos está associado a diferentes escalas espaciais e temporais, a obtenção de uma resposta completa acerca desse fenômeno só é possível através da resolução das equações governantes num meio discretizado que contemple todas as escalas da turbulência. Em outras palavras, as malhas devem ser extremamente refinadas e os passos de tempo reduzidos. O efeito direto dessas imposições é um elevado tempo demandado para a solução, que praticamente inviabiliza a realização desse tipo de modelagem, conhecido por Direct Numerical Simulation (DNS), para grande parte dos problemas de engenharia.

Uma alternativa para a modelação do fenômeno da turbulência é utilização de modelos simplificados, capazes de captar uma parcela dos efeitos da turbulência no escoamento a um custo computacional reduzido. A utilização do conceito de média temporal aplicada as equações de Navier-Stokes, resulta num termo denominado tensor das tensões ou Tensor de Reynolds. O equacionamento desse termo é realizado buscando maximizar a quantidade de escoamentos que podem ser descritos através

deste modelo, essa é uma das técnicas mais utilizadas para a avaliação dos efeitos da turbulência em aplicações de CFD.

Desse tipo de abordagem, conhecido como Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations (RANS), resultam modelos de duas equações bastante difundidos, como os modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, e suas respectivas variações. De forma bastante simplificada, enquanto as simulações do tipo DNS resolvem todas as escalas da turbulência, os modelos baseados nas equações RANS, adotam o efeito médio da turbulência no tempo, uma medida isotrópica da turbulência. Uma terceira possibilidade compreende a situação intermediária, as simulações do tipo Large Eddy Simulation (LES), as quais resolvem a turbulência apenas nas grandes escalas, enquanto aplicam simplificações para as pequenas escalas (WOLS, 2012).

Figura 13- Comparativo entre modelos de turbulência. DNS, LES e RANS. Adaptado de:
www.uttei.enea.it/combustione-sostenibile/img-combustione-sostenibile

No modelo $k - \varepsilon$, o tensor de Reynolds é calculado relacionando o gradiente de velocidade média com o conceito de viscosidade turbulenta. Esta variável é modelada em função de duas equações de transporte, uma para a geração de turbulência (k), ou simplesmente energia cinética turbulenta, e outra para a dissipação da mesma (ε), ou taxa

de dissipação viscosa de energia cinética turbulenta. Nas equações (13) a (15) são apresentadas as formulações para o modelo $k - \varepsilon$ (ANSYS, 2010).

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

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (15)$$

Onde:

C_μ : Constante;

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

ε : Taxa de dissipação viscosa de energia cinética turbulenta [$\text{J}/\text{kg.s}$ ou m^2/s^3];

P_{kb} e $P_{\varepsilon b}$: Efeitos do empuxo na turbulência;

P_k : Turbulência gerada devido às forças viscosas;

As constantes $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k e σ_ε têm seus valores calculados a partir de experimentos para escoamentos turbulentos fundamentais e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores das constantes $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k e σ_ε para o modelo $k - \varepsilon$. Fonte: ANSYS, 2010

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

4.4.1.3. FUNÇÕES DE PAREDE

A modelação da turbulência nas regiões de parede carece atenção especial, uma vez que os efeitos produzidos pela interação entre fluido e paredes do sistema afetam as propriedades do escoamento e os mecanismos de trocas de propriedades do mesmo de forma relevante.

Podem-se dividir os escoamentos em duas regiões bem definidas, as regiões externas, e as regiões próximas a parede. Na primeira, predominam os efeitos turbulentos e convectivos, enquanto na segunda prevalecem os efeitos resultantes da atuação das forças viscosas (ANSYS, 2010). A região próxima a parede é dividida em três regiões, nas quais o perfil de velocidades varia conforme as forças atuantes e a distância à parede, conforme pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Divisões e regiões nas proximidades da parede. Adaptado: ANSYS, 2010.

O adimensional y^+ relaciona a distância da parede com os elementos da malha computacional, conforme Equação (16):

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (16)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (17)$$

Onde:

y : Distância da parede;

u_τ : Velocidade de atrito;

τ_w : Tensão de cisalhamento

ν : Viscosidade cinemática;

Para modelar corretamente a turbulência nas regiões vicinais do sistema é necessário que a malha computacional seja capaz de captar os efeitos oriundos das interações entre a parede e o fluido. Essa condição é satisfeita quando o adimensional y^+ , distância entre o primeiro nó da malha computacional e a parede, possui valor próximo da unidade, que é obtido através de malhas extremamente detalhadas nas regiões de parede, o que nem sempre é possível para problemas de engenharia, devido em muitos casos ao tamanho do sistema e também pelo tempo de processamento e demanda excessiva de recursos computacionais.

A solução para esse impasse é a utilização de um conjunto de regras específicas para as regiões de parede, que seja capaz de representar de forma satisfatória os fenômenos presentes nessa região, a um custo computacional aceitável, ou seja, em condições de malhas computacionais mais esparsas. As funções de parede, como são conhecidas, são um mecanismo bastante utilizado em problemas de engenharia, a exceção para situações nas quais o levantamento das variáveis de interesse é dirigido para as regiões próximas das paredes e seus efeitos nos escoamentos, casos como peças aerodinâmicas e turbo máquinas com peças rotativas por exemplo.

A versão 14.5.7 do Fluent disponibiliza algumas opções para o tratamento da turbulência nas regiões de parede, que dependem do modelo de turbulência escolhido. Bondelind et al. (2010) utilizaram o modelo *realizable* $k - \varepsilon$ acoplado a funções de parede de não equilíbrio, que contabilizam taxas distintas para a produção e dissipação de energia cinética turbulenta nas regiões de parede. Segundo os autores, a seleção do modelo de turbulência e das funções de parede baseou-se no compromisso entre

qualidade dos resultados e tempo computacional. Os autores concluíram que os modelos utilizados nas simulações em CFD puderam representar adequadamente os efeitos da turbulência no escoamento multifásico em uma unidade de flotação por ar dissolvido.

4.4.2. PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Nos itens a seguir são apresentadas as configurações utilizadas para a realização das simulações em CFD. Os ensaios dividiram-se em dois grupos, no primeiro, o foco das simulações foi a representação do perfil de velocidades no interior da zona de separação da piloto, visando a reprodução dos ensaios experimentais com sonda do tipo Micro ADV. No segundo grupo, o objetivo geral foi o levantamento das curvas de distribuição de tempo de residência para a piloto, com vistas à retratar os ensaios com traçador.

Apesar das simulações serem realizadas com geometrias distintas e sob configurações operacionais e computacionais diferentes para cada grupo, o objetivo global das simulações foi de representar o escoamento na UPFAD operando com água e ar, deste modo, sempre que possível buscou-se tratar as simulações com o máximo de semelhança possível dentre as configurações e modelos disponíveis para cada caso.

4.4.2.1. ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO NUMÉRICA

A discretização das equações governantes foi feita com base no método de volumes finitos, o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade é utilizado com o mecanismo de solução baseado na pressão (*pressure based solver*).

A convergência das simulações foi determinada com base nos critérios recomendados pelo guia do usuário do Fluent (ANSYS, 2010). Foram monitorados os residuais normalizados da continuidade, frações das fases, velocidade do escoamento das fases e as variáveis do modelo de turbulência. Admitiu-se a convergência quando os residuais decresceram pelo menos quatro ordens de grandeza, 10^{-4} , ou quando se observou estabilização nos valores das variáveis por período maior que 50 iterações.

