UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

RODRIGO BRAGA MORUZZI

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE
PARTÍCULAS E DO BINÔMIO VELOCIDADE/TEMPO DE DETENÇÃO
NA ZONA DE REAÇÃO NO DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO COM
UTILIZAÇÃO DE SONDA ULTRASÔNICA E TÉCNICA DE ANÁLISE
POR IMAGEM**

São Carlos
2005

RODRIGO BRAGA MORUZZI

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE
PARTÍCULAS E DO BINÔMIO VELOCIDADE/TEMPO DE DETENÇÃO
NA ZONA DE REAÇÃO NO DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO COM
UTILIZAÇÃO DE SONDA ULTRASÔNICA E TÉCNICA DE ANÁLISE
POR IMAGEM**

Tese apresentada ao Departamento de
Hidráulica e Saneamento da Escola de
Engenharia de São Carlos, Universidade de
São Paulo, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Civil – Área de
Concentração: Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

São Carlos
2005

DEDICATÓRIA

*para meus avós Rodolpho e Diana; Antonio (in memoriam) e Zoé
meus pais Aluísio e Regina
minhas irmãs Andrea e Bruna.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Marco Antonio Penalva Reali pelo apoio integral, pela confiança depositada e pela indispensável orientação.

Ao Professor Woodrow Nelson Lopes Roma por ceder, irrestritamente, o equipamento utilizado para mapeamento do perfil de velocidade.

Aos professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP especialmente aos professores, Harry Edmar Schulz pelas infindáveis conversas acerca do comportamento do fluxo e suas características e Eduardo Cleto Pires pelo auxílio na introdução dos conceitos fundamentais que envolvem o fascinante mundo da fotografia.

Aos funcionários do Grupo de Óptica do Instituto de Física de São Carlos. Ao Professor Milton Ferreira de Souza do Instituto de Física de São Carlos por ceder a câmera digital utilizada nos ensaios preliminares de aquisição de imagem.

A todos os funcionários do SHS e especialmente ao Wagner Lamon pelas incontáveis horas de serviço prestado, ao Francisco Bergamin (Chicão) pelo auxílio na montagem das instalações e André Canale Garcia pelo pronto socorro aos pcs.

A FAPESP pela bolsa de doutorado concedida.

Quanto mais nos especializamos mais percebemos a nossa fragilidade em compreender as coisas e suas relações. Nesse universo imenso de perguntas que envolve o campo da pesquisa científica, a percepção mais clara que tive foi a de que nada somos quando estamos sozinhos. Para alcançar nossos sonhos temos que ver com outros olhos e pensar com outras cabeças. Dedico cada linha desta tese a todas as pessoas que me acompanharam durante este trajeto e tornaram possível a concretização deste sonho.

A todos os colegas do SHS pelas conversas e momentos de descontração durante os vários cafés que tomamos juntos.

Aos amigos, sem os quais a vida não teria sentido, especialmente aos das “antigas” mas, sempre presentes: Ulisses Sypryani (Lissão), Carlos Magno Vidal (Cacá), Hélio Rodrigues dos Santos (Heliones), Jeanette Beber de Souza (Janes), Valmir Moraes (King), Marcelo de Julio (Foca), Gustavo Silva do Prado, Renata Moretti, Leila Jorge Patrizzi, André Oliveira (Teta), Charles Valadão (Pal). Aos menos presentes mas sempre lembrados: Fabiano Vanelli Martin s(Biano), Fabio Borguesan Rodrigues (Burga), Tatiane Engelbrecht (Tati), Daniel Ohnuma, Maira Magnani, Mayra Matenhauer. E aos mais recentes e não menos importantes, Érica Pugliesi, Anderson Viana, Fernando Passig (Fernandão) e Pedro Ivo de Almeida Santos (pelas baladas na República Tcheca), Julieta Bramorski (Juju), Carolina Buso Dornfeld (Carol) e Andrea (Dea).

A Andrea Moruzzi minha irmã, minha amiga, minha companheira.

A Alessandra Cátia Alamino pela dedicação, companheirismo e amor que me fez feliz durante os dez anos mais importantes da minha vida e que fez de mim muito do que sou.

A Vanessa Vaz, meu ponto de equilíbrio, pelo brilho dos seus olhos, por me fazer recomeçar e pela sua serenidade, compreensão e amor.

“Quando nada acontece, há um milagre que não estamos vendo.”

J. Guimarães Rosa

Nada é mais perigoso que a certeza de ter razão. É preciso idolatrar a dúvida.

T. Todorov

RESUMO

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

O desempenho de uma unidade de flotação por ar dissolvido (FAD) em escala piloto, tratando água destinada ao abastecimento contendo 50uC e 05uT, foi investigada sob o ponto de vista das partículas presentes (micro-bolhas e flocos) e da hidrodinâmica. A análise centrou-se na zona de reação da unidade de FAD onde foi desenvolvido o modelo matemático proposto por Reali (1991). A determinação das partículas foi realizada por método que emprega a análise de imagem. A condição hidrodinâmica foi avaliada por meio de ensaios de estímulo e resposta, combinada com a análise tridimensional do escoamento feita através de mapeamento utilizando equipamento que emprega ultra-som (sonda micro-ADV). Para a consecução do trabalho foram desenvolvidos dois métodos. Um para aquisição, tratamento e obtenção da distribuição de tamanho de micro-bolhas e flocos utilizando a análise de imagem digital em instalação com escoamento contínuo, sem a extração de amostras. Outro, envolvendo o desenvolvimento de programa (*VelDigital3D*) para tratamento dos dados da sonda utilizada. Inicialmente, foram realizados os ensaios de validação da utilização da sonda micro-ADV em água contendo micro-bolhas de ar e os ensaios de mapeamento da unidade utilizando a referida sonda conjugada ao programa *VelDigital3D*. Posteriormente, foram investigados alguns possíveis agentes na aglutinação das micro-bolhas após a despressurização tais como: i) as condições de mistura expressas em termos da Taxa de Aplicação Superficial (TAS) e tempo de detenção na zona de reação ($T_{d,z,r}$), ii) razão de recirculação (p), iii) a variação de pH e, iv) a dosagem de coagulante (Al^{+3}). Finalmente, a sensibilidade do modelo matemático proposto por Reali (1991) para a zona de reação de unidades de FAD convencional foi verificada com base nos parâmetros de projeto: tempo de detenção da zona de reação ($T_{d,z,r}$) e taxa de aplicação superficial na zona de clarificação TAS_{ap} . (downflow); e com base nos parâmetros operacionais: distribuição de tamanho de partículas (micro-bolhas e flocos) e razão de recirculação (p). As principais conclusões foram: i) a sonda micro-ADV pode ser utilizada para obtenção do perfil de velocidade em águas contendo micro-bolhas de ar, nas vazões investigadas; ii) o escoamento no interior da zona de reação apresentou um padrão bem definido de recirculação ao longo da altura, confirmando os resultados obtidos com os ensaios estímulo e resposta; iii) a variação do diâmetro médio das micro-bolhas foi muito pequena (de 20 a 30 μ m), embora tenha havido ressalvas e iv) o modelo proposto por Reali (1991) foi sensível aos parâmetros investigados e responde coerentemente com o desempenho da unidade piloto de FAD.

Palavras-chave: Flotação por ar dissolvido (FAD), Zona de reação, Micro-bolhas, Flocos, Análise digital de imagem, Hidrodinâmica, Perfil tridimensional de velocidade.

ABSTRACT

MORUZZI, R. B. (2005). Analysis of Particles Distribution Size and the pair Velocity/Hydraulic Residence Time in the Reaction Zone Performance of a Flotation unit by using ultrasonic probe and image analysis. A Thesis submitted to the Engineering School of São Carlos of the University of São Paulo. São Carlos – São Paulo – Brazil: EESC – USP. 240p.

This work investigated the performance of a Dissolved Air Flotation (DAF) pilot plant, used to treat drinking water containing 05Tu and 50Cu. The particles (micro-bubbles and flocs) and hydraulic characteristics were taken into account. The focus was given in the reaction zone as hypothesized by Reali's mathematic model (REALI, 1991). An image analyses was used to assess particles distribution sizes. The hydraulics of the DAF tank was assessed by using a pulse stimulus-response test combined with the three-dimensional flow analyses carried-out with equipment that applied ultra sound (microADV). Therefore, two methods were developed; one for the acquisition, treatment and also to obtain the micro-bubbles and flocs sizes distribution, without the need of extracting samples and another, involved the development of a software (*VelDigital3D*) in order to treat the microADV data. Initially, the application of the microADV in the DAF process was evaluated. After, the data collection was made and the result was treated by using the *VelDigital3D* software. Sequentially, the effects of some agents for micro-bubbles coalescence after the releasing point were investigated: i) mixture conditions in terms of hydraulic loading rate (HLR) and detention time (DT); ii) recirculation rate (p); iii) pH variation and, iv) coagulant dosage (Al^{+3}). Finally, the mathematic model behavior proposed by Reali (1991) was investigated by varying some parameters in the design, such as: detention time in the reaction zone (DTr.z) and hydraulic loading rate in the clarification zone HLRc.z (dowflow); and by varying some operational parameters, such as: particles sizes distribution (micro-bubbles and flocs) and recirculation rate (p). The main conclusions were: i) the microADV probe can be used to obtain the velocity flow profile in water containing micro-bubbles; ii) the flow within the reaction zone showed a well defined pattern of recirculation throughout the height of the unit, confirming the obtained results by using the stimulus-response tests; iii) the variation of micro-bubbles medium size was low (from 20 to 30 μ m) but some points regarding this aspect were discussed and, iv) the behavior of the mathematical model proposed by Reali (1991) showed a significant adjustment to the experimental data proving that it can be applied to analyzed design parameters.

Key-words: Dissolved air flotation (DAF), Reaction zone, Micro-bubbles, Flocs, Digital image analyses, Hydraulics, Three-dimensional velocity profile.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	Esquema simplificado das unidades de flotação de 1º Geração.	4
Figura 1.2	Esquema simplificado das unidades de flotação de 2º Geração.	5
Figura 1.3	Esquema simplificado das unidades de flotação denominadas Flotofiltro.	9
Figura 1.4	Esquema simplificado das unidades de flotação de 3º geração.	11
Figura 2.1	Esquema ilustrativo dos materiais e equipamentos que compõem a unidade e os parâmetros monitorados e/ou controlados por sistema de aquisição de dados.	20
Figura 2.2	Tela principal do software de aquisição para as instalações piloto de FAD do grupo de pesquisa coordenado por Profº Dr. Marco A. P. Reali.	21
Figura 2.3	Desenho esquemático da montagem experimental em escoamento contínuo, denominada unidade separadora de micro-bolhas (USMB) utilizada para aquisição das imagens e determinação da DTMB nas diferentes condições investigadas.	23
Figura 2.3.1	Desenho esquemático ilustrativo dos procedimentos para aquisição das imagens na unidade separadora de micro-bolhas (USMB) utilizada para aquisição das imagens e determinação da DTMB nas diferentes condições investigadas.	25
Figura 2.4	Tela de apresentação do programa <i>Image Tool versão 3.0</i> .	27
Figura 2.5	Tela de abertura do arquivo imagem para calibração.	29
Figura 2.6	Etapas de binarização através da definição do limiar de binarização manual no histograma da imagem.	29
Figura 2.7	Imagem binarizada da foto de referência.	30
Figura 2.8	Escolha do comprimento de referência com base em um tamanho conhecido.	30
Figura 2.9	Janela visual correspondente ao tamanho fornecido em diferentes unidades.	31
Figura 2.10	Salvando a calibração efetuada.	31
Figura 2.11	Nomeando a calibração efetuada.	32
Figura 2.12	Transformação <i>Color-to-Grayscale</i> .	33
Figura 2.13	Binarização através da ferramenta <i>Threshold</i> modo <i>Manual</i> .	34
Figura 2.14	Escolha do limiar de binarização através do histograma de intensidade.	34
Figura 2.15	Aparecimento dos objetos na imagem de acordo com o limiar de binarização adotado.	35
Figura 2.16	Imagem binária e separação dos objetos através da utilização da ferramenta <i>Watershed</i> no menu <i>Processing</i> .	35
Figura 2.17	Etapas de detecção dos objetos ou segmentação.	36
Figura 2.18	Janela de visualização contendo opções do <i>Find Objects</i> .	36
Figura 2.19	Janela confirmando o número de objetos detectados.	37
Figura 2.20	Delimitação da área de cada objeto e o número correspondente a contagem efetuada.	37
Figura 2.21	Etapas de classificação dos objetos efetuada após identificação dos objetos.	38
Figura 2.22	Escolha da propriedade a ser classificada.	38
Figura 2.23	Escolha dos valores correspondentes a cada classe.	39
Figura 2.24	Resultado obtido para cada classificação com separação com cores de acordo com a faixa pertencente.	40
Figura 2.25	Exemplo hipotético da área dos pixel(s) em função do tamanho médio das micro-bolhas.	43
Figura 2.26	Esquema do suporte para MicroADV e foto com vista geral e detalhe da leitura do ângulo de coleta de dados.	47
Figura 2.27	Exemplo de resultado utilizando <i>ADVCheck</i> .	48
Figura 2.28	<i>ADVCheck</i> detectando problemas na recepção dos sinais. Outros exemplos podem ser verificados no manual do fabricante.	49
Figura 2.29	Telas iniciais do software de aquisição de dados da sonda ADV. a) tela principal contendo dados de entrada. b) tela de confirmação dos dados e localização das bordas ou fundo.	50
Figura 2.30	Tela de aquisição de dados da sonda ADV.	51

Figura 2.31	Pasta na qual os dados deve ser copiados para que possam ser tratados no <i>software Veldigital3D</i> .	54
Figura 2.32	Janela principal do <i>Matlab 6.0</i> onde deverá ser digitado o comando de execução do <i>software Veldigital3D</i> .	54
Figura 2.33	Janela primária do programa <i>Veldigital3D</i> onde deverá ser executado o primeiro passo para cálculo e leitura dos vetores resultantes.	55
Figura 2.34	Detalhe do tratamento estatístico dado aos pontos coletados.	55
Figura 2.35	Seqüência para carregar pontos do arquivo de extensão <i>vel</i> .	56
Figura 2.36	Pontos carregados, calculados a partir da definição dada na Figura 2.34.	57
Figura 2.37	Inversão do sentido do eixo de acordo com definição de origem e aquisição dos dados adotada para a sonda.	57
Figura 2.38	Janela primária do programa <i>Veldigital3D</i> onde deverá ser executado o segundo passo necessário para definição do esquema onde serão plotados os vetores.	58
Figura 2.39	Janelas visuais para definição do desenho no qual os vetores resultantes são plotados. a) definição do esquema. b) definição da origem.	58
Figura 2.40	Janela primária do programa <i>Veldigital3D</i> onde deve ser executado o terceiro passo necessário para a visualização dos vetores resultantes.	59
Figura 2.41	Tela para visualização dos vetores resultantes em 3D.	59
Figura 2.42	Opção para configuração dos gráficos e esquemas resultantes do tratamento dos dados da sonda microADV.	60
Figura 2.43	Exemplos de possíveis cortes efetuados na malha de vetores. a) corte no plano xz; b) corte no plano yz.	61
Figura 2.44	Exemplo de visualização gerada a partir do esquema 3D.	62
Figura 2.45	Escolha da opção <i>zoom</i> no menu de ferramentas para aproximar a visualização da malha de vetores resultantes.	63
Figura 2.46	Definição do tipo de gráfico de interesse.	63
Figura 2.47	Exemplo de gráfico de superfície para o plano xy.	64
Figura 2.48	Exemplo de figura gerada a partir do gráfico de superfície.	64
Figura 2.49	Exemplo de gráfico de contorno gerado a partir dos vetores resultantes.	65
Figura 2.50	Exemplo de sobreposição dos gráficos de contorno e de vetores resultantes para um determinado plano de interesse.	65
Figura 3.1	Foto e esquema ilustrativo da ponta da haste de amostragem do Micro ADV. Fonte: Adaptado de SonTek (2004).	68
Figura 3.2	a) Esquema ilustrativo dos ensaios realizados visando verificar a interferência das micro-bolhas nas medidas de velocidade, b) Fotografia do topo da haste da sonda submersa em meio à micro-bolhas dispersas na massa líquida, responsável pela aparência acinzentada da água.	71
Figura 3.3	Algumas das imagens adquiridas visando estimativa do comprimento da macro-escala de turbulência (<i>L</i>).	72
Figura 3.4	Gráfico geral com o conjunto de resultados obtidos por condição investigada. a) sem micro-bolhas; b) 125mg _{ar} /min; c) 250mg _{ar} /min e, d) 500mg _{ar} /min. Os valores plotados referem-se as velocidades obtidas pelo ADV no eixo x.	73
Figura 3.5	Resultados dos ensaios do pendulo: a) sem micro-bolhas; b) 125mg _{ar} /min; c) 250mg _{ar} /min e, d) 500mg _{ar} /min. Os valores plotados referem-se às velocidades obtidas pelo ADV no eixo x.	74
Figura 3.6	Valores médios dos picos de velocidade para diferentes vazões de ar nos ensaios que envolveram a verificação do ADV para obtenção de medidas no tanque de FAD. As vazões de 1, 2 e 4 lmin de água saturada correspondem a 0; 125; 250 e 500 mg ar/min, respectivamente.	75
Figura 3.7	Resultados dos picos de velocidade na direção do eixo x plotados com intervalo de confiança de 95% em relação a média de cada medida.	76
Figura 3.8	Croquis da vista lateral da Unidade Separadora de Micro-bolhas (USMB) com equipamento microADV utilizado para determinar os vetores velocidade.	78
Figura 3.9	Resultados dos ensaios de estímulo e resposta com a adição de NaCl no modo pulso. a) curva experimental e ajuste aos modelos de tanques em série, grande e pequena dispersão. b) resultados experimentais e do modelo de tanques em série. Contem tabela com resultados de variância, número de tanques e dispersão.	79
Figura 3.10	Visão geral dos resultados obtidos através do mapeamento dos vetores	

	velocidade no interior da USMB.	80
Figura 3.11	Detalhe da malha de vetores obtida com o microADV e tratada com o programa <i>Veldigital3D</i> .	80
Figura 3.12	Corte longitudinal da malha de vetores na posição $y=5$.	81
Figura 3.13	Corte longitudinal da malha de vetores na posição $y=7$.	82
Figura 3.14	Corte longitudinal da malha de vetores na posição $y=13$.	82
Figura 3.15	Corte longitudinal da malha de vetores na posição $y=19$.	83
Figura 3.16	Corte transversal correspondente a posição $z=-5,84\text{cm}$.	84
Figura 3.17	Corte transversal correspondente a posição $z=-0,04\text{cm}$.	85
Figura 3.18	Corte transversal correspondente a posição $z= 5,75\text{cm}$.	86
Figura 3.19	Corte transversal correspondente a posição $z= 9,61\text{cm}$.	87
Figura 3.20	Corte transversal correspondente a posição $z= 19,27\text{cm}$.	88
Figura 3.21	Ilustração da possibilidade de obtenção de parâmetros de turbulência com os dados de velocidade nas direções x, y e z , obtidos em malha virtual utilizando a sonda MicroADV conjugada ao programa <i>VelDigital3D</i> .	90
Figura 4.1	Exemplo de imagem adquirida digitalmente após binarização utilizando <i>freeware Image Tool 3.0</i> . $P_{\text{sat}} 450 \pm 10\text{KPa}$, $T_{22}^{\circ}\text{C}$.	99
Figura 4.2	Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 60m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,10 \times 10^{-2}\text{h}$ e relação entre o valor de $E\theta$ do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de $E\theta$ experimental. a) $p=0$; $Pe=6,25$; $TDH=2,65 \times 10^{-2}\text{h}$; b) $p=0,05$; $Pe=5,55$; $TDH=2,63 \times 10^{-2}\text{h}$ e c) $p=0,10$; $Pe=7,69$; $TDH=2,63 \times 10^{-2}\text{h}$. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.	103
Figura 4.3	Curvas normalizadas contendo pontos experimentais (dispersão) e ajuste com base no modelo de tanques em série (linhas contínuas) referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 60m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,10 \times 10^{-2}\text{h}$. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.	104
Figura 4.4	Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 40m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,70 \times 10^{-2}\text{h}$ e relação entre o valor de $E\theta$ do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de $E\theta$ experimental. a) $p=0$; $Pe=5,55$; $TDH=3,90 \times 10^{-2}\text{h}$; b) $p=0,05$; $Pe=6,25$; $TDH=4,06 \times 10^{-2}\text{h}$ e c) $p=0,10$; $Pe=7,14$; $TDH=4,56 \times 10^{-2}\text{h}$. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.	105
Figura 4.5	Curvas normalizadas contendo pontos experimentais (dispersão) e ajuste com base no modelo de tanques em série (linhas contínuas) referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 40m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,70 \times 10^{-2}\text{h}$. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.	106
Figura 4.6	Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 25m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $2,50 \times 10^{-2}\text{h}$ e relação entre o valor de $E\theta$ do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de $E\theta$ experimental. a) $p=0$; $Pe=6,67$; $TDH=6,21 \times 10^{-2}\text{h}$; b) $p=0,05$; $Pe=5,0$; $TDH=6,30 \times 10^{-2}\text{h}$ e c) $p=0,10$; $Pe=5,26$; $TDH=6,31 \times 10^{-2}\text{h}$. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.	107
Figura 4.7	Curvas normalizadas contendo pontos experimentais (dispersão) e ajuste com base no modelo de tanques em série (linhas contínuas) referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 25m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $2,50 \times 10^{-2}\text{h}$. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.	108
Figura 4.8	Frequência relativa(a) e acumulada(b) em número de micro-bolhas. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente às variações das condições de mistura (expressas em termos de $TAS_{\text{zona reação}}$ e Td). Fixos: $P_{\text{sat}} 450 \pm 10\text{KPa}$, $\theta 22 \pm 1^{\circ}\text{C}$, D_{dp} registros de agulha $1/8''$, ζ não medida	109

	porém mantida inalterada.	
Figura 4.9	Frequência relativa em volume. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente às variações das condições de mistura (expressas em termos de $TAS_{zona\ reação}$ e T_d). Fixos: P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", p, pH, ζ não medida porém mantida inalterada.	110
Figura 4.10	Diâmetro médio das micro-bolhas analisadas. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente às variações das condições de mistura (expressas em termos de $TAS_{zona\ reação}$ e T_d). Fixos: P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", p, pH, ζ não medida porém mantida inalterada.	110
Figura 4.11	Frequência relativa (a) e acumulada(b) em número de micro-bolhas. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a pequenas variações de pH. Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", p, ζ não medida porém mantida inalterada.	111
Figura 4.12	Frequência relativa em volume. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a pequenas variações de pH. Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", p, ζ não medida porém mantida inalterada.	112
Figura 4.13	Diâmetro médio das micro-bolhas analisadas. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente às variações das condições de mistura (expressas em termos de $TAS_{zona\ reação}$ e T_d). Fixos: P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", p, ζ não medida porém mantida inalterada.	112
Figura 4.14	Frequência relativa(a) e acumulada(b) em número de micro-bolhas. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da razão de recirculação (p) Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, ζ não medida porém mantida inalterada.	113
Figura 4.15	Frequência relativa em volume. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da razão de recirculação (p). Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, ζ não medida porém mantida inalterada.	114
Figura 4.16	Diâmetro médio das micro-bolhas analisadas. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da razão de recirculação (p) Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, ζ não medida porém mantida inalterada.	114
Figura 4.17	Frequência relativa(a) e acumulada(b) em número de micro-bolhas. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da dosagem de Al^{+3} Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, p, ζ não medida porém mantida inalterada .	115
Figura 4.18	Frequência relativa em volume. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da razão de recirculação (p). Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, ζ não medida porém mantida inalterada.	115
Figura 4.19	Diâmetro médio das micro-bolhas analisadas. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da razão de recirculação (p) Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, θ 22±1°C, D_{dp}	

	registros de agulha 1/8", pH, ζ não medida porém mantida inalterada.	116
Figura 4.20	Diâmetros médios e de Sauter ($D_{3,2}$) obtidos por método que emprega análise de imagem para todas as condições investigadas na USMB.	117
Figura 4.21	Efeito do tamanho das micro-bolhas no gradiente de velocidade e na velocidade ascensional. Cálculos realizados para T25°C utilizando a equação de Stokes segundo validação apresentada por Reali (1991) para micro-bolhas de até 140 μ m.	121
Figura 4.22	Variação da distancia entre micro-bolhas por classe de tamanho. Cálculos realizados com os dados experimentais médios por faixa (Etapa 1) utilizando a equação deduzida por Reali (1991). Esferas em proporção. Sem escala.	122
Figura 4.23	Distribuição de micro-bolhas para diferentes classes de tamanho. Cálculos realizados com os dados experimentais médios por faixa (Etapa 1) utilizando a equação deduzida por Reali (1991). Esquema em proporção. Sem escala.	122
Figura 5.1	Mecanismos de transporte das particulas segundo a teoria do coletor simples (SCE) (A: gravidade; B: interceptação; C: movimento Browniano). Fonte: Malley e Edzwald (1991b)	128
Figura 5.2	Colisão entre bolhas e flocos com colisão em campo turbulento. Fonte: Fukushi, Tambo e Matsui (1995).	129
Figura 5.3	Eficiência da teoria do coletor simples vs tamanho de partícula segundo mecanismos de difusão bowmaniana (η_D), interceptação (η_I) e sedimentação (η_s). Considerando densidade de partículas de 1,01 g/cm ³ e diâmetro das micro-bolhas de 40 μ m. Fonte: Adaptado de Edzwald (1995).	133
Figura 5.4	Esquema ilustrativo do método utilizado para a aquisição das imagens utilizadas para determinação das partículas e para o estudo da condição hidrodinâmica durante a operação da unidade piloto de FAD.	138
Figura 5.5	Exemplo de imagem dos flocos adquirida digitalmente após binarização utilizando <i>freeware Image Tool 3.0</i> . Coagulação com 2,25 mgAl ⁺³ /L. Condições floculação Gf 90s-1 e Tf 34 minutos. Água bruta contendo 50uC e 05 uT, T22°C.	139
Figura 5.6	Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta nos tanques de floculação da piloto de FAD. a) curvas experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTD); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI) ; d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Resultado da média de 3 ensaios com Gf de 50s ⁻¹ e tempo de detenção experimental de 34 minutos. Ensaio realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.	142
Figura 5.7	Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD operando no modo convencional para TASz.c de 125m ³ /m ² dia; p 0,10; Tdteórico na zona de reação de 40seg. a) curvas experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTD); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI) ; d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Tempo de detenção experimental de 14 minutos. Ensaio realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.	143
Figura 5.8	Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD operando no modo convencional para TASz.c de 200m ³ /m ² dia; p 0,05; Tdteórico na zona de reação de 90seg. a) curvas experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTD); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI) ; d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Tempo de detenção experimental de 11,8 minutos. Ensaio realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.	144
Figura 5.9	Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD operando no modo convencional para TASz.c de 200m ³ /m ² dia; p 0,10; Tdteórico na zona de reação de 90seg. a) curvas	

experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTD); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI) ; d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Tempo de detenção experimental de 12,32 minutos. Ensaio realizado com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.

145

Figura 5.10

Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD operando no modo convencional para TASz.c de 200m³/m²dia; p 0,10; Tdteórico na zona de reação de 40seg. a) curvas experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTD); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI) ; d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Tempo de detenção experimental de 11,73 minutos. Ensaio realizado com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.

146

Figura 5.11

Resultados dos ensaios de tratabilidade com a instalação piloto de FAD operando no modo convencional na TASz.c de 200m³/m²dia para diferentes valores de recirculação (p) e tempos de detenção na zona de reação. a) valores absolutos e fração remanescente de cor aparente. b) valores absolutos e fração remanescente de turbidez. Fixos: Condições de mistura rápida 'in-line'; Gf 50s⁻¹ e Tf 34 min.; P_{sat} 470±20KPa; 2,25 mgAl³⁺/l , θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8". Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg CaCO₃ L⁻¹) 24; Dureza (mg CaCO₃ L⁻¹) 15; Condutividade (μS/cm) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78;;Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060.

148

Figura 5.12

Resultados dos ensaios de tratabilidade com a instalação piloto de FAD operando no modo convencional na TASz.c de 200m³/m²dia para diferentes valores de recirculação (p) e tempos de detenção na zona de reação. a) valores absolutos e fração remanescente de cor aparente. b) valores absolutos e fração remanescente de turbidez. Fixos: Condições de mistura rápida 'in-line'; Gf 90s⁻¹ e Tf 34 min.; P_{sat} 470±20KPa; 2,25 mgAl³⁺/l , θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8". Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg CaCO₃ L⁻¹) 24; Dureza (mg CaCO₃ L⁻¹) 15; Condutividade (μS/cm) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78;;Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060.