Para garantir que os resultados obtidos não fossem dependentes da malha, ou seja, a discretização do meio não pode afetar o resultado final, foram realizadas simulações subsequentes com refinamento de malha a cada passo. Os resultados de cada simulação foram comparados com a simulação de passo anterior, com malha mais grosseira. O processo era interrompido e o resultado da última simulação era dado como resultado final quando a diferença entre simulações subsequentes não apresentou diferenças significativas nos padrões de escoamento observados, no comportamento das frações de ar na ZS e na direção dos vetores de velocidade.

A estabilidade das simulações é um fator a ser considerado quando se modela problemas com maior complexidade, por exemplo aqueles que envolvem escoamentos multifásicos, com interação entre as fases, caso deste trabalho. Por mais que se deseje atingir a convergência com o menor custo computacional possível, em diversas situações é necessário comprometer o tempo gasto com a simulação para se possibilitar a estabilidade e o sucesso da mesma.

Para mitigar o problema da estabilidade, adotaram-se fatores de relaxamento, que determinam a taxa de utilização dos resultados passados na solução atual do problema. Escoamentos multifásicos em geral apresentam maior dificuldade para a convergência e certos modelos impõem instabilidades que devem ser tratadas flexibilizando os fatores de relaxamento (ANSYS, 2010).

4.4.2.2. SIMULAÇÕES GRUPO I

As variáveis e modelos utilizados para as simulações em CFD são apresentadas abaixo em estrutura de tópicos para simplificar a apresentação desses dados.

- Fases – O modelo multifásico *Eulerian* foi escolhido. As fases modeladas foram 1 - água (contínuo) e 2 - ar (disperso). Neste modelo, resolvem-se as equações governantes de forma independente para cada fase, resultando em um modelo bastante robusto, sendo limitado apenas pelos requisitos de memória computacional disponível. Ta et al. (2001) e Lakghomi et al. (2012) utilizaram o modelo multifásico *Mixture model*, e modelaram a superfície do reator como parede porosa à fase gasosa através de uma

função desenvolvida pelos autores (User Defined Function - UDF). Pinto (2013) também aplicou a condição de parede porosa em suas simulações, através de condição de contorno do próprio CFX. A escolha do modelo *Eulerian*, baseou-se na seleção da condição de contorno *degassing*, para a representação da superfície da piloto como uma parede porosa à fase gasosa, abordagem utilizada por diferentes trabalhos encontrados na literatura. Essa condição só é habilitada para o modelo multifásico *Eulerian*.

- Metodologia de estudo de escoamento – A abordagem Euleriana foi utilizada nas simulações propostas do grupo I, as simulações foram realizadas em regime permanente, para otimizar a convergência. A realização de simulações em regime permite a redução do tempo de convergência, por outro lado, impossibilita a representação de assimetrias presentes do escoamento (Bondelind et al., 2010).

- Turbulência – O modelo *Realizable $k - \varepsilon$* foi selecionado devido a sua robustez e baixo custo computacional, sua maior diferença frente ao modelo $k - \varepsilon$ convencional é uma formulação alternativa para a viscosidade turbulenta. Como justificativa para sua seleção, além dos critérios de custo computacional, grande parte dos trabalhos encontrados na literatura utiliza esse modelo. As funções de parede foram estudadas em fase preliminar e os resultados são apresentados no item 5.3.1, a partir deste estudo, avaliou-se o melhor modelo para a utilização nas etapas seguintes

- Microbolhas – Para simplificar a simulação da corrente de recirculação, assume-se que esta adentra a UPFAD com o conteúdo de microbolhas totalmente desenvolvido. Foram realizadas diferentes simulações variando os diâmetros de microbolhas utilizados, também variou-se as interações entre microbolhas. Na Figura 15 é apresentado um esquema com todas as simulações realizadas para cada configuração relativa às microbolhas de ar.

Figura 15 – Esquema das opções selecionadas para a simulação das microbolhas de ar nas simulações do Grupo I. Valores de diâmetro em μm , frações em porcentagem.

Lakghomi et al. (2012) realizaram simulações com a interação entre partículas. Os autores observaram grande influência dessa variável nos resultados finais, indicando que a inclusão dessa opção é recomendável para a obtenção de um modelo fidedigno.

Para incluir as interações entre microbolhas uma distribuição de diâmetros de microbolhas foi aplicada, utilizou-se o módulo *Population Balance*. Os modelo discreto homogêneo e discreto não homogêneo foram selecionados. Os efeitos da coalescência entre bolhas foi descrito pelo modelo de turbulência, enquanto a ruptura de bolhas foi captada pelo modelo de Lou.

Os tamanhos e as respectivas frequências, necessários como dados de entrada do modelo *population balance*, foram extraídos do trabalho de Moruzzi (2005). O autor fez extenso trabalho de levantamento da distribuição de tamanhos de microbolhas em uma unidade piloto de flotação.

- **Malha** – Para a criação da malha computacional, utilizou-se o software Meshing, que faz parte do pacote de softwares da Ansys. A malha foi gerada com refinamento dos nós próximo das paredes, as características da malha utilizada são apresentadas abaixo:

Tabela 5 – Estatísticas da Malha – Simulações do Grupo I

Variável	Valor
Nós	151269
Elementos	553950
Skeuness Mínimo	1,05e-04
Skeuness Máximo	0,8996
Skeuness Média	0,2291
Desvio Padrão	0,1307
Mínimo volume	1,94e-11 m ³
Volume máximo	1,39e-05 m ³
Volume total	0,8395 m ³

- Condições de contorno:
 - Entrada – retângulo de 0,4x0,1 m localizado na base da face anterior da UPFAD, modelada como *velocity inlet*, fração de ar nula;
 - Ar – três círculos de diâmetro de 10 mm espaçados igualmente na base da ZC, modelada como *velocity inlet*, fração de ar de 8% e velocidades iguais para as fases;
 - Superfície – modelada como *degassing*, parede porosa à fase gasosa e sem atrito à fase líquida;
 - Saída – base da ZS retângulo de 1x0,4 m, modelada como *pressure outlet*, com pressão atmosférica na saída. Bondelind et al. (2010) usaram essa condição com pressão atmosférica na saída. Pinto (2013) considerou os resultados com essa condição de contorno de saída como incorretos, entretanto, foram realizados testes com a pressão na saída e verificou-se que não houve variação significativa dos resultados;

As demais configurações operacionais são apresentadas na Tabela 2 no Item

4.4.2.3. SIMULAÇÕES GRUPO II

Existem diferentes abordagens para a determinação da distribuição do tempo de residência em reatores nas simulações em CFD, seja qual for o método, o objetivo sempre é determinar a curva de concentração normalizada, $E(\theta)$, do traçador ao longo do tempo numa região de saída do volume de controle.

Uma das abordagens representa o traçador como um conjunto de partículas, que são inseridas no sistema e rastreadas ao longo do tempo, numa abordagem Lagrangiana. As partículas são modeladas com propriedades tais que permitam seu deslocamento junto do escoamento sem perturbar o mesmo. No Fluent, essa abordagem pode ser realizada através do Modelo multifásico de fase discreta (Discrete Phase Model – DPM).

Outra possibilidade para a determinação da DTR é a reprodução do traçador como um fluido contínuo, e seu acoplamento ao escoamento através de equações de transporte. Dentre essas equações de transporte, o Fluent disponibiliza o modelo de Espécies. Nesta abordagem, o problema é tratado por etapas, primeiramente resolve-se o conjunto de equações para o escoamento propriamente dito, em seguida o traçador é simulado em regime transiente, utilizando a solução previamente obtida como base. A adição do traçador pode ser feita pelos mecanismos de pulso ou de degrau. Para a obtenção da curva de concentração basta monitorar a condição de contorno de saída do sistema.

Uma terceira abordagem bastante utilizada envolve a utilização de equações de transporte para a solução de um escalar definido pelo usuário (User Defined Scalar – UDS). Essa técnica requer ainda a utilização de uma função definida pelo usuário (UDF) para acoplar a solução do escalar criado. A determinação da curva é feita pela mesma técnica do modelo de Espécies.

Foram definidas duas condições para as simulações deste grupo, primeiramente considerou-se apenas o escoamento da água, e um segundo conjunto de condições foi usado considerando o escoamento da água e das microbolhas de ar, divisão semelhante foi utilizada na realização dos ensaios com traçador na UPFAD.

Utilizou-se a abordagem Euleriana para a realização das simulações deste grupo, a modelação do traçador foi realizada como contínuo através do modelo de Espécies

disponível no Fluent. A solução obtida para o escoamento foi determinada em regime permanente, enquanto o traçador foi tratado em regime transiente. O passo de tempo utilizado foi 0,5 segundos, em cada passo de tempo as equações eram resolvidas até a convergência, ou o limite de 20 iterações. O tempo total de escoamento foi fixado em uma hora, para proporcionar o mesmo tempo dos experimentos com traçador realizados na UPFAD. As demais variáveis e modelos utilizados são apresentadas abaixo.

- Turbulência – *Realizable k – ε* com funções de parede padrão.
- Microbolhas – Diâmetro único de 80 μm , sem interação entre microbolhas.
- Malha – Para a criação da malha computacional, utilizou-se o software

Meshing, que faz parte do pacote de softwares da Ansys. A malha foi gerada com nós não estruturados e com refinamento dos nós próximo das paredes, as características da malha utilizada são apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6 - Estatísticas da malha – Simulações do Grupo II

Variável	Valor
Nós	169734
Elementos	616685
Skeuiness Mínimo	9,02E-5
Skeuiness Máximo	0,964
Skeuiness Médio	0,2373
Desvio Padrão	0,1308
Mínimo volume	1,89E-11 m ³
Volume máximo	2,2E-05 m ³
Volume total	1,497 m ³

- Condições de contorno:
 - Entrada – retângulo de 0,5x0,5 m localizado na superfície da última câmara de floculação, modelada como *velocity inlet*, fração de ar nula;
 - Ar – três círculos de diâmetro de 10 mm espaçados igualmente na base da ZC, modelada como *velocity inlet*, fração de ar de 8% e velocidades iguais para as fases;
 - Superfície:
 - Simulação com água apenas – superfície modelada como parede sem atrito e sem rugosidade;

- Simulação com ar e água – superfície modelada como *degassing*, parede porosa à fase gasosa e sem atrito à fase líquida;
- Saída – círculo na base do tronco de pirâmide, localizado na região inferior da ZS, diâmetro de 60 mm, modelada como *pressure outlet*, com pressão atmosférica na saída, conforme justificativa apresentada no item 4.4.2.2.

As demais configurações operacionais são apresentadas na Tabela 3 no Item 4.3.

5. RESULTADOS

5.1. ENSAIOS EXPERIMENTAIS – MICRO ADV

Os dados obtidos experimentalmente com a sonda Micro ADV foram exportados, tratados e em seguida plotados através do software CFD Post da ANSYS. A geometria 01 foi desenvolvida para esse ensaio e utilizada para a plotagem dos dados, a fim de simplificar a comparação entre os resultados experimentais e aqueles obtidos através de CFD. As condições operacionais, assim como todos os detalhes pertinentes acerca da realização desses experimentos, são apresentadas no item 4.2.

Ao todo foram coletados 392 pontos experimentais, que consistem em sequências de dados, cada sequência contém, em média, 3000 registros. Estes registros são compostos pela velocidade, os fatores de correlação, relação sinal ruído, e as respectivas médias para cada variável nas três componentes: X, Y e Z.

O vetor velocidade resultante em cada ponto foi determinado pela média aritmética de cada componente, aplicada aos valores válidos, quando estes fossem superiores 25% dos dados coletados.

Para validação dos dados foram utilizados dois critérios: correlação e qualidade do sinal. A correlação (CORR) é a medida da dissimilaridade entre dois pulsos de retorno consecutivos captados pela sonda micro ADV. O limite utilizado para a validade dos dados quanto à correlação foi de $CORR \geq 70\%$. Ao aplicar essa regra ao conjunto de dados, apenas cinco pontos foram excluídos.

O segundo critério de validade refere-se à qualidade do sinal e é medido através da relação entre a força do mesmo e o ruído. O limite para esse parâmetro varia conforme a taxa de amostragem, onde quão maior a taxa de amostragem maior a relação sinal/ruído (SNR) necessária para que a medição seja confiável. Para amostragens acima de 25 Hz, recomenda-se $SNR \geq 15$ dB. Quando aplicado ao conjunto de dados, este limite excluiu uma quantidade significativa de pontos, ao todo 136 pontos foram desprezados, totalizando aproximadamente 35% dos valores obtidos. O conjunto exclusão, composto pela soma dos pontos excluídos pelos dois parâmetros continha 136 pontos, ou seja, os dados excluídos pelos limites de validade se sobrepuseram.

Atribuiu-se essa alta taxa de exclusão à baixa quantidade de partículas na água utilizada para a realização dos ensaios. Inicialmente foram realizados testes preliminares na UPFAD alimentada apenas com água limpa, sem a injeção de ar. Os gráficos de resposta obtidos nestes ensaios mostraram $SNR=0$ e $CORR=0$, de onde se conclui que a água utilizada não continha partículas suficientes para que a sonda pudesse captar com qualidade os valores de velocidade. Para os ensaios apresentados neste trabalho, utilizou-se de um líquido corante, fornecido pela Sontek, para adicionar partículas à água e permitir a correta operação da sonda. Entretanto, mesmo com a adição de corante, a quantidade de pontos desprezados foi significativa, indicando a necessidade de se utilizar outro método para garantir quantidade mínima de partículas na água.

Outro aspecto que afeta a qualidade dos resultados é a presença das microbolhas de ar, que em concentração elevada podem interferir nas medidas obtidas através da sonda micro ADV. Lundh et al. (2002), em trabalho de caracterização do escoamento em unidade piloto através da utilização de sonda micro ADV, observaram que a presença de microbolhas de ar causa a dispersão dos pulsos emitidos pela sonda, entretanto os resultados obtidos pelos autores indicam que tal efeito não afetou a performance da sonda. Os autores consideraram as medições válidas tanto em magnitude quanto em direção. Moruzzi (2005) também realizou estudo utilizando a sonda Micro ADV em unidade piloto de flotação para determinação das velocidades do escoamento no interior da unidade. Foram avaliadas diferentes condições operacionais e em localizações geométricas distintas. Um dos objetivos do autor era justamente verificar a viabilidade de se utilizar a sonda para a aplicação na medição do campo de velocidades no escoamento

em uma unidade de flotação. O autor concluiu que a sonda pode ser utilizada nesta aplicação sob as condições estudadas.

Durante a realização dos ensaios experimentais, observou-se acúmulo de microbolhas de ar nos terminais da sonda, esse fenômeno caracterizou-se pelo acúmulo gradativo de microbolhas e a consequente redução na qualidade do sinal captado pela sonda, com $SNR=0$ após certos períodos. Como medida preventiva, a cada três medidas a sonda era içada e as microbolhas removidas dos terminais.

Figura 16 – Acúmulo de microbolhas nos terminais da sonda Micro ADV.

As Figuras 17 a 21 apresentam os dados tratados, obtidos nos ensaios com sonda Micro ADV para $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, com relação $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3 \text{Água}$, no plano central da piloto.