149

Figura 5.13

Resultados dos ensaios de tratabilidade com a instalação piloto de FAD operando no modo convencional na TASz.c de 125m³/m²dia para diferentes valores de recirculação (p) e tempos de detenção na zona de reação. a) valores absolutos e fração remanescente de cor aparente. b) valores absolutos e fração remanescente de turbidez. Fixos: Condições de mistura rápida 'in-line'; Gf 90s⁻¹ e Tf 34 min.; P_{sat} 470±20KPa; 2,25 mgAl³⁺/l , θ 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8". Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg CaCO₃ L⁻¹) 24; Dureza (mg CaCO₃ L⁻¹) 15; Condutividade (μS/cm) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78;;Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060.

149

- Figura 5.14** Resultados dos ensaios de obtenção de distribuição de tamanho de flocos (DTP) expressos em termos de frequência relativa em número e volume para o afluente. Resultados dos ensaios de DTP obtidos através do contador de partículas marcam Hiac/Royco modelo 8000A conjugado a amostrador de mesma marca modelo 3000A e sensor líquido Micro-count-05. Características da água sintética analisada: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) 24; Dureza (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) 15; Condutividade ($\mu\text{S/cm}$) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78;; Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060. 152
- Figura 5.15** Resultados dos ensaios de obtenção de distribuição de tamanho de flocos (DTP) expressos em termos de: a) frequência relativa e acumulada em relação ao número de flocos para 21256 flocos analisados. b)) frequência relativa em número e volume. Resultados dos ensaios de DTP obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na última câmara de floculação da unidade piloto de FAD. Fixos: Condições de mistura rápida '*in-line*'; Gf 90s^{-1} e Tf 34 min.; 2,25 $\text{mgAl}^{+3}/\text{l}$, $\theta 22\pm 1^\circ\text{C}$. Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) 24; Dureza (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) 15; Condutividade ($\mu\text{S/cm}$) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78;; Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060. 154
- Figura 5.16** Resultados dos ensaios de obtenção de distribuição de tamanho de flocos (DTP) expressos em termos de: a) frequência relativa e acumulada em relação ao número de flocos para 10295 flocos analisados. b) frequência relativa em número e volume. Resultados dos ensaios de DTP obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na última câmara de floculação da unidade piloto de FAD. Fixos: Condições de mistura rápida '*in-line*'; Gf 50s^{-1} e Tf 34 min.; 2,25 $\text{mgAl}^{+3}/\text{l}$, $\theta 22\pm 1^\circ\text{C}$. Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) 24; Dureza (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) 15; Condutividade ($\mu\text{S/cm}$) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78;; Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060. 155
- Figura 5.17** Apresentação dos dados no gráfico Box-Plot. 156
- Figura 5.18** Diâmetro médio dos flocos analisados. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos. Análise estatística efetuada com os 31551 flocos analisados. Resultados dos ensaios de DTP obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na última câmara de floculação frente às variações do gradiente médio de velocidade de floculação. Fixos: Al^{+3} 2,25mg/l e Tf de 34 minutos. 157
- Figura 5.19** Planilha eletrônica utilizada para os cálculos dos parâmetros do modelo frente as variação operacionais na instalação piloto de FAD Diâmetro médio dos flocos analisados. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos. Análise estatística efetuada com os 31551 flocos analisados. Resultados dos ensaios de DTP obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na última câmara de floculação frente às variações do gradiente médio de velocidade de floculação. Fixos: Al^{+3} 2,25mg/l e Tf de 34 minutos. 159

Figura 5.20	Valores de gradiente médio de velocidade devido às micro-bolhas de ar para diferentes valores de razão de recirculação (p). Cálculos efetuados de acordo com equação (14) proposta por Reali (1991b) para diâmetros de micro-bolhas uniformes (5-120 μ m) nas diferentes faixas obtidas nos ensaios apresentados no Capítulo 4 desta tese.	162
Figura 5.21	Frequência relativa em volume. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações de: a) das condições de mistura (expressas em termos de TAS _{zona reação} e Td; b) da razão de recirculação (p). Fixos: TAS _{zona reação} e Td, P _{sat} 450 $\pm$ 10KPa, θ 22 $\pm$ 1°C, D _{dp} registros de agulha 1/8", pH, ζ não medida porém mantida inalterada.	163
Figura 5.22	Valores de gradientes médios de velocidade na zona de reação considerando-se a Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB) e o efeito da água sem micro-bolhas, de acordo com: a) as condições de mistura (expressas em termos de TAS _{zona reação} e Td; b) da razão de recirculação (p). Fixos: TAS _{zona reação} e Td, P _{sat} 450 $\pm$ 10KPa, θ 22 $\pm$ 1°C, D _{dp} registros de agulha 1/8", pH.	164
Figura 5.23	Relação entre os efeitos da turbulência (α_1 e α_2) e os efeitos da velocidade relativa (α_3) na colisão entre micro-bolhas e flocos frente as variação do diâmetro das micro-bolhas. Cálculos efetuados com base no modelo de choques proposto por Reali (1991b) e nos resultados obtidos experimentalmente. Fixos: gradiente médio de velocidade na zona de reação Gm8s ⁻¹ ; taxa de aplicação superficial na zona de clarificação TAS _{z.c} 200m/dia; diâmetros médios dos flocos DF de 274 e 306 μ m.	165
Figura 5.24	Relação entre os efeitos da turbulência (α_1 e α_2) e os efeitos da velocidade relativa (α_3) na colisão entre micro-bolhas e flocos frente as variação do gradiente médio de velocidade (gm). Cálculos efetuados com base no modelo de choques proposto por Reali (1991b) e nos resultados obtidos experimentalmente. Fixos: diâmetro médio de floco (DF) de 306 μ m; diâmetro médio das micro-bolhas (DB) de 50 μ m; taxa de aplicação superficial na zona de clarificação TAS _{z.c} 200m/dia.	166
Figura 5.25	Relação entre os efeitos da turbulência (α_1 e α_2) e os efeitos da velocidade relativa (α_3) na colisão entre micro-bolhas e flocos frente as variação do diâmetro dos flocos (DF). Cálculos efetuados com base no modelo de choques proposto por Reali (1991b) e nos resultados obtidos experimentalmente. Fixos: Gm 8s ⁻¹ ; diâmetro médio das micro-bolhas (DB) de 50 μ m; taxa de aplicação superficial na zona de clarificação TAS _{z.c} 200m/dia.	167
Figura 5.26	Relações entre os valores de Nbo, Nfo e n para diferentes valores de diâmetros de flocos (DF), de micro-bolhas (Db) e de razão de recirculação (p). Fixos: TAS _{z.c} 200m/dia, concentração volumétrica de flocos 0,00213 m ³ /m ³ água. Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991b) e nos resultados obtidos experimentalmente.	169
Figura 5.27	Relação entre AS _{flocos} /n.d ² e o diâmetro dos flocos para diferentes valores de (DF), de micro-bolhas (Db) e de razão de recirculação (p). Fixos: TAS _{z.c} 200m/dia, concentração volumétrica de flocos 0,00213 m ³ /m ³ água. Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991b) e nos resultados obtidos experimentalmente.	170
Figura 5.27.1	Exemplo ilustrativo de micro-bolhas presentes na forma de cachos. Imagens adquiridas visando análise preliminar dos procedimentos apresentados no método do Capítulo 2 desta tese.	171
Figura 5.28	Relação entre o valor de β td e o diâmetro médio das micro-bolhas para diferentes valores de razão de recirculação (p). a) para dF de 274 μ m e b) para dF de 306 μ m.. Fixos: TAS _{z.c} 200m/dia, concentração volumétrica de flocos 0,00213 m ³ /m ³ água, Sv 0,076m ³ de ar/m ³ de água e Gm 8s ⁻¹ . Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991b) e nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto de FAD.	172
Figura 5.29	Relação entre o valor de β td e o diâmetro médio dos flocos para diferentes valores de razão de recirculação (p). a) para dB de 25 μ m e b) para dB de 50 μ m.. Fixos: TAS _{z.c} 200m/dia, concentração volumétrica de flocos 0,00213 m ³ /m ³ água, Sv 0,076m ³ de ar/m ³ de água e Gm 8s ⁻¹ . Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991b) e nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto de FAD.	173

- Figura 5.30** Relação entre o valor de βt_d e a porcentagem residual remanescente de cor aparente e turbidez. Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991b) e nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto de FAD. 175
- Figura 5.31** Relação entre o valor de $1/\beta$ e a porcentagem residual remanescente de cor aparente e turbidez utilizando os valores de t_d obtidos nos ensaios estímulo resposta. Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto de FAD. 177

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Lista das unidades de FAD para tratamento de água na América Latina.	8
Tabela 2.1	Erro no tratamento das imagens (binarização) para cada faixa de tamanho de micro-bolhas. Tamanho <i>pixel</i> de 5 μ m.	43
Tabela 3.1	Valores dos picos de velocidade no eixo x para as diferentes condições investigadas. Para cada condição foram realizados 10 ensaios.	74
Tabela 3.2	Valores médios dos picos de velocidade no eixo x	75
Tabela 4.1	Exemplos de métodos utilizados para medir alguma propriedade de bolhas de gás.	94
Tabela 4.2	Parâmetros e variáveis investigadas para avaliação da variação da DTMB na zona de reação USMB. Fixos: P_{sat} 450 $\pm$ 10KPa, θ 22 $\pm$ 1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", ζ não medida porém mantida inalterada.	100
Tabela 4.3	Erro amostral para 95% de intervalo de confiança para cada condição investigada	101
Tabela 4.4	Condições investigadas para os ensaios estímulo-resposta na USMB.	101
Tabela 5.1	Principais diferenças entre os modelos apresentados por Reali (1991b), Malley e Edzwald (1991b) e Fukushi, Tambo e Matsui (1995).	129
Tabela 5.2	Parâmetros e variáveis investigadas para avaliação da eficiência da unidade piloto de FAD na remoção de cor e turbidez frente às variações de $Tdz.r$; $TASz.c$ e DTP^* . Fixos: P_{sat} 450 $\pm$ 10KPa, θ 22 $\pm$ 1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", ζ não medida porém mantida inalterada através da utilização da mesma água.	140
Tabela 5.3	Erro amostral para 95% de intervalo de confiança para as duas condições de floculação investigadas. Tempo de floculação (T_f) mantido constante em 34 minutos. Circularidade 0,62+	140
Tabela 5.4	Condições investigadas para os ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD investigada.	141
Tabela 5.5	Principais hipóteses simplificadoras assumidas na modelação matemática para a zona de reação de unidades de flotação por ar dissolvido (FAD) operando no modo convencional proposta por Reali (1991).	159
Tabela 5.6	Média dos resultados de cor aparente e turbidez residuais referentes aos ensaios na instalação piloto de FAD variando-se as condições de operação e de projeto. T_d teórico de 90 e 40 segundos referem-se a T_d reais de 225 e 100 segundos, respectivamente de acordo com os resultados experimentais dos ensaios de estímulo e resposta. Os valores indicados por R10% e R5% referem-se a razão de recirculação (p) de 0,10 e 0,05, respectivamente. Os resultados referentes $D_{médio}$ e D_{sauter} das micro-bolhas foram investigadas na etapa de ensaios apresentada no Capítulo 4 desta tese. Os diâmetros dos flocos referentes aos valores de G_f de 50 e 90 s ⁻¹ são de 306 e 274 μ m, respectivamente e estão apresentados no item 5.4.2 deste capítulo. Os valores de $TASz.c$ foram calculados com base na área em planta da zona de clarificação (downflow).	175

SUMÁRIO

<i>CAPÍTULO 1</i>		
1.	INTRODUÇÃO GERAL AO TEMA	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA PROPOSTO	1
1.2	ASPECTOS HISTÓRICOS: CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD)	2
1.2.1	Unidades de FAD de 1ª Geração	3
1.2.2	Unidades de FAD de 2ª Geração	4
1.2.3	Unidades de FAD Associadas com a Filtração (Flotofiltro)	9
1.2.4	Unidades de FAD de 3ª Geração	10
1.2.4.1	Aplicação de unidades de 3ª geração com escoamento turbulento	11
1.2.4.2	Aplicação de unidades de 3ª geração com escoamento associado a baixos números de Reynolds	12
1.3	ESTUDOS DE FLOTAÇÃO NO DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO E INSERÇÃO DA PRESENTE TESE NA LINHA DE PESQUISA DESENVOLVIDA	14
1.4	HIPÓTESE	18
1.5	OBJETIVO GERAL	18
1.6	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
<i>CAPÍTULO 2</i>		
2.	MATERIAL E MÉTODOS	19
2.1	MÉTODO UTILIZADO PARA OPERAÇÃO DA UNIDADE PILOTO DURANTE OS ENSAIOS DE TRATABILIDADE	19
2.2	MÉTODO DE ANÁLISE DE IMAGEM UTILIZADO	22
2.2.1	Considerações Iniciais	22
2.2.2	Unidade Separadora de Micro-bolhas (USMB)	22
2.2.3	Micro-bolhas	24
2.2.3.1	Aquisição	24
2.2.3.2	Passos para procedimento de captura de imagens	25
2.2.3.3	Tratamento	26
2.2.3.3.1	<i>Considerações iniciais</i>	26
2.2.3.3.2	<i>Procedimentos para tratamento das imagens</i>	27
2.2.4	Flocos	41
2.2.4.1	Aquisição	41
2.2.5	Precisão do Método	42
2.2.6	Considerações Finais a Respeito do Método Proposto	44
2.3	MÉTODO PARA UTILIZAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS DA SONDA MICROADV	46
2.3.1	Considerações Iniciais	46
2.3.2	Aquisição dos Dados	46
2.3.3	Processamento	52
2.3.4	Tratamento dos Dados em txt	52
2.3.5	Considerações Finais a Respeito do Programa <i>Veldigital3D</i> Desenvolvido	66
<i>CAPÍTULO 3</i>		
3.	ENSAIOS COMPLEMENTARES MICRO ADV	67
3.1	AValiação DA UTILIZAÇÃO DO MICROADV PARA A FAD	68