Figura 17 – Perfil de velocidades da ZS, coletas no plano central ($Y = 0,2\text{m}$), vista lateral.
 $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$, $P_{SAT} = 5,0 \text{ kgf/cm}^2$

Figura 18 - Perfil de velocidades da ZS, coletas no plano central ($Y = 0,2\text{m}$), vista frontal.
 $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr}/\text{m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$,
 $P_{SAT} = 5,0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$

Figura 19 - Perfil de velocidades da ZS, coletas no plano central ($Y = 0, 2\text{m}$), vista lateral ($Z > 1, 5\text{m}$). $Q_e = 4, 6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12, 5 \text{ m/h}$, $A/V = 8, 0 \text{ gAr}/\text{m}^3 \text{Água}$, $V_{CF} = 48, 3 \text{ m/h}$, $P_{SAT} = 5, 0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$

Figura 20 - Perfil de velocidades da ZS, coletas no plano central ($Y = 0, 2\text{m}$), vista lateral ($Z < 1, 5\text{m}$). $Q_e = 4, 6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12, 5 \text{ m/h}$, $A/V = 8, 0 \text{ gAr}/\text{m}^3 \text{Água}$, $V_{CF} = 48, 3 \text{ m/h}$, $P_{SAT} = 5, 0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$

Figura 21- Perfil de velocidades da ZS, coletas no plano central ($Y = 0,2\text{m}$), vista em perspectiva. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr}/\text{m}^3 \text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$, $P_{SAT} = 5,0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$

A partir dos dados obtidos, verifica-se que o comportamento dos vetores de velocidade na região intermediária da ZS apresenta-se bastante distinto, com vetores apontando em praticamente todas as direções. Nesta mesma região observa-se uma grande quantidade de dados filtrados pelos critérios de qualidade, o que dificulta uma melhor inferência sobre o comportamento do fluxo no local.

Na região superior da ZS, observou-se padrão de escoamento do tipo estratificado, com uma camada superior se deslocando no sentido da parede oposta a ZC e logo abaixo uma corrente de retorno. O padrão observado está restrito a região superior da ZS. A

estratificação do escoamento é tida como vantajosa para a eficiência do processo (Edzwald, 2007; Lakghomi et al., 2012), portanto diferentes autores têm estudado as condições de operação que levam à ocorrência desse tipo de padrão de escoamento nas unidades de flotação. Lundh et al (2002) observaram a formação de escoamento estratificado operando a unidade com TAS inferior a 16 m/h, sendo que o aumento da TAS resultou na quebra da estratificação.

Nas regiões superior e inferior, os vetores de velocidade apresentam comportamento esperado, na região superior predomina o escoamento horizontal em direção à parede oposta a ZC, e na região inferior, excluindo alguns pontos, o comportamento geral dos vetores de velocidade é pistonado com sentido vertical apontando para a saída da UPFAD.

Apesar de as condições operacionais e geométricas serem semelhantes às utilizadas no presente trabalho, Escher (2011) obteve padrões bastante distintos em seus experimentos. Conforme mostra a Figura 22, os perfis observados pela autora não indicam a presença de escoamento estratificado.

Figura 22 - Dados experimentais obtidos por Escher (2011). Perfil de velocidades da ZS, coletas no plano central ($Y = 0, 2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12,3 \text{ m/h}$, $A/V = 7,87 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 47,2 \text{ m/h}$, $P_{SAT} = 4,5 \text{ kgf/cm}^2$. Adaptado de: Escher (2011).

5.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS – ESTÍMULO-RESPOSTA

As curvas de DTR foram obtidas em ensaios de estímulo resposta, através de injeção de pulso com solução concentrada de cloreto de sódio NaCl. Uma sonda de condutividade foi utilizada como instrumento para medição da concentração de saída do traçador inserido. As condições operacionais, assim como todos os detalhes pertinentes acerca da realização desses experimentos, são apresentadas no item 4.3.

Os dados experimentais obtidos foram tratados em planilha eletrônica, foram traçadas as curvas de DTR normalizadas $E\theta$, em função do tempo adimensional θ e para os modelos de reatores não ideais uni-paramétricos selecionados.

O volume total da UPFAD para a configuração dos ensaios com traçador foi levantado por meio de representação em desenho CAD da unidade piloto. A partir do volume calculado e utilizando-se a vazão de operação, determinou-se o tempo de detenção hidráulico teórico, igual a 20,41 min.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados para os parâmetros dos modelos e demais variáveis adquiridas nos ensaios com traçador.

Tabela 7 – Resultados para os parâmetros dos modelos de dispersão de pequena intensidade (DPI), grande intensidade (DGI), N-CSTR em série e demais variáveis. Ensaio 1 – Sem recirculação.

Parâmetro	Valor
$\overline{\theta}_h$	19,28 min
σ^2	124,44 min ²
σ_θ^2	0,33 min ²
Pe_{DPI}	5,98
Pe_{DGI}	8,72
N	2,99

Tabela 8 – Resultados para os parâmetros dos modelos de dispersão de pequena intensidade (DPI), grande intensidade (DGI), N-CSTR em série e demais variáveis. Ensaio 2 – Com recirculação (9,1%).

Parâmetro	Valor
$\overline{\theta}_h$	18,66 min
σ^2	74,39 min ²
σ_θ^2	0,21 min ²
Pe_{DPI}	9,36
Pe_{DGI}	12,38
N	4,67

Para os dois ensaios, o TDH experimental foi menor que o valor teórico, indicando possíveis regiões de estagnação na UPFAD, quando operada nas condições do experimento. Os valores da variância, medida do espalhamento da curva resposta, observadas nos ensaios experimentais foram iguais a 0,33 e 0,21 min², respectivamente para os ensaios sem recirculação e com recirculação, indicando tendência para

escoamento pistonado. De forma bastante semelhante, os resultados para o número de Peclet, adimensional que também representa o grau de dispersão longitudinal do escoamento, mantiveram a mesma tendência, sendo os maiores valores observados no ensaio com recirculação, tanto para o modelo de dispersão de baixa quanto de grande intensidade.

As curvas construídas a partir dos dados experimentais são apresentadas nas Figuras 23 a 30.

Figura 23 – Ensaio 1. Curva $E\theta$ experimental e para os modelos DPI, DGI, N-CSTR em função do tempo adimensional θ . $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 11,5 \text{ m/h}$, $A/V = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 44,2 \text{ m/h}$

Figura 24 - Ensaio 1. Curva $E\theta$ experimental versus modelo DPI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 11,5 \text{ m/h}$, $A/V = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 44,2 \text{ m/h}$

Figura 25 - Ensaio 1. Curva $E\theta$ experimental versus modelo DGI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 11,5 \text{ m/h}$, $A/V = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 44,2 \text{ m/h}$

Figura 26 - Ensaio 1. Curva $E\theta$ experimental versus modelo N-CSTR. $N = 3$, $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 11,5 \text{ m/h}$, $A/V = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 44,2 \text{ m/h}$

Figura 27- Ensaio 2. Curva $E\theta$ experimental e para os modelos DPI, DGI, N-CSTR em função do tempo adimensional θ . $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$

Figura 28- Ensaio 2. Curva $E\Theta$ experimental versus modelo DPI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$

Figura 29- Ensaio 2. Curva $E\Theta$ experimental versus modelo DGI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$

Figura 30 - Ensaio 2. Curva $E\theta$ experimental versus modelo N-CSTR. $N = 3$, $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$

Ao analisar os dados experimentais e os modelos uni-paramétricos ajustados, verifica-se a ausência de zona mortas, tanto para o ensaio somente com água, quanto para o ensaio com ar e água. Quanto aos modelos, verifica-se bom ajuste à reta de regressão para o modelo de reatores de mistura em série (N-CSTR). Os valores de N observados neste trabalho, 2,99 e 4,67 respectivamente para os ensaios sem recirculação e com recirculação, se encontram muito próximos dos valores observados por outros autores, que realizaram testes com traçadores, mesmo que em condições distintas.

Lundh e Jonsson (2005) observaram que para valores de N menores que 10 a 15, o escoamento na unidade apresentava curto circuito, por outro lado, valores maiores que 15 eram condizentes com escoamento estratificado. Segundo os autores, valores de N entre 2 e 4 são esperados em unidades de flotação por ar dissolvido.

Comparando os ensaios entre si, observa-se que a adição da corrente contendo ar saturado, resultou num aumento dos coeficientes observados para todos os modelos, na direção de um escoamento mais pistonado. A presença das microbolhas, apesar de

acrescentar grande mistura na região inicial da ZC e maior energia para o meio, resulta numa maior harmonização do fluxo.

A análise das curvas resultantes dos ensaios estímulo-resposta de forma isolada não permite a identificação precisa da existência de padrões de escoamento como a estratificação. Entretanto, a interpretação desses dados fornece indícios bastante sugestivos acerca da presença desses fenômenos. Portanto, ressalta-se a importância de se considerar também os dados observados nos ensaios experimentais com a sonda Micro ADV quando forem realizadas inferências sobre o comportamento do escoamento na unidade de flotação.

Terashima et al. (2013) observaram boa concordância entre os dados experimentais dos ensaios do tipo estímulo resposta com a eficiência global do processo de flotação, os autores sugerem que tais resultados sejam utilizados juntamente com análises em CFD para a determinação de melhorias estruturais nas unidades visando a otimização do processo e também a sua aplicação para avaliação dos efeitos de mudança de escala.

5.3. SIMULAÇÕES EM CFD

5.3.1. GRUPO I

Inicialmente foram realizadas simulações com as diferentes funções de parede disponíveis no Fluent, com o objetivo de selecionar o melhor conjunto para representação das condições de escoamento na região de parede, uma vez que as informações encontradas nos guias do usuário do software foram insuficientes para determinar o modelo mais adequado para este caso.

Nesta etapa foram realizadas cinco simulações, as condições de contorno e demais parâmetros de configuração foram os mesmos descritos no item 4.4.2.2, o diâmetro de bolha utilizado nesta fase foi fixado em 80 μm . Nas Figuras 31 a 34 são apresentados os valores da fração volumétrica de ar e da velocidade da água, aplicados a malha de pontos proposta nos ensaios experimentais.

Os resultados da fração volumétrica de ar, foram plotados em escala logarítmica, para otimizar a visualização dos dados no interior da ZS, uma vez que a fração volumétrica de ar no reator é bastante reduzida. Os vetores de velocidade são apresentados nos pontos da malha experimental em tamanhos normalizados.

Figura 31 – Simulação funções de parede *Enhanced Wall function*. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Diâmetro bolhas $80 \mu\text{m}$. Resultados no plano central ($Y = 0, 2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr}/\text{m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$.

Figura 32 – Simulação funções de parede *Non Equilibrium Wall function*. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Diâmetro bolhas $80\text{ }\mu\text{m}$. Resultados no plano central ($Y = 0, 2\text{m}$). $Q_e = 4, 6\text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12, 5\text{ m/h}$, $A/V = 8, 0\text{ gAr}/\text{m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48, 3\text{ m/h}$.

Figura 33 – Simulação funções de parede *Scalable Wall function*. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Diâmetro bolhas $80\text{ }\mu\text{m}$. Resultados no plano central ($Y = 0, 2\text{m}$). $Q_e = 4, 6\text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12, 5\text{ m/h}$, $A/V = 8, 0\text{ gAr}/\text{m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48, 3\text{ m/h}$.

Figura 34 – Simulação funções de parede *Standard Wall function*. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Diâmetro bolhas $80 \mu\text{m}$. Resultados no plano central ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$.

Para definir o modelo de funções de parede mais adequado, as simulações foram analisadas sob uma perspectiva física do processo de flotação. O comportamento esperado para as variáveis: fração de ar, que tende a ser maior na região superior da ZS, e vetores de velocidade, que predominantemente apontam para a saída da ZS, foi determinante para a seleção ou rejeição de um modelo.

Os resultados das simulações com função de parede *Non Equilibrium* e *Enhanced*, indicaram a ocorrência de uma corrente relevante em direção ao topo da ZS, que não tem sentido físico, portanto esses modelos foram descartados. O modelo *Scalable Wall function*, apresentou uma corrente intermediária em direção à parede da ZS oposta à ZC, logo abaixo da corrente de retorno, que caracteriza a estratificação. Essa corrente de retorno não é usual na literatura.

Analisando os dados quanto a fração de ar presente no interior da ZS, observa-se que comportamento dos vetores de velocidade está intimamente relacionado com a presença de microbolhas de ar na ZS, como pode ser observado na Figura 32. Observa-

se uma manta bastante extensa no modelo *Non Equilibrium*, enquanto nos demais esta é restrita à região superior da ZS.

Figura 35 – Simulação funções de parede modelo SST. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Diâmetro bolhas 80 μm . Resultados no plano central ($Y = 0,2\text{m}$).

$$Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}, TAS_{ZS} = 12,5 \text{ m/h}, A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}, V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}.$$

Para enriquecer a análise e comparar o máximo número de modelos possível, uma nova simulação foi executada com o modelo de turbulência $k - \omega - SST$, a vantagem desse modelo é a combinação das formulações entre os modelos $k - \omega$ e $k - \varepsilon$, para alcançar os melhores resultados tanto nas proximidades da parede quanto nas regiões mais afastadas (ANSONI, 2015). Analisando a Figura 35 observa-se vetores de velocidade pouco ordenados na região inferior da ZS, resultado semelhante a condição observada no modelo de turbulência $k - \varepsilon$ com funções de parede padrão. Uma das desvantagens na utilização deste modelo é o custo computacional elevado, fator pelo qual esse modelo não foi utilizado nas demais simulações.

A escolha entre os dois modelos restantes, *Scalable Wall function* e *Standard Wall function*, torna-se em última instância uma questão de preferência do pesquisador,

também devem ser levados em consideração o custo computacional de cada alternativa. Portanto, optou-se pelas funções de parede padrão do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ para realização das simulações dos Grupos I e II deste trabalho.

Uma vez definidas as condições de tratamento de parede, conduziu-se as simulações apresentadas na Figura 15, com diferentes tamanhos de micro bolhas, com o propósito de representar o escoamento de ar e água observado na ZS da UPFAD. Nas Figuras 36 a 40 são apresentados os resultados das simulações I a V do Grupo I, com diâmetro único de microbolhas.