3.1.1	Considerações Iniciais da Seção 3.1	68
3.1.2	Questões Elaboradas para a Seção 3.1	68
3.1.3	Metodologia Utilizada nos Ensaios da Seção 3.1	70
3.1.4	Resultados e Discussão Específicos da Seção 3.1	72
3.1.4.1	A questão da frequência de amostragem	72
3.1.4.2	A questão da interferência das micro-bolhas nas medidas de velocidade	73
3.1.5	Conclusões referentes à seção 3.1	76
3.2	ENSAIOS COM O MICROADV NA ZONA DE REAÇÃO DENOMINADA UNIDADE SEPARADORA DE MICRO-BOLHAS (USMB)	77
3.2.1	Considerações Iniciais da seção 3.2	77
3.2.2	Metodologia Utilizada nos Ensaios da Seção 3.2	78
3.2.3	Resultados e Discussão Específicos da Seção 3.2	79
3.2.4	Extrapolção do Uso da Sonda Micro-ADV Conjugada ao Programa Desenvolvido <i>VelDigital3D</i> para Avaliação das Condições de Escoamento na FAD	89
3.2.5	Conclusões referentes à seção 3.2	90
	CAPÍTULO 4	
4.	HIDRODINÂMICA DA ZONA DE REAÇÃO DA UNIDADE DE FAD INVESTIGADA: O EFEITO DA TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL (TAS) E DO TEMPO DE DETENÇÃO MÉDIO (TD_{Z.R}) NA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE MICRO-BOLHAS (DTMB).	91
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	91
4.2	“BACKGROUND”	93
4.3	MATERIAL E MÉTODOS ESPECÍFICOS DO CAPÍTULO	99
4.3.1	Aparato Experimental	99
4.3.2	Condições Investigadas	99
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	101
4.4.1	Ensaio Estimulo-Resposta	101
4.4.2	Ensaio para Obtenção da DTMB na USMB	108
4.4.2.1	Etapas 1: variação das condições de mistura	108
4.4.2.2	Etapas 2: pequena variação do pH	111
4.4.2.3	Etapas 3: variação da razão de recirculação (p)	113
4.4.2.4	Etapas 4: variação da dosagem de coagulante (Al ⁺³)	114
4.4.3	O Efeito da Variação DTMB na FAD	117
4.5	CONCLUSÕES	123
	Capítulo 5	
5.	ZONA DE REAÇÃO: O EFEITO DO TAMANHO DE MICRO-BOLHAS (DTMB) E PARTÍCULAS (DTP), TEMPO DE DETENÇÃO NA ZONA DE REAÇÃO (TD_{Z.R}) E RAZÃO DE RECIRCULAÇÃO (p) NO DESEMPENHO DE UMA UNIDADE PILOTO DE FAD OPERANDO NO MODO CONVENCIONAL.	124
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	124
5.2	“BACKGROUND”	127
5.2.1	Considerações Iniciais a Respeito da Modelação Matemática para a Flotação	127
5.2.2	Alguns Modelos Matemáticos para a Zona de Reação da Unidade de FAD	130
5.2.3	Hidrodinâmica dos Tanques de Flotação	135
5.3	MATERIAL E MÉTODOS ESPECÍFICOS DO CAPÍTULO	137
5.3.1	Aparato Experimental	137

5.3.2	Estratégia Adotada para a Aquisição das Imagens dos Flocos	137
5.3.3	Condições Investigadas	139
5.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	141
5.4.1	Ensaio Estimulo-Resposta	141
5.4.2	Ensaio de Tratabilidade e de Obtenção da Distribuição de Tamanho de Flocos (DTP)	147
5.4.3	Análise da Sensibilidade do Modelo Matemático Proposto por Reali (1991) Frente às Variações dos Parâmetros na Instalação Piloto	158
5.4.3.1	Estimativa do gradiente médio de velocidade na zona de reação	161
5.4.3.2	Análise do efeito da turbulência e da velocidade ascensional das bolhas na colisão entre bolhas e flocos com base nos resultados obtidos experimentalmente	165
5.4.3.3	Número e área de micro-bolhas e flocos: relação de N_{bo}/N_{fo} no tempo $t=0$ e da área de superfície do floco com o valor de n calculado.	167
5.4.3.4	Análise do valor de βT_d e $1/\beta$: a relação com o diâmetro das micro-bolhas e dos flocos com a eficiência de remoção de cor aparente e turbidez nos ensaios realizados com a instalação piloto de FAD.	171
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	178
5.6	CONCLUSÕES	180
	CAPÍTULO 6	
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA TESE	181
6.1	CONCLUSÕES DA TESE	187
6.2	RECOMENDAÇÕES	188
	REFERÊNCIAS	
	APÊNDICE A - ENSAIOS DE FLOTAÇÃO EM ESCALA DE LABORATÓRIO	
	APÊNDICE B - SISTEMA DE COLETA DE ÁGUA FLOTADA	
	ANEXO A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO GRAVIMÉTRICA	

Apresentação

Este trabalho situa-se dentro da grande área que envolve o tema Saneamento Básico, mais especificamente na sub área de Tratamento de Água para Abastecimento. Nesta, foi investigada uma técnica de tratamento que emprega bolhas de ar, denominada “flotação por ar dissolvido”, ou simplesmente FAD. A eficiência do reator de FAD foi avaliada, nesta pesquisa, sob o ponto de vista das partículas presentes em suspensão na fase líquida e da hidrodinâmica da unidade.

Somente nesta apresentação me coloco em primeira pessoa tendo a oportunidade única de ser informal. Confesso que quando ingressei com o projeto de doutorado no departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) não tinha idéia da dimensão do trabalho que aqui será exposto e me deixei levar pela empolgação na proposta do tema. Por isso, muitas foram às vicissitudes durante o percurso e a briga pela delimitação do tema perdurou até a impressão da tese. Não tenho dúvida de que este trabalho não esgota o assunto, mas tenho a certeza, de que foram dados passos importantes que, somados ao conhecimento atual, contribuíram para o aprimoramento da linha de pesquisa desenvolvida no SHS pelo grupo de estudos sobre o processo de flotação.

Na verdade, no texto desta tese apresento apenas uma síntese dos resultados experimentais obtidos em uma instalação, em escala piloto, de flotação por ar dissolvido (FAD). Textos concernentes a tópicos considerados acessórios em relação aos objetivos principais do trabalho encontram-se apresentados de forma bastante resumida. Tomei esta decisão com o propósito de tornar a leitura fluente e concisa, sem interferências que pudessem desviar a atenção da questão principal e tornar a leitura maçante.

O ponto principal que norteou as atividades desta pesquisa foi o estudo e a avaliação do sistema de FAD, sob a óptica das micro-bolhas, dos flocos presentes e da hidrodinâmica do reator, baseando-se na modelação proposta pelo orientador deste trabalho, Prof^o Dr. Marco Antonio Penalva Reali.

Dividi o corpo do texto da tese em capítulos apresentados de acordo com a seqüência lógica necessária para a preparação e consecução do trabalho experimental.

O **Capítulo 1** destinou-se a introdução, trazendo o leitor para o universo desta pesquisa. As motivações, a proposta de pesquisa, a hipótese e o objetivo gerais estão expostos neste capítulo introdutório. Os Capítulos seguintes são dependentes entre si, bem como das respostas obtidas nos ensaios chamados complementares. No entanto, cada capítulo possui sua própria introdução, objetivos específicos, revisão da literatura, discussão e conclusões de modo a convergir, como um todo, para a hipótese e objetivo gerais. O fluxograma apresentado na Figura a seguir mostra a seqüência e a interdependência entre os capítulos e os chamados ensaios complementares.

No **Capítulo 2**, apresento a operação da instalação piloto, com ênfase na utilização do programa de controle e aquisição de dados, e como foi desenvolvido um método para determinação da distribuição de tamanho das partículas e outro para tratamento dos dados de um equipamento utilizado para avaliar as condições hidrodinâmicas.

Posteriormente, no **Capítulo 3**, discorro como foi elaborada a metodologia para validação da utilização do equipamento empregado para avaliar as condições hidrodinâmicas frente às particularidades do sistema de FAD e os resultados, referentes à utilização deste equipamento, do mapeamento detalhado dos vetores velocidade na região de interesse da unidade piloto.

No **Capítulo 4**, utilizo os ferramentais desenvolvidos nesta tese e outros já concebidos, para realizar os estudos a respeito da distribuição de tamanho de micro-bolhas e da hidrodinâmica em uma determinada região da unidade piloto.

Fluxograma ilustrativo da inter-relação entre os diversos capítulos e apêndices da presente tese.

Por último, no **Capítulo 5**, apresento avaliação das condições de projeto e operacionais da unidade, frente às variações da distribuição de tamanho das partículas presentes e da hidrodinâmica, e sua relação com o desempenho da unidade piloto de FAD investigada.

É evidente que o caráter investigatório da pesquisa daria margem para uma série de discussões nos mais diversos campos de atuação profissional. Optei, no entanto, por abordar o problema sob o ponto de vista da Engenharia, mais especificamente pelas questões relacionadas ao fundamento do processo e ao projeto de unidades de FAD, e delimitar a discussão baseado nesta premissa. No **Capítulo 6** apresento as considerações finais da tese, retomando as conclusões, que foram naturalmente extraídas da análise baseada nessa postura, e finalizando com as recomendações, que contemplam alguns dos outros pontos de vista possíveis, podendo servir de inspiração para trabalhos futuros.

Os **Apêndices A e B** contemplam mais dois ensaios complementares que deram suporte aos ensaios na unidade piloto e o **Anexo A** os resultados de calibração dos medidores utilizados.

1. INTRODUÇÃO GERAL AO TEMA

Resumo do capítulo

Neste capítulo é apresentada a contextualização do tema proposto nesta tese, referente à importância do estudo das partículas e suas relações no meio líquido no aprimoramento do processo de flotação por ar dissolvido (FAD). Posteriormente, segue a apresentação de aspectos históricos relativos à evolução do processo de FAD trazendo o estado da arte da tecnologia. Por fim, é apresentada a linha de pesquisa desenvolvida no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP e a inserção desta tese na mesma.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA PROPOSTO

A flotação por ar dissolvido (FAD) com recirculação pressurizada do efluente caracteriza-se como um processo trifásico de separação sólido/líquido. Neste, micro-bolhas de ar são introduzidas na massa líquida visando remoção dos flocos, que são formados na etapa de pré-tratamento da água. As micro-bolhas são geradas a partir da dissolução do gás em parcela do efluente clarificado. Para tal, é utilizada uma unidade denominada câmara de saturação. Nesta câmara, o ar é dissolvido em valores elevados de pressão e introduzido na unidade de FAD, que opera em pressão atmosférica, precipitando assim o ar na forma de micro-bolhas.

Há mais de oito décadas a flotação por ar dissolvido (FAD) vem sendo aplicada no tratamento de água e águas residuárias. No Brasil, a Estação de Tratamento de Água (ETA) de Meaípe-ES foi uma das primeiras a empregar a FAD como unidade de clarificação, inaugurada oficialmente em 1994 mas em testes desde 1990. Richter e Gross (2000) apontam também como uma das pioneiras a ETA Döhler, em Joinville-SC, inaugurada em 1992. O projeto das unidades de FAD foi, por muito tempo, baseado em resultados empíricos. Somente em 1993, a *Water Reseach Commission* da África do Sul produziu um documento com parâmetros de projeto para a FAD baseado na larga experiência prática obtida naquele país.

Especificamente quanto à sua aplicação no tratamento de águas destinadas ao abastecimento, a FAD é reconhecida pelo seu excelente desempenho na remoção de alguns tipos de contaminantes tais como as substâncias húmicas e florações algais, como afirmam Coelho, Reali e Campos (1991), Dombroski, Reali e Marchetto (1996), Edzwald e Malley (1991a), Edzwald e Malley (1991b), Heinanen, Jokela e Ala-peijari (1995), Marchetto e Reali (1997a), Reali e Santos (1999), entre outros. São muitos os trabalhos que demonstram as vantagens do emprego da FAD em relação aos processos de tratamento que empregam ciclo completo ou mesmo a sistemas que empregam a filtração direta. Nestes, a FAD proporciona uma maior carreira de

filtração diminuindo o consumo de água para a operação de lavagem dos filtros (SCHNEIDER et al., 1991; VAN PUFFELEN et al., 1995; FERGUSON; LOGSDON; CURLEY, 1995; VALADE et al., 1996; EDZWALD et al., 1999).

A configuração do reator de FAD deve propiciar condições para o contato e a agregação entre as partículas em suspensão no meio líquido (micro-bolhas de ar e flocos) assim como condições favoráveis para que os agregados sejam conduzidos até a parte superior do reator onde podem ser removidos. Para tal, a unidade é dividida em duas regiões distintas: zona de reação e zona de clarificação. A zona de reação caracteriza-se como uma região de mistura visando a colisão e a agregação entre as micro-bolhas e os flocos. A zona de clarificação por sua vez, é a região onde as condições de escoamento devem favorecer a manutenção da ligação e propiciar a ascensão do conjunto micro-bolhas e flocos (LUNDH; JÖNSSON; DAHLQUIST, 2002).

O aumento das pesquisas e da experiência adquirida com as unidades em operação proporcionou muitos avanços. Entre eles podem ser citados: mudanças nas condições de coagulação e floculação; incremento da taxa de aplicação superficial (TAS) nos tanques de FAD e alterações no sistema de fornecimento de ar. (SCHOFIELD, 2000).

No entanto, muitas questões permanecem ainda obscuras. Entre elas, as mais contundentes referem-se às características das partículas e as condições de mistura ideais para o processo de FAD.

A abordagem puramente construtiva das unidades de tratamento deixou de ser único parâmetro para projeto. Atualmente, o conhecimento das características físicas dos sólidos presentes surge como ferramenta potencial para o aprimoramento na concepção e projeto de unidades de separação sólido/líquido empregadas no tratamento de água e esgoto (SANTOS et al., 2004). Descrita por Tchobanoglous (1995) como a “próxima fronteira” do conhecimento, a caracterização das partículas apresenta-se como promissora ferramenta no campo do tratamento de água.

Assim, o conhecimento da interação entre as micro-bolhas e os flocos presentes (fase sólida) e sua relação com a hidrodinâmica é o ponto crítico para o refinamento de projetos de unidades de flotação.

1.2 ASPECTOS HISTÓRICOS: CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD)

Conforme comentado, a FAD é utilizada como processo de clarificação de águas destinadas ao abastecimento há mais de 80 anos. As primeiras unidades foram projetadas por volta de 1920 e eram dimensionadas seguindo critérios de projetos utilizados na indústria de tecido e papel (KIURU, 2000). Desde então, as unidades sofreram profundas mudanças na sua concepção. Atualmente as unidades, denominadas de 3º geração, estão mais desenvolvidas. O maior conhecimento do processo permitiu um aumento considerável na taxa de aplicação superficial (TAS

de 3m/h nos primeiros tanques ADKA e Svernn-Pederson a 40m/h nas modernas unidades de 3º geração) resultando em unidades bem mais compactas. A quantidade de micro-bolhas necessárias (expressa em razão de recirculação de água saturada) tem diminuído em alguns casos de 20% para 5%, resultando numa diminuição do consumo de energia. A câmara de saturação, com recheio de anéis de pvc, permitiu um aumento considerável na eficiência de saturação. As etapas de pré-tratamento (coagulação e floculação) também sofreram modificações de modo que as dosagens de produtos químicos aplicadas diminuíram, o tempo de floculação também diminuiu consideravelmente (de 20 min. para 5 min. em alguns casos) e o gradiente médio de velocidade para floculação aumentou (de 20-50s-1 para 70-100s-1). (SCHOFIELD, 2000).