Figura 36 – Simulação I – Grupo I – Diâmetro bolhas 40 µm. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Modelo multifásico *Eulerian*. Modelo de turbulência $k - \varepsilon$, *Standard Wall Functions*. Resultados no plano central ($Y = 0, 2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr}/\text{m}^3\text{Água}$,

Figura 37 – Simulação II – Grupo I – Diâmetro bolhas 60 μm . (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Modelo multifásico *Eulerian*. Modelo de turbulência $k - \varepsilon$, *Standard Wall Functions*. Resultados no plano central ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr}/\text{m}^3\text{Água}$,

Figura 38 – Simulação III – Grupo I – Diâmetro bolhas 80 μm . (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Modelo multifásico *Eulerian*. Modelo de turbulência $k - \varepsilon$, *Standard Wall Functions*. Resultados no plano central ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr}/\text{m}^3\text{Água}$,

Figura 39 – Simulação IV – Grupo I – Diâmetro bolhas 100 μm . (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Modelo multifásico *Eulerian*. Modelo de turbulência $k - \varepsilon$, *Standard Wall Functions*. Resultados no plano central ($Y = 0, 2\text{m}$). $Q_e = 4, 6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12, 5 \text{ m/h}$, $A/V = 8, 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$,

Figura 40 – Simulação V – Grupo I – Diâmetro bolhas 120 μm . (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Modelo multifásico *Eulerian*. Modelo de turbulência $k - \varepsilon$, *Standard Wall Functions*. Resultados no plano central ($Y = 0, 2\text{m}$). $Q_e = 4, 6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 12, 5 \text{ m/h}$, $A/V = 8, 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$,

Mantendo-se as demais condições operacionais e configurações do modelo é possível observar os efeitos da alteração da variável diâmetro de microbolhas no escoamento. Nos diâmetros menores, 40, 60 e 80 μm , observou-se uma manta de microbolhas alongada enquanto nos diâmetros maiores, 100 e 120 μm , esta restringiu-se a zona superior da ZS. Esse efeito é esperado e também foi observado por Bondelind et al. (2010), o aumento no diâmetro das microbolhas modificou o escoamento no interior da unidade, sendo observados vetores de velocidade mais comportados nas simulações III, IV e V. Quanto ao padrão de escoamento, os vetores de velocidade da água resultantes indicam a presença de escoamento estratificado na ZS, mais pronunciado nas simulações IV e V, entretanto, também presente nas simulações com diâmetros de bolhas menores, I, II e III, na porção superior da ZS.

Esses resultados concordam com aqueles obtidos nos ensaios experimentais com sonda micro ADV, em que a estratificação observada esteve restrita à região superior da ZS, em camada estreita, porém evidente. Admitindo que o diâmetro de microbolhas, ou a faixa de diâmetros predominante no interior da piloto seja próxima de 30 μm , conforme observado por Moruzzi (2005), os resultados das simulações I e II concordam com os resultados obtidos nos ensaios com a sonda Micro ADV.

Pinto (2013) obteve resultados similares quanto à distribuição de vetores de velocidade em função do diâmetro de microbolhas, nas simulações com diâmetros menores, houve maior desarranjo nos vetores de velocidade, enquanto nas simulações com maiores diâmetros as linhas de fluxo se mostraram mais organizadas em direção à saída.

Apesar de apresentarem resultados consoantes com aqueles observados nas medições físicas dos vetores de velocidade, os resultados devem ser tomados com precaução, simplificações foram feitas para a realização das simulações, talvez a mais importante delas está na distribuição única de diâmetros de microbolhas. Lakghomi et al. (2012) observaram que a inclusão das interações entre microbolhas levou a um aumento na eficiência do processo obtida através das simulações. Os autores ressaltaram a importância de se considerar a interação entre microbolhas na realização de experimentos em CFD, especialmente quando são extraídas as funções desempenho da unidade.

As simulação VI e VII foram realizadas considerando diferentes tamanhos de microbolhas ainda sem interação entre as mesmas. Os resultados destas simulações são apresentados nas Figuras 41 e 42. Observa-se que a inclusão de diferentes diâmetros de microbolhas modificou o comportamento do escoamento, reforçando a correlação existente entre microbolhas e o padrão de escoamento na FAD.

A principal diferença entre as simulações VI e VII está no modelo utilizado para a determinação dos diâmetros de microbolhas. No primeiro caso utilizou-se o modelo Discreto Homogêneo que aplica as condições de escoamento à todas as classes de diâmetros de microbolhas igualmente, enquanto no segundo caso é utilizado o modelo Discreto Não Homogêneo. Neste modelo as classes de diâmetros de microbolhas podem ser divididas em mais de uma fase secundária, como resultado, estas estão sujeitas a diferentes condições de escoamento, resultando em possível separação entre diâmetros maiores e menores. Para a utilização do modelo não homogêneo de distribuição de diâmetros de microbolhas, dividiu-se a fase secundária em duas fase, a primeira com os menores diâmetros e a segunda com diâmetros maiores.

Figura 41 – Simulação VI – Grupo I – Diâmetros de microbolhas 20, 40, 60, 80 e 100 μm , Population Balance Discreto Homogêneo. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Modelo multifásico *Eulerian*. Modelo de turbulência $k - \varepsilon$, *Standard Wall Functions*. Resultados no plano central ($Y = 0,2\text{m}$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr}/\text{m}^3\text{Água}$,

Figura 42 – Simulação VII – Grupo I – Diâmetros de microbolhas - Fase secundária (1): 10, 20, 30, 40 e 50 µm. Fase secundária (2): 60, 70, 80, 90 e 100 µm. Population Balance Discreto Não Homogêneo. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Modelo multifásico Eulerian. Modelo de turbulência $k - \varepsilon$, *Standard Wall Functions*. Resultados no plano central ($Y = 0, 2m$). $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/h$, $TAS_{zS} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$,

Os resultados das simulações VI e VII foram bastante semelhantes, apesar da troca de modelo de distribuição. Quanto aos perfis de velocidade observados, novamente a estratificação é observada, juntamente com um segundo fluxo de retorno, uma segunda camada de estratificação. Essa condição, apesar de possível é certamente improvável e não são frequentes os relatos de observação de um fenômeno desta natureza. A fração volumétrica de ar apresentou resultados incomuns, com praticamente a mesma concentração de ar em toda a ZS.

As últimas duas simulações do Grupo I contemplam os efeitos de coalescência e ruptura entre microbolhas. Assim como nas simulações VI e VII foram testados os modelos Homogêneo e Não Homogêneo, os resultados são apresentados nas Figuras 43 e 44.

Figura 43 – Simulação VIII – Grupo I – Diâmetros de microbolhas 20, 40, 60, 80 e 100 μm . Population Balance Discreto Homogêneo. Interação entre microbolhas ativada. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Modelo multifásico *Eulerian*. Modelo de turbulência $k - \varepsilon$, *Standard Wall Functions*. Resultados no plano central ($Y = 0, 2m$).

$$Q_e = 4,6\ m^3/h, TAS_{zs} = 12,5\ m/h, \quad A/V = 8,0\ gAr/m^3\ \acute{A}gua,$$

Figura 44 – Simulação IX – Grupo I – Diâmetros de microbolhas - Fase secundária (1): 10, 20, 30, 40 e 50 μm . Fase secundária (2): 60, 70, 80, 90 e 100 μm . Population Balance Discreto Não Homogêneo. Interação entre microbolhas ativada. (A) Fração volumétrica de ar, (B) vetores de velocidade da água. Modelo multifásico *Eulerian*. Modelo de turbulência $k - \varepsilon$, *Standard Wall Functions*. Resultados no plano central ($Y = 0, 2m$). $Q_e = 4,6\ m^3/h, TAS_{zs} = 12,5\ m/h, A/V = 8,0\ gAr/m^3\ \acute{A}gua,$

Os resultados obtidos com a modelação das interações entre microbolhas não apresentaram mudança significativa quando comparados às simulações VI e VII, que não contabilizam as interações. Os perfis de velocidade da simulação IX apresentaram comportamento diferenciado do observado nas demais simulações, entretanto não é possível inferir sobre a validade desses dados, uma vez que a fração volumétrica de ar, por exemplo, apresenta concentração praticamente constante ao longo de toda a extensão da ZS, reforçando a teoria de que estes resultados são inconsistentes.

De maneira geral os resultados obtidos foram condizentes com o esperado, em termos de forças e aspectos físicos que regem o conjunto, e com base na análise de outros trabalhos. A comparação com os resultados experimentais é o ponto chave para a determinação da correlação entre esses dados, entretanto é importante ressaltar que as medidas tomadas experimentalmente podem incutir erros, que por sua vez podem levar a conclusões equivocadas quando se compara os dados computacionais com esses resultados.

Outro aspecto relevante para a análise dos resultados é a seleção dos mecanismos de solução das simulações. Como exemplo da relevância das configurações do modelo no resultado final das simulações, pode-se citar a seleção do regime permanente para o cálculo da solução, essa abordagem pode mascarar efeitos transientes que ocorrem naturalmente no sistema.

5.3.2. GRUPO II

Os resultados obtidos nas simulações deste grupo foram tratados sob as mesmas condições dos dados experimentais, sendo avaliados os modelos de grande e pequena dispersão, além do modelo N-CSTR.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados para os parâmetros dos modelos e demais variáveis adquiridas nas simulações do grupo II.

Tabela 9 – Resultados para os parâmetros dos modelos de dispersão de pequena intensidade (DPI), grande intensidade (DGI), N-CSTR em série e demais variáveis. Simulação A – Escoamento monofásico – Água.

Parâmetro	Valor
$\overline{\theta}_h$	14,24 min
σ^2	122,64 min ²
σ_θ^2	0,60 min ²
Pe_{DPI}	3,30
Pe_{DGI}	5,65
N	1,65

Tabela 10 – Resultados para os parâmetros dos modelos de dispersão de pequena intensidade (DPI), grande intensidade (DGI), N-CSTR em série e demais variáveis. Simulação B – Escoamento bifásico – Ar-Água.

Parâmetro	Valor
$\overline{\theta}_h$	18,90 min
σ^2	48,99 min ²
σ_θ^2	0,13 min ²
Pe_{DPI}	14,57
Pe_{DGI}	18,44
N	7,28

O tempo de detenção hidráulico obtido nas simulações computacionais foi menor que o valor teórico de 19,53 min para os dois casos. Comparando-se os TDHs entre as simulações e os ensaios experimentais, observa-se que para a condição com escoamento monofásico, Ensaio experimental I e Simulação A, o resultado computacional foi cerca de 5 minutos menor, enquanto que para a condição de escoamento bifásico, Ensaio experimental II e Simulação B, a diferença foi de 0,24 min, ou 14 segundos apenas. Como a única diferença entre as simulações A e B é a presença de ar na última, conclui-se que a adição de ar ao escoamento alterou significativamente o padrão de escoamento no sistema. Não foram testadas configurações adicionais para a simulação A, afim de se encontrar um conjunto de parâmetros que melhor representasse esse escoamento quanto ao TDH observado. As Figuras 45 a 52 apresentam os resultados obtidos nas simulações A e B do grupo II.

Figura 45- Simulação A. Curva $E\theta$ e curvas dos modelos DPI, DGI, N-CSTR em função do tempo adimensional θ . $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 11,5 \text{ m/h}$, $A/V = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 44,2 \text{ m/h}$.

Figura 46 – Simulação A. Curva $E\theta$ versus modelo DPI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 11,5 \text{ m/h}$, $A/V = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 44,2 \text{ m/h}$

Figura 47 – Simulação A. Curva $E\theta$ versus modelo DGI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 11,5 \text{ m/h}$, $A/V = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 44,2 \text{ m/h}$

Figura 48 – Simulação A. Curva $E\theta$ versus modelo N-CSTR. $N = 2$, $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{ZS} = 11,5 \text{ m/h}$, $A/V = 0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 44,2 \text{ m/h}$

Figura 49 - Simulação B. Curva $E\theta$ e curvas dos modelos DPI, DGI, N-CSTR em função do tempo adimensional θ . $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$

Figura 50 - Simulação B. Curva $E\theta$ versus modelo DPI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$

Figura 51 - Simulação B. Curva $E\theta$ versus modelo DGI. $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$

Figura 52 - Simulação B. Curva $E\theta$ versus modelo N-CSTR. $N = 7$, $Q_e = 4,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $TAS_{zs} = 12,5 \text{ m/h}$, $A/V = 8,0 \text{ gAr/m}^3\text{Água}$, $V_{CF} = 48,3 \text{ m/h}$

Comparando os resultados computacionais quanto as variáveis ajustadas aos modelos uni-paramétricos selecionados, observa-se melhor ajuste aos modelos para os resultados da simulação B. Assim como nos ensaios experimentais, o modelo de melhor ajuste à reta de regressão foi o modelo de reatores de mistura em série (N-CSTR). Os valores de N observados nas simulações foram de 1,65 e 7,28, muito próximos dos valores obtidos nos ensaios experimentais de 2,99 e 4,67 respectivamente para escoamento monofásico e bifásico.

Os resultados computacionais para as curvas de distribuição de tempo de residência também indicaram tendência ao escoamento do tipo pistonado na piloto com ausência de zonas mortas, como pode ser observado nas curvas $E\theta$.

6. CONCLUSÕES

As simulações em CFD apresentaram resultados condizentes com o esperado, quando comparadas com os ensaios experimentais. Os perfis de velocidade levantados na UPFAD mostraram a presença de escoamento estratificado na região superior da ZS, tal fenômeno também foi observado nas simulações em CFD.

Também foi possível observar a presença da manta de microbolhas de ar na ZS, os efeitos da variação da extensão da manta e da concentração de ar na mesma devido à mudança no diâmetro das microbolhas também foi observado. Para diâmetros de bolhas maiores que 80 μm houve predominância de micro bolhas na região superior da ZS simulada, enquanto que, para diâmetros menores houve alongamento da manta até a região inferior da piloto. Esses resultados são condizentes com os observados por Bondelind et al. (2010).

O modelo se mostrou sensível ao diâmetro das microbolhas e a presença de ar ao longo da ZS, sendo observadas diferenças significativas no padrão de escoamento atribuídas a modificações dessas variáveis. Entretanto, as simulações realizadas com distribuição de diâmetros de microbolhas e interações entre microbolhas: coalescência e ruptura, apresentaram fração ar praticamente constante ao longo da altura da ZS. Os resultados dessas simulações foram considerados inconsistentes.

Os parâmetros das simulações que apresentaram os melhores resultados, quando comparados com os dados experimentais foram obtidos nas simulações I, II, III e IV do Grupo I, com modelo multifásico *Eulerian*, modelo de turbulência *Realizable k - ϵ* e funções de parede padrão, diâmetros de microbolhas de: 40, 60, 80 e 100 μm respectivamente para as simulações I, II, III e IV, sem interações entre microbolhas.

As curvas de distribuição de tempo de residência da UPFAD indicaram escoamento do tipo pistonado, nenhuma anomalia de escoamento significativa foi observada. As simulações em CFD para a determinação das curvas de DTR apresentaram resultados distintos, enquanto a simulação do escoamento da água se mostrou pouco eficiente em representar as condições observadas na UPFAD, a simulação com ar e água apresentou boa correlação com os dados experimentais, o TDH simulado foi apenas 14 segundos, 1% maior, que o observado nos ensaios experimentais.

A utilização do software Fluent, permitiu a comparação dos resultados com número mais abrangente de trabalhos, entretanto para se extrair todo o potencial do software é necessário, em muitos casos, trabalhar com funções customizadas, exigindo conhecimento em programação. A possibilidade de inclusão de funções customizadas é uma vantagem ao software, entretanto os conhecimentos em programação impostos ao usuário nesses casos contrapõem a maior vantagem da utilização de softwares comerciais, a facilidade de uso.