Sendo assim, esta seção da introdução aborda, mais detalhadamente, as principais mudanças nas unidades de FAD desde as primeiras, denominadas 1º geração, até as recentes unidades de 3º geração.

1.2.1 Unidades de FAD de 1ª Geração

A FAD foi inicialmente utilizada na exploração de matérias primas minerais originadas de suspensão aquosa utilizando processos industriais no final do século XIX. A eficiência da FAD nesta aplicação é expressa como a taxa de recuperação de partículas da água (g/L) (KIURU, 2000). Nesse caso, a qualidade final do efluente não tem grande importância uma vez que o foco se dá na recuperação das partículas para a reutilização industrial.

Para o tratamento de água, a qualidade final do efluente produzido tem muita importância. Nesse campo, a FAD foi introduzida como alternativa na década de 20 e, desde então, é utilizada para purificação de água através da remoção de partículas.

Segundo relato de Schofield (2000), a Namíbia possuía uma unidade de FAD para tratamento de água contendo elevadas concentrações de algas. As unidades eram projetadas com base em conhecimentos empíricos e aplicavam os mesmos conceitos utilizados para a sedimentação na definição das dosagens de coagulante e condições de mistura.

A primeira conferência internacional sobre FAD ocorreu em 1976 no Reino Unido. Nessa época, somente a Escandinávia possuía unidades em operação para tratamento de águas de abastecimento. De acordo com Schofield (2000), já existiam mais de 16 unidades em operação para tratamento de água que serviram de referência para as discussões e propostas apresentadas.

Somente na década de 90 foram efetuados estudos visando otimização dos parâmetros de projeto e o melhor conhecimento das variáveis que governam o processo.

Em 1993, o *Water Research Commission* da África do Sul citado por Haarhoff e Vuuren (1993), produziu um importante documento baseado na experiência prática. Esta publicação foi considerada uma das primeiras que apresentou

parâmetros de projeto para unidades de FAD aplicadas ao tratamento de água visando abastecimento.

Desde então, houve uma mudança significativa nas condições de coagulação e floculação de águas visando a FAD principalmente no que tange as dosagens de coagulante aplicadas, ao uso de polímeros e as condições de floculação (G_f e T_f). Da mesma forma, as células de flotação sofreram profundas mudanças advindas do melhor conhecimento do processo.

Atualmente, existem centenas de unidades operando em todo mundo. São mais de 90 unidades tratando água no Reino Unido, 37 plantas na Finlândia, 26 na Austrália, 26 na África do Sul, 20 nos Estados Unidos, 15 na Suécia, 5 na Noruega, 6 no Canadá, 7 na França, 5 na Holanda, 3 na Bélgica e 1 na Nova Zelândia, conforme Schofield (2000). No Brasil existem cerca de 20 unidades operando. (RICHTER; GROSS, 2000).

Nos primeiros sistemas de FAD utilizados, os tanques de flotação possuíam dimensões bastante distintas das atuais. As unidades eram longas, estreitas e rasas. Dentre estes sistemas de FAD estão os denominados ADKA e os Sveen-Pedersen. Estes, assim como os de hoje, possuíam duas regiões distintas: zona de reação, onde promove-se o contato entre micro-bolhas e flocos e, zona de flotação, onde o conjunto bolhas-flocos é conduzido a superfície para ser removido. Neste último, a direção do fluxo declina ligeiramente em relação à horizontal em função das condições de saída (Figura 1.1).

Nessas unidades, as TAS são da ordem de 2 – 3 m/h. Em consequência do emprego destas pequenas taxas, forma-se uma fina camada de micro-bolhas abaixo da superfície da água no espaço de flotação, conhecida como manta de micro-bolhas. Esse tipo de sistema, denominado de *1ª geração*, atualmente ainda pode ser encontrado em uso em algumas indústrias de papel e celulose.

Figura 1.1 Esquema simplificado das unidades de flotação de 1º Geração.

Fonte: Patrizzi (2002) adaptado de Kiuru (2000)

1.2.2 Unidades de FAD de 2ª Geração

A segunda geração da FAD foi introduzida na década de 60 e estas unidades são largamente empregadas ainda hoje, conforme Kiuru (2000). Os princípios fundamentais da FAD não foram modificados em relação às unidades de 1ª geração porém verificou-se que para aplicação de TAS maiores que 5 m/h a geometria dos tanques de flotação deveria sofrer grandes modificações. Para que estes valores de TAS pudessem ser alcançadas, os tanques de flotação tornaram-se mais largos, mais profundos e com menor comprimento.

Ainda de acordo com Kiuru (2000), a zona de reação não sofreu grandes alterações em relação às unidades anteriores porém, a zona de clarificação foi alterada. A profundidade do tanque tornou-se maior e a direção do fluxo apresentou maior declínio em relação a horizontal, com ângulos da ordem de 30 – 45° (Figura 1.2). Com isso, as TAS puderam facilmente ser incrementadas para 5 – 7 m/h podendo chegar a 10 m/h. Esta aplicação resultou no aumento da espessura da manta de micro-bolhas (30 – 50 cm no início do tanque) declinando linearmente para valores de 10 – 20 cm no final do tanque. Como consequência, além de aumentar a agregação micro-bolhas/flocos, a manta de micro-bolhas desempenha agora quase que um papel de filtro, uma vez que o fluxo conduzido para a parte superior do reator deve passar através da mesma. Esse tipo de sistema é denominado de 2ª geração ou convencional.

Figura 1.2 Esquema simplificado das unidades de flotação de 2ª Geração.

Fonte: PATRIZZI (2002) adaptado de KIURU (2000)

As unidades de 2ª geração foram mais largamente empregadas no tratamento de água e diversos estudos foram publicados utilizando este tipo de flotador.

Rees, Rodman e Zabel (1979) desenvolveram estudos em cinco estações pilotos com vazão de 95 m³/h, para avaliar a eficiência da FAD no tratamento de cinco tipos de águas: água de rio com problemas de algas (acumulada durante três dias), água de rio com alta turbidez, água altamente colorida e com baixa turbidez, água rica em nutrientes com problemas de algas (acumulada por longo período de detenção hidráulica) e água de um riacho com dureza relativamente alta.

As estações foram operadas durante dois anos, com o objetivo de verificar os efeitos das mudanças sazonais na qualidade da água no desempenho das estações. Os autores concluíram que a flotação foi particularmente efetiva para o tratamento de águas com alto teor de algas, águas altamente coloridas e com baixa turbidez. O

tratamento por flotação da água de rio com alta turbidez produziu qualidade da água ligeiramente pior que a produzida por sedimentação; entretanto, após filtração a qualidade da água foi semelhante.

Após testes realizados em escala de laboratório, escala piloto, análise dos resultados e viabilidade econômica, o sistema constituído por FAD e filtração para clarificação foi proposto por Krofta e Wang (1982) como forma de tratamento de águas destinadas ao abastecimento.

No Brasil, Reali (1984) realizou a primeira aplicação da FAD como etapa no tratamento de águas de abastecimento, através de pesquisa desenvolvida em escala piloto de grande porte. A instalação com escoamento contínuo ($6\text{m}^3/\text{h}$) foi construída na Estação de Tratamento de Água de São Carlos - SP (ETA São Carlos) onde foi utilizada a água bruta afluyente para a alimentação do reator. O autor concluiu que, para muitos casos, a FAD pode se constituir em alternativa vantajosa em relação a sedimentação.

Schneider et al. (1991) pesquisaram uma instalação piloto de filtração direta e outra de FAD, utilizando água do sistema de Croton na cidade de New York, EUA. A água bruta do sistema de Croton apresentava qualidade com as seguintes características: turbidez entre 0,8 e 1,4 uT, baixa quantidade de algas, exceto nos períodos de *blooms*, alcalinidade $45\text{ mg CaCO}_3/\text{L}$, COT na faixa de 3 a 6 mg/L, cor verdadeira de 20 uC, com picos de 40 uC e pH entre 6,5 e 7,5. Os autores verificaram que o uso da FAD implicou em carreiras de filtração maiores e em menor vazão de água para lavagem de filtros e passaram a recomendar a utilização da FAD em conjunto com a filtração direta. Os autores sugerem ainda que; quando a água bruta possuir boa qualidade, a unidade de flotação poderá ser desligada e a estação ser operada tal como uma instalação de filtração direta. Este procedimento visa diminuição dos custos de operação do sistema e torna-o mais atrativo sob o ponto de vista econômico. Schneider et al. (1991) verificou que, mesmo quando as unidades de FAD estavam em operação, as vantagens relativas aos baixos custos na disposição de sólidos e as longas carreiras de filtração tornaram o processo atrativo.

Na Universidade de Massachusetts, desde 1984, Edzwald et al. (1992) tem realizado pesquisas sobre aplicação da FAD no tratamento de águas de abastecimento. O autor cita algumas vantagens: baixo custo devido as unidades de FAD ocuparem menores áreas que a sedimentação, menores quantidades de coagulantes que as necessárias para sedimentação, melhor eficiência na remoção de partículas em águas que contêm alta concentração de algas, com aumento das carreiras de filtração, tanto na filtração direta como na convencional. Quando integrado ao projeto de filtros a FAD permite elevadas taxas de aplicação superficial ou longas carreiras de filtração em relação àquelas obtidas após a clarificação por sedimentação.

Como desvantagem, o autor cita custos mais altos com energia elétrica para recalque de água de recirculação. Contudo, segundo o autor, esses custos podem ser compensados com gastos menores de produtos químicos, no tratamento e na disposição de lodo.

Edzwald (1995) recomenda, em sistema de tratamento de água de abastecimento, o uso de flotação por ar dissolvido como etapa para clarificação precedendo o processo de filtração, especialmente para águas com alto teor de algas ou alta cor e baixa turbidez. O autor também informa que a aplicação da FAD não se limita apenas ao tratamento de águas que contenham cor natural ou algas. A FAD tem amplas aplicações no tratamento de águas superficiais para abastecimento.

Em muitos países, a FAD tem sido utilizada como parte do processo de tratamento de águas de abastecimento. Há mais de 20 anos a Holanda utiliza FAD em água com turbidez relativamente baixa e alto teor de algas e, segundo Van Puffelen et al. (1995), a FAD demonstrou-se eficaz em combinação com filtração rápida em areia.

Na África do Sul a flotação por ar dissolvido começou a ser utilizada no final da década de 70 no tratamento de águas eutrofizadas, conforme Offringa (1995). A eutrofização de águas superficiais tem despertado preocupações crescentes, levando a modificações de diversas estações existentes e construções de novas estações utilizando a FAD.

A Finlândia utiliza a FAD como processo de clarificação desde 1965. Segundo Heinanen, Jokela e Ala-peijari (1995), as águas brutas da Finlândia, na maioria dos casos, apresentam cor significativa e o bom desempenho das estações de tratamento com FAD tem demonstrado a eficiência do método no tratamento desse tipo de água.

Nickols, Schneider e Leggiero (2000) investigaram a eficiência da integração de uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido como parte de um programa de avaliação de opções de tratamento para água de Croton na cidade de New York. Essa piloto foi operada de 1996 até 1999 com o objetivo de confirmar possíveis alternativas de tratamento e otimizar os parâmetros de projeto.

O tratamento consistia de sistemas de desinfecção com cloro, fluoretação e controle de corrosão com ortofosfatos e soda cáustica, sem coagulação, pois a água bruta de Croton apresentava boa qualidade. Entretanto, para antecipar o atendimento de futuras regulamentações de qualidade estabelecidas por Legislações Estaduais e Federais, o tratamento selecionado consistiu em: coagulação (dosagem de sulfato de alumínio na faixa de 9 a 30 mg/L, dosagem de polímero catiônico na faixa de 0,5 a 1,5 mg/L e pH entre 6,3 e 7,1); floculação (2 tanques de floculação com tempo de detenção de 4,8 a 8 minutos); flotação por ar dissolvido (taxa de aplicação superficial de 15 a 25 m/h e 11 g de ar/m³); ozonização e filtração. As características da água bruta de Croton, na ocasião, eram: temperatura: 2 - 30 °C, turbidez: 0,6 - 3,6 uT, cor: 14 - 48 uC, COT: 2,2 - 4,3 mg/L, pH: 6,2 - 9,2, alcalinidade: 42 - 70 mg/L CaCO₃, THM: 74 - 86 µg/L, Ferro: 0,01 - 0,17 mg/L e Manganês: 0,01 - 0,33 mg/L. O tratamento foi otimizado e resultou em altas taxas de produção de água com excepcional qualidade.

Segundo Richter e Gross (2000), existem no Brasil em operação, em torno de 20 unidades FAD, listadas na Tabela 1.1, a seguir.

Quanto às condições de floculação ideais para a FAD, estudos recentes (década de 90) mostraram os benefícios do uso de câmaras em série (até 2 ou 3). Além disso, os gradientes médios de velocidade e os tempos de floculação foram otimizados visando a FAD. Os trabalhos iniciais utilizavam as mesmas condições de floculação estabelecidas para a sedimentação. Atualmente, admiti-se que flocos pequenos (da ordem de 10-100 micra) são mais efetivamente removidos, conforme Edzwald e Malley (1991b). Para tal, gradientes médios de velocidade da ordem de 70 s⁻¹ com tempos de floculação de 10 minutos, ou menos, são requeridos. Em virtude disso, misturadores tipo turbina estão sendo adotados em substituição aos sistemas que empregam agitadores com paletas paralelas ao eixo.

Tabela 1.1 Lista das unidades de FAD para tratamento de água na América Latina.

Estação de Tratamento	Capacidade (L/s)	Localização (cidade, estado)	Data do Início da Operação	Comentários
Dohler	70	Joinville (SC) Brasil	Setembro/92	Nova Coag/Flot/Filt
José Ignácio	14	José Ignácio Uruguai	Janeiro/94	Nova Flota/Filt
Meaípe*	40	Guarapari (ES) Brasil	Fevereiro/94	Existente Adaptada p/FAD Flot/Filt
La Barra	140	Barra de Maldonado Uruguai	Fevereiro/94	Nova Flot/Filt
Mantenópolis	30	Mantenópolis (ES) Brasil	Agosto/94	Existente Adaptada p/FAD
ETA III	125	Jaraguá do Sul (SC) Brasil	Novembro/94	Nova Flot/Filtr
Itu	20	Itu (SP) Brasil	Junho/94	Nova Flot/Filtr
ETA I	125	Jaraguá do Sul (SC) Brasil	Setembro /96	Existente Adaptada p/FAD
Vila C	450	Foz do Iguaçu (PR) Brasil	Janeiro/97	Existente Adaptada p/FAD
Ibatiba	23	Ibatiba (ES) Brasil	Junho/97	Existente Adaptada p/FAD
Cupsa	14	Minas Uruguai	Julho/97	Nova Flot/Filtr
Braço do Rio	30	Conceição da Barra (ES) Brasil	Julho/97	Existente Adaptada p/FAD
Mairiporã	28	Mairiporã (SP) Brasil	Julho/97	Nova Flot/Filtr
Iúna	42	Iúna (ES) Brasil	Agosto/97	Existente Adaptada p/FAD
Cajamar	99	Cajamar (SP) Brasil	Agosto/97	Nova Flot/Filtr
São José dos Pinhais	200	S. J. dos Pinhais (PR) Brasil	Julho/98	Nova Flot/Filtr
Caraguatatuba	600	Caraguatatuba (SP) Brasil	Julho/98	Nova Flot/Filtr
Itapeva/Itaoca	75	Itapemerim (ES) Brasil	Novembro/98	Existente Adaptada p/FAD
Mandaguahy	180	Jaú (SP) Brasil	Novembro/99	Nova Flot/Filtr
Laguna Del Sauce	2000	Maldonado Uruguai	Abril/2000	Existente Adaptada p/FAD

* A unidade de flotação teve início de sua construção em 1989, com a transformação de unidades de decantação circulares em flotadores de 2ª geração
 Fonte: PATRIZZI (2002) adaptado de RICHTER (2000)

1.2.3 Unidades de FAD Associadas com a Filtração (Flotofiltro)

Com relação ao sistema de FAD associado com a filtração Kiuru (2000) comenta que:

[...] do ponto de vista hidráulico, o mais importante passo dado no desenvolvimento da tecnologia de FAD, foi a invenção do Flotofiltro que ocorreu no final da década de 60 na Suécia. Esta idéia combina, em um só tanque, a flotação por ar dissolvido e a filtração rápida em areia (KIURU, 2000).

Hidraulicamente esta combinação é ideal, pois resulta em fluxo vertical de água da superfície do tanque para baixo cobrindo a totalidade do fundo do espaço de flotação. Este fluxo de água vertical é igualmente distribuído ao longo da superfície horizontal do tanque em decorrência da perda de carga no leito de areia (vide Figura 1.3).

Se a altura do espaço de flotação for suficientemente grande, podem ser empregadas TAS de 10 – 15 m/h e, portanto, ocorre expansão da manta branca de micro-bolhas formando um leito filtrante.

As TAS, hidraulicamente, podem atingir 20 – 25 m/h mas, na prática, para não comprometer a eficiência do sistema, não são utilizadas taxas maiores que 15 m/h.

Figura 1.3 Esquema simplificado das unidades de flotação denominadas Flotofiltro.

Fonte: PATRIZZI (2002) adaptado de KIURU (2000)

Reali (1991a), realizou estudos com uma instalação compacta para tratamento de água que, em uma só unidade conjugava processos de coagulação/floculação/flotação e filtração. O autor verificou que os resultados obtidos nos ensaios efetuados na instalação piloto comprovaram que o sistema proposto constitui alternativa tecnicamente viável para a clarificação do Ribeirão Feijão em São Carlos – SP. A idéia de conjugar em uma só estrutura as unidades de floculação, flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante resultou em sistema original de clarificação, bastante compacto que requer pouco tempo, cerca de uma hora, para entrar em equilíbrio.

Krofta e Guss (1993) apresentaram um sistema de flotação e filtração em uma única unidade que pode ser aplicado em tratamento convencional de água, tratamento terciário de águas residuárias e sistemas de reciclagem de água. De

acordo esses autores, esse sistema apresentou elevada eficiência além de implicar em unidades menores e custos mais baixos.

É interessante atentar para o funcionamento desse tipo de unidade. A resistência oferecida pelo meio filtrante, localizado na parte inferior da unidade, é tão grande e distribuída que equaliza a vazão na zona de flotação. Com isso, as taxas podem ser incrementadas sem a ocorrência de regiões de grande turbulência ou mesmo de caminhos preferenciais. Com isso a manta de micro-bolhas se estende ao longo da profundidade do tanque desempenhando, também, um papel de filtro. (KIURU, 2000). O limite para tal incremento se dá, provavelmente, quando a manta de micro-bolhas alcança o leito do meio filtrante. A partir desse momento as bolhas de ar, ou mesmo os flocos agregados colmatam rapidamente o meio filtrante, comprometendo o bom funcionamento e qualidade do efluente produzido pela unidade.

1.2.4 Unidades de FAD de 3ª Geração

As unidades de 3º geração apareceram na década de 90 com a observação do funcionamento dos reatores de flotofiltro. Nestes, a limitação para o incremento das taxas foi o próprio limite imposto pelo filtro. Sendo assim, para incrementar as taxas aplicadas seria necessário retirar os filtros e acrescentar alguma estrutura mecânica capaz de desempenhar o mesmo papel do filtro na zona de clarificação, no que se refere a equalização dos perfis de velocidade. (KIURU, 2000).

Até então, como se acreditava que a FAD poderia ser operada somente em condições de escoamento com baixo número de Reynolds, a máxima taxa aplicada era de 25 m/h. Quando a taxa superava esse valor, as condições de escoamento tornavam-se mais turbulentas. O problema a ser solucionado era como controlar o fluxo de água nas condições turbulentas para que a FAD ocorresse de forma apropriada.

Para a utilização de TAS de 25 – 40 m/h ou maiores, a geometria dos tanques de flotação foi convenientemente modificada. A direção do fluxo de água continuaria vertical e descendente da superfície da água diretamente para o fundo do tanque porém, maiores taxas implicam no carregamento das micro-bolhas para partes mais profundas do tanque. Levando-se em conta essas altas taxas, os tanques deveriam ser mais profundos e as micro-bolhas menores. Neste caso, o diâmetro médio das micro-bolhas deveria ser de 40 a 70 μm e a profundidade do espaço de flotação da ordem de 2,5 a 3,5 m. Conseqüentemente, a profundidade do tanque de flotação deveria ser da ordem de 3,0 a 4,0 m (Figura 1.4).

Para a equalização da vazão no interior da câmara de clarificação, foi construída uma fina placa horizontal – com orifícios redondos de diferentes tamanhos, distribuídos ao longo da seção horizontal – localizada na zona de clarificação por flotação aproximadamente 0,5 m acima do fundo do tanque. O projeto destas placas é secreto e protegido por patentes. O papel deste dispositivo é, como observado no sistema de flotofiltro, controlar o fluxo de água no espaço de flotação e distribuí-lo,

de maneira uniforme, ao longo de toda a seção – apesar das condições de escoamento turbulento.

Assim como o flotofiltro, o leito formado de micro-bolhas, desempenha um papel de filtro onde o meio é constantemente regenerado. Dependendo da taxa aplicada a espessura do leito de micro-bolhas pode chegar de 1,5 a 2,5 m. (KIURU, 2000).

As unidades de 3ª geração podem ser divididas em: com placas e sem placas e as unidades sem placas podem ser subdivididas em: sem colméias e com colméias. Estas últimas consistem na adequada aplicação de dispositivo tipo colméias, no final da zona de clarificação por flotação, para remoção de micro-bolhas residuais do efluente.

As unidades com placas planas paralelas inclinadas adequadamente espaçadas permitiriam escoamento com menor número de Reynolds o que possibilitaria a aplicação de maiores taxas da ordem de 40 m/h e até maiores. A disposição das placas pode ser feita de modo que o escoamento seja horizontal ou vertical. (REALI e MARCHETTO, 2000).

Figura 1.4 Esquema simplificado das unidades de flotação de 3ª geração.

Fonte: Patrizzi (2002) adaptado de Kiuru (2000)

1.2.4.1 Aplicação de unidades de 3ª geração com escoamento turbulento

Edzwald et al. (1999) investigaram a integração da tecnologia da FAD de alta taxa com unidades contendo dispositivo tipo colméia visando remoção de micro-bolhas residuais do efluente e, estudaram também a eficiência da FAD de alta taxa antecedendo o sistema de filtração de duas estações de tratamento de água.

As unidades de FAD foram instaladas em duas ETAs. A primeira, em Newport News, EUA, operada de Fevereiro a Junho de 1997, utilizou somente sulfato de alumínio com dosagem entre 45-50 mg/l e pH entre 6,4-6,7. Essa ETA foi operada a uma vazão de 22,7 m³/h, com tempo total de floculação de 6 minutos e a água bruta com as seguintes características: temperatura: 7-22 °C, turbidez: 1,3-3,7 uT, cor: 20-50 uC, COT: 20-50 e pH: 7,1-7,9.

A segunda ETA em Fairfield, EUA, operada de Julho a Março de 1998, utilizou sulfato de alumínio com dosagens de 10 a 17 mg/L e 1 mg/L de polímero catiônico. Foi utilizada vazão de 20-21 m³/h com tempo total de floculação de 7 minutos. Características da água bruta: temperatura: 12-17 °C, turbidez: 0,61-1,25 uT, cor: 20-25 uC, COT: 2,9-3,2 e pH: 7,0-7,3.

O objetivo dessa pesquisa foi - através de dois métodos de remoção de bolhas, um interno e outro externo - testar o uso de baixos tempos de floculação (6 a 7 minutos), avaliar os efeitos de altas taxas na FAD (17-44 m/h), investigar a performance da filtração, além de estudar a possibilidade das bolhas de ar não carrearem para os filtros.

Os autores observaram que, nos dois casos, quando empregadas TAS de até 30 m/h, os resultados foram excelentes com valores de turbidez menores que 1,0 uT mas, quando utilizaram TAS de 44 m/h, a performance não foi tão boa. Os resultados mostraram também ser viável a integração da FAD de alta taxa, por possibilitar diminuição dos tempos de floculação (5 minutos) em relação aos tempos adotados em unidades convencionais (20 a 25 minutos) e por ser possível aumentar a taxa de aplicação superficial para 30 a 40 m/h, sem causar prejuízo à qualidade do efluente. Além disso, foi eficiente a introdução, no interior da zona de flotação, de dispositivo para retirada das micro-bolhas de ar residuais e, assim, promover melhores condições para operação dos filtros.

Amato et al. (2000) estudaram a integração de unidades de FAD denominadas DAFRápide® no tratamento de 5 diferentes tipos de águas, com o objetivo de avaliar a eficiência dessas unidades no tratamento de água. Foram utilizados, em todos os casos, tempo de floculação de 5 a 10 minutos, gradiente médio de velocidade na floculação de 20 a 50 s⁻¹ e taxas de aplicação superficial da ordem de 20 a 40 m/h.

Os autores concluíram que a integração da FAD foi eficiente, mesmo quando empregados tempos de floculação da ordem de 5 a 10 minutos e taxas de aplicação superficial de 20 a 40 m/h - pois forneceram turbidez com valores inferiores a 1,0 uT, além de proporcionarem menor custo de implantação.

1.2.4.2 Aplicação de unidades de 3ª geração com escoamento associado a baixos números de Reynolds

Mesmo os reatores de flotação por ar dissolvido tradicionais (de segunda geração) apresentam taxas de aplicação superficial bem mais elevadas que as unidades de sedimentação (da ordem de 5 vezes). A introdução de lamelas (placas planas paralelas) convenientemente dispostas no interior de uma unidade de flotação por ar dissolvido possibilita o escoamento associado a baixos números de Reynolds. A exemplo da sedimentação laminar, a flotação em reator com escoamento laminar pode apresentar desempenho consideravelmente melhor que o apresentado por unidades convencionais de FAD (com escoamento turbulento), permitindo a adoção de valores bem mais elevados de taxa de aplicação superficial e resultando em unidades mais compactas (REALI; MARCHETTO, 2001).

Schofield (2000) aponta algumas vantagens no uso de lamelas com base nos resultados apresentados por Hedberg et al. (1998), sendo elas:

- redução da turbulência e dos padrões de recirculação que aparecem nas unidades de clarificação com maior turbulência;
- auxílio na remoção do ar remanescente do processo que seria carregado para as unidades subsequentes de filtração.

O primeiro relato desse tipo de unidade é encontrado em Lundgreen (1970) e comenta que o uso de placas paralelas, adequadamente espaçadas, possibilita maiores TAS e aumento da eficiência do processo devido ao seguinte efeito: eliminação da turbulência proporcionando zona de relativo repouso próximo às placas (causado por forças de atrito entre as placas e o líquido), na qual as partículas (flocos) podem subir à superfície, sem sofrer interferência do escoamento. O autor concluiu que a unidade de FAD por ele concebida, com introdução de placas, ofereceu muitas vantagens no tratamento de águas residuárias de indústrias de papel, por operar em altas taxas e permitir redução de tamanho da unidade de flotação. Comparada ao projeto convencional de flotação, a área requerida foi reduzida em 40 a 50%, com diminuição de custos na montagem da estação. Embora tenha relatado as vantagens inerentes ao emprego da unidade de FAD contendo placas em seu interior, ele não forneceu informações a respeito das características construtivas e dos parâmetros de projeto da referida unidade.

Os estudos realizados com esse tipo de reator aplicados tanto no tratamento de águas residuárias quanto no tratamento de águas destinadas ao abastecimento são recentes em todo mundo. Marco Antonio Penalva Reali, orientado por José Roberto Campos, iniciou, em 1984, essa linha de pesquisa pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, (SHS/EESC/USP), São Paulo, Brasil. Nessa linha, foram desenvolvidos diversos trabalhos cujos resultados foram publicados nos seguintes artigos: Reali e Campos (1993), Lobato, Reali e Faitanin (1995), Reali e Marchetto (1996), Dombroski, Reali e Marchetto (1996), Reali e Dombroski (1996), Reali e Santos (1999), Marchetto e Reali (1997b), Marchetto e Reali (1997a), Reali e Sartori (1998), Sartori e Reali (1999), Reali e Sartori (2000), Reali e Marchetto (2000), Moruzzi, Patrizzi e Reali (2001), Reali, Moruzzi e Patrizzi (2003) e Moruzzi, Reali e Patrizzi (2004).