De forma geral, as simulações em CFD foram capazes de representar as condições do escoamento entre ar e água na unidade piloto de flotação estudada. Respeitadas as limitações dos modelos e as simplificações adotadas, entende-se que os resultados obtidos podem ser utilizados, ainda que com bastante cautela, para um melhor entendimento acerca dos fenômenos observados na piloto.

Entretanto, ressalta-se que para a determinação de parâmetros de eficiência ou estudos mais aprofundados do processo, torna-se necessário um modelo ainda mais completo, que considere ainda a presença das partículas e consiga reproduzir o fenômeno de adesão das microbolhas aos flocos e a sua provável remoção do sistema.

7. RECOMENDAÇÕES

As recomendações para a realização de trabalhos futuros nessa linha de pesquisa:

- Complementação do modelo através da adição da fase sólida;
- Acoplamento com função desempenho, através dos equacionamentos propostos por Reali (1991) ou Edzwald (2007);
- Utilização de parâmetros quantitativos para reforçar a análise dos dados;
- Realização de simulações complementares com distribuição de diâmetros de microbolhas e interação entre as mesmas;
- Realização de simulações também em regime transiente;
- Utilização do modelo multifásico *Mixture* e condição de contorno de superfície como parede porosa através da inclusão de código customizado;
- Utilização de softwares de código aberto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON JR., J. D. Computational Fluid Dynamics: The basics with applications. McGraw-Hill, New York, 1995.

ANSONI, J. L. Metodologia para projeto de biorreatores industriais via otimização multi objetivo com base em parâmetros de desempenho calculados por técnicas de CFD. Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 203p, 2015.

ANSYS, Inc., ANSYS FLUENT Theory guide. Release 13.0, ANSYS, Canonsburg, PA, 2010.

BONDELIND M., SASIC S., PETTERSON T., KARAPANTSIOS T., KOSTOGLOU M., BERGDAHL L. Setting up a numerical model of a DAF tank: Turbulence, geometry and bubble size. J. of Environmental Engineering-ASCE, 136(12), 1424-1434, 2010.

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.

BRASIL, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Pesquisa nacional de saneamento básico 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

BRASIL, Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2013. Brasília: SNSA/MCIDADES, 181p., 2014.

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

EDZWALD, J. K. The science and engineering of dissolved air flotation for drinking water treatment. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seul, Korea. Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, Seoul, 2007.

EDZWALD, J. K.; WALSH, J. P. Dissolved Air Flotation: Laboratory and Pilot Plant Investigations. USA: AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 107p., 1992.

EDZWALD, J.K., HAARHOFF, J., Dissolved Air Flotation for Water Clarification AWWA and Mcgraw-Hill, New York, pp. 384, 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.

FOX, R. W., PRITCHARD, P. J., MCDONALD. A.T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. LTC, 7ª ed. 2010.

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.

GYURÉK, L. L., FINCH, G. R. Modeling Water Treatment Chemical Disinfection Kinetics. ASCE Journal of Environmental Engineering, 124(9): 783-793, 1998.

- KIURU, H. J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). *Water Science and Technology*. Great Britain, v. 43, n. 8, p. 1-7, 2001.
- KUNDU, P.K., COHEN, I.M., *Fluid Mechanics*. Academic Press Inc., 2ed., 730p, 2002.
- 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*, 2012.
- LAKGHOMI, B., LAWRYSHYN, Y., HOFMANN, R. A model of particle removal in a dissolved air flotation tank: importance of stratified flow and bubble size. *Water Research*. 68:1:262-272., 2015.
- LEVENSPIEL, O. *Engenharia das Reações Químicas*. 3ª edição. Edgard Blucher, São Paulo, 2000.
- LUNDH, M., JONSSON, L. Residence time distribution characterization of the flow structure in dissolved air flotation. *J. Environ. Eng. (ASCE)*.; 131:93–101, 2005.
- LUNDH, M., JONSSON, L., DAHLQUIST, J. The Influence of Contact Zone Configuration on the Flow Structure in a Dissolved Air Flotation Pilot Plant. *Water Research*, v. 36, p. 1585-1595, 2002.
- 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.

- MECA, K. S. Influência do tempo de detenção hidráulica e do gradiente médio de velocidade na zona de contato no desempenho de unidade piloto de flotação por ar dissolvido aplicado à clarificação de água para abastecimento. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 111p., 2014.
- METCALF & EDDY, Inc. Wastewater engineering: treatment and reuse. McGraw-Hill, 4^a ed., 2003.
- 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, 2010.
- MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Estudo Hidrodinâmico Quali-Quantitativo de uma unidade de flotação por ar dissolvido (FAD): O efeito do dispositivo de coleta de água flotada. Revista DAE , v. 1, p. 52-69, 2014.
- PAGNOCCHESCHI, B. A Política Nacional de Recursos Hídricos no cenário da integração das políticas públicas. In: MUÑOZ, H.R. (org). Interfaces da gestão de recursos Hídricos - Desafios da Lei de Águas de 1997. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/Secretaria dos Recursos Hídricos, 2000.
- 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.

PIOLTINE, A. Influência do tamanho de partículas floculadas na eficiência da pré-clarificação de águas para abastecimento por flotação. Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

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.

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

RAUEN, W. B., LIN, B., FALCONER, R. A., TEIXEIRA, E. C. CFD and experimental model studies for water disinfection tanks with low Reynolds number flows. Chemical Engineering Journal, 137, 550–560, 2008.

REALI, M. A. P. Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 186p., 1984.

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 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, Seoul, Korea, 2007.
- SCHOFIELD, T. Dissolved air flotation in drinking water production. *Water Science and Technology*. v.43, n.8, p.9-18, 2001.
- SHAWWA, A. R., SMITH, D.W. Hydrodynamic characterization in dissolved air flotation contact zone. *Water Science and Technology* 38 (6), 245–252, 1998.
- SIVA KUMAR, M., PHILOMINATHAN, P. Bringing out Fluids Experiments from Laboratory to In Silico – A Journey of Hundred Years. *American Journal of Computational Mathematics* 1, no. 4 (2011): 271-280.
- SOHN, B.Y., KWON, S. B., MIN, J. H., KANG, J. W. Characteristics of Pretreatment Parameters and Bubble Size Influencing DAF Efficiency, *Separation Science and Technology*, 44: 9, 1941 — 1953. 2009.
- SONTEK. Micro ADV Acoustic Doppler Velocimeter. Disponível em: <http://www.sontek.com/productsdetail.php?16-MHz-MicroADV-3>. Acesso em 01/08/2015.
- SONTEK (2001) ADVField Technical Manual. SonTek Technical Documentation, September 2001.
- 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 (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 85p. 2012.

- TA, C. T., BECKLEY, J., EADES, A. A multiphase CFD model of DAF process. *Water Science and Technology*, 48(8), 153-157, 2001.
- TERASHIMA, M., IWASAKI, M., YASUI, H., GOEL, R., SUTO, K., INOUE, C. Tracer experiment and RTD analysis of DAF separator with bar-type baffles. *Water Science Technology*, 67(5): 942-7, 2013.
- VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. [Essex]: Longman Scientific & Technical, 1995.
- WHO, Guidelines for Drinking-Water Quality. 3a. edição, Volume 1, World Health Organization, Geneva. 513p, 2004.
- WOLS, B. A. Computational fluid dynamics in drinking water treatment. London: IWA, 2011.
- ZABEL, T. The Advantages of Dissolved Air Flotation for Water Treatment. *Journal of American Water Works Association*, p. 42-46. 1985.
- ZHANG, J. An Integrated Design Approach for Improving Drinking Water Ozone Disinfection Treatment Based on Computational Fluid Dynamics, Ph.D, University of Waterloo, pp. 54-63, 2006.