Uma outra aplicação do módulo composto por placas planas paralelas foi apresentada por Hedberg et al. (1998). Os autores verificaram que as bolhas de ar dispersas no efluente prejudicavam o desempenho dos filtros subsequentes ao reator de flotação, diminuindo as carreiras de filtração e prejudicando a qualidade do efluente. Sendo assim, o estudo foi realizado em uma FAD em escala piloto composta por duas unidades de mistura rápida, três tanques de floculação dispostos em série, a unidade de FAD propriamente dita e, em alguns dos experimentos, dois filtros descendentes em paralelo. Para remoção do ar disperso, os autores utilizaram lamelas (placas planas) variando o comprimento das placas, o ângulo de inclinação e a distância entre as placas paralelas. As placas foram dispostas tanto no final da zona de clarificação por FAD quanto na saída da água

pré-clarificada, antes da passagem da água pelo filtro com a finalidade de remover as micro-bolhas de ar arrastadas para as unidades de filtração subseqüentes. Os autores verificaram que o módulo composto por placas é uma alternativa eficiente na remoção das micro-bolhas que são carregadas para os filtros, uma vez que o módulo favorece a aglutinação das micro-bolhas aumentando a velocidade ascensional das mesmas. Os autores verificaram, também, que ângulos de inclinação das placas da ordem de 40°, os quais possibilitavam maior área de projeção das placas, resultaram na obtenção dos melhores valores de remoção de turbidez após a filtração. Com essa disposição das placas, a vazão de entrada do reator pode ser incrementada, sem prejuízo da qualidade do efluente final.

1.3 ESTUDOS DE FLOTAÇÃO NO DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO E INSERÇÃO DA PRESENTE TESE NA LINHA DE PESQUISA DESENVOLVIDA

O grupo de pesquisa sobre Tratamento Avançado e Reuso de Águas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS/EESC/USP) estabeleceu, de forma pioneira em 1980 no Brasil, uma linha de pesquisa específica sobre a aplicação da FAD no tratamento de águas destinadas ao abastecimento e residuárias.

Nesses últimos vinte anos sob os auspícios da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), diversos trabalhos foram realizados nessa linha de pesquisa cujos principais resultados encontram-se publicados na forma de teses e artigos, além de periódicos e anais de congressos.

De forma resumida, foram desenvolvidos projetos envolvendo os seguintes aspectos do processo de flotação por ar dissolvido:

i) Desenvolvimento de equipamento em escala de laboratório contendo colunas de flotação por ar dissolvido alimentadas por batelada (REALI; CAMPOS, 1995). Com o emprego deste equipamento foram desenvolvidos estudos sobre a potencialidade de aplicação da flotação para o tratamento de diversos tipos de água para abastecimento;

ii) Projeto, construção e operação de sistema piloto de flotação por ar dissolvido (FAD) utilizado em várias pesquisas sobre aplicabilidade da flotação no tratamento de águas para abastecimento e influência na eficiência do processo das diversas variáveis operacionais e de projeto (REALI; CAMPOS, 1985; CAMPOS; REALI, 1985; COELHO; REALI; CAMPOS, 1991);

iii) Desenvolvimento de câmara de saturação de alta eficiência para sistema de FAD contendo recheio simples de anéis de PVC (REALI; CAMPOS, 1992);

iv) Investigação sobre diferentes tipos de bocais difusores da vazão de recirculação de sistemas de FAD;

v) Concepção e desenvolvimento de sistema original de floto-filtração englobando num só reator os processos de floculação, flotação (FAD) e filtração com taxa declinante (REALI, 1991; REALI; CAMPOS, 1993).

vi) Diversas pesquisas a respeito da influência das condições de coagulação química (tipo e dosagem de coagulante, pH de coagulação, gradiente médio de velocidade, tempo de floculação e grau de compartimentação) na eficiência do processo de flotação por ar dissolvido aplicado à clarificação de águas contendo cor elevada, turbidez elevada e alta concentração de algas em suspensão (REALI; CAMPOS, 1985; CAMPOS; REALI, 1985; COELHO; REALI; CAMPOS, 1991; REALI; GIANOTTI, 1993; DOMBROSKI; REALI; MARCHETTO, 1996; REALI; DOMBROSKI, 1996; REALI; SANTOS, 1996; SANTOS; REALI, 1996; MARCHIORETTO; REALI, 1997; MARCHIORETTO; REALI, 1999).

vii) Utilização de polímeros sintéticos e naturais como auxiliares de floculação/flotação de águas para abastecimento (REALI; SARTORI, 1998; SARTORI; REALI, 1999; REALI; SARTORI, 2000);

viii) Desenvolvimento de modelo matemático para o processo de flotação por ar dissolvido aplicado para separação de partículas floculadas (REALI, 1991; REALI, 1994);

ix) Utilização da flotação em sistemas de tratamento de efluentes líquidos produzido na indústria de papel visando recuperação seletiva de fibras (REALI; LIMA, 1997);

x) Emprego da FAD em sistemas de tratamento de águas residuárias de indústria cítricas, abatedouros, laticínios e indústrias alimentícias visando reaproveitamento do lodo para produção de ração animal (REALI; BRAGA, 1995);

xi) Espessamento e desidratação final de lodos de estações de tratamento de água utilizando o processo de FAD seguido de centrifugação (REALI; CORDEIRO; PATRIZZI, 1999; PATRIZZI; REALI; CORDEIRO, 1999; REALI; PATRIZZI; CORDEIRO, 2000);

xii) Processo físico-químico de FAD como pós-tratamento do efluente de reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário (CAMPOS et al., 1996; REALI; PENETRA; CAMPOS, 1998; PENETRA et al., 1998; PENETRA et al., 1999; PENETRA; REALI; CAMPOS, 1999; REALI; PENETRA; CARVALHO, 2000; REALI; MARCHETTO, 2000; REALI; CAMPOS; PENETRA, 2000; REALI; PENETRA; CARVALHO, 2001; REALI; CAMPOS; PENETRA, 2001);

xiii) Ozônio-flotação como pós-tratamento de reatores anaeróbios (MARCHIORETTO; REALI, 2000; MARCHIORETTO; REALI, 2001);

xiv) Aplicação da FAD como pós-tratamento de efluentes de sistemas biológicos sequenciais associando reator anaeróbio com reator aeróbio de lodo ativado (MORETTI, 2000);

xv) Pós-tratamento de efluente de sistema de lodos ativados por flotação, visando reuso;

xvi) Remoção de ferro e manganês de águas de abastecimento em sistemas que conjugam a oxidação química com a flotação por ar dissolvido (MORUZZI; PATRIZZI; REALI, 2001; MORUZZI; PATRIZZI; REALI, 2004a, 2004b);

xvii) Proposição e avaliação de sistema avançado de tratamento de esgoto sanitário constituído de reator anaeróbio, unidade de coagulação/floculação/flotação por ar dissolvido seguido de microfiltração e osmose reversa visando reuso do efluente final (PORTO, 2001);

xviii) Remoção de toxinas de cianobactérias presentes em águas de reservatórios eutrofizados com o emprego dos processos de oxidação/flotação e adsorção em carvão ativado (pesquisa em andamento);

xix) Desenvolvimento de unidade original de FAD de alta taxa e baixo consumo de energia, concebida de forma a apresentar escoamento associado com baixo número de Reynolds (REALI, 1993; REALI; MARCHETTO, 1996; MARCHETTO; REALI, 1997a; REALI; SANTOS, 1999; MARCHETTO; REALI, 2000; REALI; MARCHETTO, 2001).

Com relação a este último projeto (item xix), vale salientar que o mesmo teve início já há alguns anos, com a construção de duas instalações piloto de alta taxa. A primeira delas, de menor porte e construída em acrílico, teve financiamento da FAPESP, em Reali (1993). Este projeto envolveu uma nova concepção de reator de flotação por ar dissolvido. Uma unidade de alta taxa, capaz de operar tanto com escoamento horizontal, quanto com escoamento vertical. Nesse novo tipo de reator supõem-se escoamento com baixo número de Reynolds na região de clarificação, através da colocação de forma apropriada de placas planas paralelas no interior do reator. Com o término de sua construção no início de 1995, a unidade protótipo foi implantada na área de instalações piloto do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS/EESC/USP) e, até hoje, vem sendo objeto de diversas pesquisas visando à caracterização dos principais parâmetros de projeto deste tipo de reator, assim como a avaliação de seu desempenho na clarificação de vários tipos de água para abastecimento.

Os trabalhos iniciais com esse tipo de reator mostraram que o mesmo apresenta excelente desempenho quando aplicado ao tratamento de diversos tipos de águas para abastecimento incluindo águas com cor elevada ou com alta concentração de algas em suspensão conforme constatado por: Dombroski (1996), Marchetto (1996), Reali e Marchetto (1996), Santos (1997), Marchetto e Reali (1997a), Reali e Santos (1999), Marchetto e Reali (2000) e Reali e Marchetto (2001).

Recentemente terminou-se a construção de uma segunda instalação piloto de maior porte que a anterior e construída em chapa metálica. A concepção desta instalação incorpora novos aprimoramentos, advindos de observações realizadas nos estudos preliminares e caracteriza-se como uma unidade de 3^o geração. Esta unidade é, presentemente, objeto de pesquisa de pós-doutorado da Dr. Eng^a Leila Jorge Patrizzi.

Apesar dos grandes avanços na tecnologia que culminaram nas unidades de 3^o geração, as condições de projeto e operacionais adequadas na zona de reação das unidades permanecem ainda obscuras. As condições de mistura e o tempo de detenção são parâmetros fundamentais para o dimensionamento da zona de reação e exercem papel importante no desempenho do processo de FAD (KITCHENER; GOCHIN, 1981). No entanto, as mudanças na zona de clarificação, decorrentes da evolução do processo de FAD, trazem como consequência direta a alteração do tempo de detenção e da velocidade de escoamento na zona de reação, podendo incorrer em prejuízo no desempenho do processo.

Sendo assim, na fase mais recente, a linha de pesquisa colocou-se à frente de um novo desafio: a verificação da influência dos parâmetros de projeto e de operação na zona de reação no desempenho de unidades de FAD. Assim, o conhecimento hidrodinâmico da zona de reação de unidades de FAD e sua interferência e relação com a distribuição de tamanho de micro-bolhas e flocos no desempenho do processo constituem importantes assuntos a serem abordados. Nesse sentido, colocaram-se os trabalhos investigados que resultaram na presente tese, onde as principais perguntas motivadoras foram: De que forma o tempo de detenção na zona de reação, a razão de recirculação e a distribuição de tamanho de partículas influem na eficiência do processo de FAD? A distribuição de tamanho de bolhas é alterada quando são alteradas as condições de mistura na zona de reação? O modelo proposto por Reali (1991) é sensível às alterações da distribuição de tamanho de bolhas e flocos na zona de contato do reator podendo servir de ferramenta para avaliação das condições de projeto?

Portanto, a investigação desenvolvida na presente tese constitui parte essencial da linha geral de pesquisa em curso, onde o melhor conhecimento da hidrodinâmica e da distribuição de tamanho de micro-bolhas e flocos presentes na zona de reação no processo de separação de sólidos por flotação - com análise da sensibilidade do modelo proposto por Reali (1991) - poderá fornecer subsídios importantes e seguros para o projeto de unidades de FAD.

1.4 HIPÓTESE

O tempo de detenção, as características hidrodinâmicas e a distribuição de tamanho de partículas e micro-bolhas no interior da zona de reação desempenham um papel fundamental no desempenho do processo de FAD.

1.5 OBJETIVO GERAL

- ✓ estudar e avaliar a influência da condição de mistura, da distribuição de tamanho de partículas (micro-bolhas e flocos) e do tempo de detenção hidráulico na zona de reação no desempenho de uma unidade de flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento de água para abastecimento.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Desenvolver método para aquisição, tratamento e obtenção da Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB) e flocos (DTP) no interior da instalação piloto;
- ✓ Desenvolver método para aquisição e tratamento dos dados da sonda Micro-ADV;
- ✓ Validar a utilização do equipamento MicroADV na obtenção dos vetores velocidade na zona de reação da unidade piloto de FAD (USMB).
- ✓ Determinar a malha de vetores velocidade no interior da zona de reação (USMB);
- ✓ Avaliar a Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB) na zona de reação da unidade piloto de FAD frente a variações da taxa de aplicação superficial versus tempo de detenção ($TAS_{vs}Td$), razão de recirculação (p), pH e dosagem de Al^{+3} ;
- ✓ Avaliar a sensibilidade do modelo proposto por Reali (1991) para a zona de reação de FAD, com base nos resultados de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez, frente às alterações da distribuição de tamanho de micro-bolhas (DTMB) e flocos (DTP), da razão de recirculação (p) e do tempo de detenção na zona de reação ($Td_{z,r}$).

2. MATERIAL E MÉTODOS**Resumo do capítulo**

Neste capítulo são apresentados os métodos desenvolvidos/adaptados para os ensaios em escala piloto. Primeiramente apresenta-se o método para operação da piloto com ênfase no software de aquisição de dados. Posteriormente, é apresentado o método desenvolvido para determinação das partículas presentes no reator de flotação por ar dissolvido (FAD) (micro-bolhas e flocos) utilizando a análise quantitativa de imagem. Finalmente, é apresentado o método desenvolvido para utilização e tratamento dos dados da sonda de ultra-som (microADV) utilizada para mapear os vetores velocidade na zona de reação do tanque de FAD. Os Capítulos 3,4,5 a Apêndices A e B contém os métodos específicos utilizados para a consecução particular de cada um deles.

2.1 MÉTODO UTILIZADO PARA OPERAÇÃO DA UNIDADE PILOTO DURANTE OS ENSAIOS DE TRATABILIDADE

A seguir é apresentado o método utilizado para operação da unidade piloto com ênfase na utilização do programa que compõem o sistema de aquisição de dados desenvolvido.

Preliminarmente foram efetuados todos os ajustes e adequação dos equipamentos e componentes do sistema piloto de FAD e todas as curvas foram traçadas e inseridas no programa que controla a aquisição dos dados.

Os medidores de vazão de entrada e recirculação foram calibrados através de ensaios gravimétricos (Anexo A).

Os procedimentos operacionais para partida e operação da unidade piloto construída em acrílico encontram-se convenientemente descritos em Sartori (1998) e Patrizzi (2002) e não serão repetidos neste trabalho. No entanto, na presente pesquisa foi desenvolvido o software de aquisição de dados e controle de alguns componentes do sistema de FAD em escala piloto. A Figura 2.1 apresenta esquematicamente todos os equipamentos e componentes que compõem o sistema e suas conexões com o microcomputador por meio de placa de aquisição de dados. A Figura 2.2 apresenta a tela principal do software desenvolvido em linguagem Delphi®, com a ajuda de Wagner Lamon, administrador de empresas e técnico do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR).

Através do software é possível acionar: as bombas (entrada, recirculação, descarte e bombas dosadoras), os agitadores do sistema de floculação (com controle da rotação individual) e programar o intervalo, tempo de abertura e número de ciclos dos registros de coleta das amostras bem como a velocidade e o tempo de acionamento do raspador de lodo.

O conjunto de registros de agulha que compõem o sistema de despressurização de água saturada é controlado através de malha fechada. O sistema lê os dados do medidor de vazão de recirculação e regula a vazão através de acionamento de motor conectado a polias que controlam a abertura dos registros.

O programa registra também o valor de pH, temperatura e a turbidez de entrada e saída da unidade piloto de FAD. Todos os registros são gravados em arquivo com extensão *txt* nomeado com a data da coleta dos dados.

O sistema não está todo automatizado, no entanto a aquisição de dados e monitoramento dos parâmetros apresentados deu agilidade ao procedimento operacional permitindo maior segurança na coleta e registro dos dados além de garantir o fornecimento de ar constante por meio do controle do sistema de registros de agulha que compõem o sistema de despressurização da água saturada.

Figura 2.1 Esquema ilustrativo dos materiais e equipamentos que compõem a unidade e os parâmetros monitorados e/ou controlados por sistema de aquisição de dados.

Figura 2.2 Tela principal do software de aquisição para as instalações piloto de FAD do grupo de pesquisa coordenado por Prof^o Dr. Marco A. P. Reali.

2.2 MÉTODO DE ANÁLISE DE IMAGEM UTILIZADO

2.2.1 Considerações Iniciais

A seguir, serão descritos os procedimentos desenvolvidos e/ou adaptados pelo autor da presente tese para aquisição, tratamento e obtenção de tamanhos de micro-bolhas e flocos. As análises foram efetuadas em amostras indeformadas, através da utilização de instalação em escoamento contínuo - especialmente concebida para este fim - combinada com método não intrusivo de aquisição de imagem. As imagens das micro-bolhas foram adquiridas em instalação denominada Unidade Separadora de Micro-Bolhas (USMB). Os flocos foram fotografados na saída do último tanque do conjunto de floculação, na entrada da unidade piloto de flotação por ar dissolvido (FAD).

É importante ressaltar que a maioria das etapas referentes a metodologia para aquisição e tratamento das imagens estão relacionadas ao caráter investigatório da pesquisa e que, por essa razão, são apresentadas de maneira detalhada no trabalho para que possam ser reproduzidas.

Houve uma preocupação constante com a característica das imagens adquiridas de modo que elas pudessem ser tratadas através de procedimentos semi-automáticos. Isso permitiu a análise de um grande número de objetos (micro-bolhas e flocos), diminuindo o erro decorrente do número de amostras (uma das principais críticas aos métodos que empregam a análise de imagem para determinação quantitativa).

2.2.2 Unidade Separadora de Micro-bolhas (USMB)

A USMB possui dimensões idênticas às da zona de reação da unidade piloto de FAD e foi concebida visando capturar imagens em movimento (fluxo de água em escoamento contínuo) de modo a não interferir nas características originais das micro-bolhas. O sistema foi construído em vidro para permitir a aquisição externa das imagens, constituindo assim um sistema não-intrusivo. A entrada de água foi feita por meio de *Manifold* de distribuição, localizado na porção inferior da unidade. Nesta, foi conectado mangueira flexível proveniente da bifurcação do sistema de alimentação da instalação piloto, à jusante do medidor de vazão de entrada. O sistema de recirculação de água saturada é composto por 3 registros de agulha idênticos aos utilizados na instalação piloto. No sistema de registros foi conectada a mangueira flexível proveniente da mesma câmara de saturação utilizada na instalação piloto.

O sistema de saída é composto por dois *Manifold(s)* independentes localizados na parte superior da unidade e separados em regiões distintas. A área de coleta e o número de furos de cada *Manifold* foram calculados para uma coleta uniforme e de tal forma que a soma das áreas dos furos, para cada *Manifold*, fosse proporcional à

área da seção transversal de cada região no ponto de aquisição das imagens. Assim, foi possível separar parte do fluxo de entrada, eliminando o problema proveniente da alta concentração de micro-bolhas. Durante a operação da USMB, as saídas eram ajustadas na mesma posição, de modo que a amostra fosse coletada proporcionalmente a área de cada seção independente.

A aquisição das imagens foi feita cerca de 20 cm acima do ponto de depressurização na porção transversal da unidade. A iluminação foi proveniente de um equipamento que produz um plano de laser que “corta” a unidade em plano perpendicular ao plano de aquisição das imagens (Figura 2.3).

Os procedimentos padronizados para a obtenção da distribuição de tamanho de micro-bolhas e flocos são descritos a seguir e foram divididos em: aquisição, tratamento e determinação de tamanho.

Figura 2.3 Desenho esquemático da montagem experimental em escoamento contínuo, denominada unidade separadora de micro-bolhas (USMB) utilizada para aquisição das imagens e determinação da DTMB nas diferentes condições investigadas.

2.2.3 Micro-bolhas

2.2.3.1 Aquisição

Antes da apresentação dos procedimentos de aquisição das imagens propriamente dita, são apresentadas algumas considerações sobre o início do trabalho prático.

Inicialmente, foi realizada uma série de testes no intuito de se estabelecer procedimentos padronizados para a aquisição das imagens das micro-bolhas. O que parecia extremamente corriqueiro mostrou-se, na verdade, bastante complexo e muito tempo foi despendido na tentativa de aquisição de imagens que fossem adequadas à obtenção da distribuição de tamanhos por meio de procedimento semi-automatizado. Foram testados diferentes sistemas de iluminação, posicionamento das lâmpadas, posicionamento e grau de ampliação das lentes do microscópio, resolução da imagem, velocidade de captura, focagem manual e automática e diversos recursos eletrônicos da câmera digital. Simplificadamente, os principais problemas encontrados na aquisição das imagens foram decorrentes de: *i)* a grande concentração das micro-bolhas presentes (da ordem de 100000/ml na região de “*release*”); *ii)* a velocidade ascensional das micro-bolhas que, para a pequena área visualizada (5mm²), interfere sobremaneira na captura; *iii)* a fonte e o posicionamento da iluminação que depende da velocidade de captura das imagens, da profundidade do pixel (4,8,10,12 ou 24bits) e do contraste necessário para a separação manual das micro-bolhas que passam pelo foco na etapa de binarização.

O sistema para aquisição de imagens de micro-bolhas desenvolvido para o presente trabalho é composto dos seguintes itens:

- unidade para separação/visualização das micro-bolhas (USMB) em escoamento contínuo;
- microscópio montado em braço mecânico e posicionado na horizontal;
- câmera fotográfica digital com controle manual de foco, velocidade do obturador e função de aquisição múltipla de imagens;
- tripé;
- fio com diâmetro conhecido para calibração;
- iluminação fria constituída de plano de laser.

2.2.3.2 Passos para procedimento de captura de imagens

- 1- Ligar a entrada de água da unidade através do acionamento da bomba que interliga o reservatório à unidade;
- 2- Estabelecer o N.A desejado na unidade;
- 3- Posicionar o fio de referência e focá-lo com microscópio;
- 4- Focar o fio utilizando a lupa;
- 5- Montar a câmera no tripé e posicioná-la na ocular do microscópio, através do adaptador, até visualização de todo campo;
- 6- Ligar o equipamento de laser e focar o plano de luz no fio de referência;
- 7- Fixar o foco da máquina no fio de referência (ajuste de foco manual) e fotografá-lo algumas vezes;
- 8- Retirar o fio de referência sem alterar o foco;
- 9- Ligar a câmera de saturação, regular pressão até alcançar estabilidade e abrir registros de distribuição de água saturada;
- 10- Regular a máquina para acionar o modo de captura múltipla de imagens na velocidade de abertura de 1/500 e manter o botão de disparo pressionado de modo a capturar as imagens múltiplas;
- 11- Descarregar os arquivos imagens no PC e repetir procedimento até obter o número de imagens desejadas.

A Figura 2.3.1 apresenta um esquema dos procedimentos descritos acima.

Figura 2.3.1 Desenho esquemático ilustrativo da sequência dos procedimentos para aquisição das imagens na unidade separadora de micro-bolhas (USMB) utilizada para aquisição das imagens e determinação da DTMB nas diferentes condições investigadas.

Durante todo o processo de aquisição das imagens não pode haver nenhuma alteração no arranjo físico da instalação e periféricos. Devem ser mantidas rigorosamente constantes as condições operacionais da câmara de saturação, vazões (entrada, recirculação, dosadoras de produtos), nível de água, posicionamentos e focagem da câmera e iluminação. Para a obtenção de tamanhos é imprescindível a aquisição da foto de calibragem para cada condição investigada, uma vez que uma pequena variação no posicionamento do sistema óptico pode interferir nos resultados obtidos.

2.2.3.3 Tratamento

2.2.3.3.1 Considerações iniciais

Para a realização desta etapa é importante conhecer as diferentes operações envolvidas no tratamento de imagens digitais. No entanto, na delimitação do presente trabalho, julgou-se conveniente não apresentar todas as etapas possíveis de serem desenvolvidas no tratamento digital de imagens. A complexidade do tema certamente foge do escopo desta tese e, portanto aconselha-se aos interessados em aprofundar os conhecimentos sobre o tema a leitura de obras específicas tais como: Pratt (1991), Gonzalez e Woods (1992), Jähne (1993), Russ (1995), Soille (1999), Costa e César Jr. (2000), Gonzalez e Woods (2002).

O tratamento das imagens foi realizado no programa *freeware Image-Tool 3.0®*, desenvolvido para a área de medicina. O programa pode ser copiado sem custos a partir do *site* da *The University of Texas Health Science Center at San Antonio* e opera perfeitamente na plataforma Windows. O endereço eletrônico do *site* consta na lista de referências.

Após a aquisição e estocagem das imagens adquiridas o programa é executado. Para cada imagem, cerca de 20 janelas visuais correspondentes aos comandos necessários ao tratamento são geradas. Os resultados referentes à obtenção de tamanho são apresentados em janela separada e armazenados no formato *txt* para que possam ser convenientemente tratados em planilha eletrônica. A operação foi descrita nessa seção da metodologia utilizando uma imagem real adquirida como exemplo e limita-se até a obtenção dos dados em *txt*. As etapas posteriores de tratamento dos dados e construção dos gráficos não serão descritas por se tratar de procedimento corriqueiro em planilha eletrônica.

Ao final de cada subseção será apresentado quadro prático contendo descrição resumida para consecução da etapa correspondente.

2.2.3.3.2 Procedimentos para tratamento das imagens

Instalação do Software

Efetuar *download* do programa a partir do *site* <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/download.html> e instalar o software.

Após a instalação do programa, clicar no ícone correspondente na área de

trabalho. A tela de abertura contendo apresentação e créditos é exibida e, nesse momento, todos os *plug-ins* são carregados automaticamente (Figura 2.4). Caso isso não ocorra, verifique se o diretório *plug-in* contém os arquivos correspondentes. Em caso negativo, copiar os arquivos do site e colar na pasta.

Figura 2.4 Tela de apresentação do programa *Image Tool* versão 3.0.

Pratica 1: Download e Instalação do Image Tool versão 3.0

1 Entrar no site: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>;

2 Em “Overview” clicar em “Download Software”;

3 Efetuar “Download” de todas opções disponíveis:

ImageTool Application

Version 3.0 Final

[IT.ZIP](#) (4,493KB)

ImageTool Software Development Kit

Source Code

Version 3.0

[ITSDK3.ZIP](#) (1,510 KB)

ImageTool 3.0 Accessories

[Convolution Filters](#) (4,200 KB)

[Plug-ins](#)(330 KB)

[Images](#)(201 KB)

[User's Manual in Word 7.0 format](#) (649 KB)

4 Instalar o software e execute o programa

Calibração

Primeiramente, deve-se proceder a calibração do sistema através da foto de calibração adquirida antes da obtenção de cada bateria de ensaios. Este procedimento informa qual é o tamanho correspondente a uma determinada distância entre pontos e constitui-se etapa fundamental na determinação da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP) por análise de imagem. Existem 3 passos para a calibração do programa, sendo:

1- abertura do arquivo foto;

2- definição manual do limiar de binarização (opcional para a etapa de calibração, pois depende da aquisição da imagem);

3- calibração propriamente dita.

A binarização da foto de calibração não é necessária quando a imagem for nítida suficiente para delimitação das bordas. Para o programa em questão é importante que tamanho da foto de calibração (resolução) seja o mesmo das imagens adquiridas para o tratamento.

Na barra de ferramentas clicar em *File* e depois em *Open Image* ou utilize o ícone de

atalho ou mesmo a tecla F2 (Figura 2.5). A imagem aparece na tela. Podem ser lidos arquivos de extensão bmp (Windows bitmap), pcx (Paintbrush), tif (Tagged Image Format), tga (Targa), png (Portable Network Graphics), pct (Macintosh PICT),

jpeg (Joint Photographic Engineers Group), its, arquivos gravados no *Image Tool* com extensão própria e arquivos com multi-imagens de extensão tiff.

Figura 2.5 Tela de abertura do arquivo imagem para calibração.

Para a binarização da imagem clicar em *Processing* no menu e transformar a imagem em escala de cinza utilizando o comando *Color-to-grayscale*. Caso a imagem tenha sido adquirida em escala de cinza esta etapa é dispensada. Em seguida no menu *Processing* escolher a opção *threshold* no modo manual ou clique no atalho

na barra de ferramentas. O histograma de frequência de intensidade é então apresentado. Para imagens em 8 bits a intensidade para cada *pixel* é dada por 2^8 níveis de cinza que vai de 0 a 255 correspondendo as 256 intensidades do preto ao branco, respectivamente (Figura 2.6). O limiar de binarização deve ser delimitado manualmente para cada imagem a ser tratada e constitui etapa fundamental no tratamento das imagens.

Figura 2.6 Etapa de binarização através da definição do limiar de binarização manual no histograma da imagem.

Arrastando a barra da esquerda para a direita até o limiar definido manualmente o fundo da imagem ficará branco e os objetos pretos. Da direita para a esquerda o fundo ficará preto e os objetos brancos. Qualquer forma é possível, pois a definição das bordas será feita através do contraste entre *pixel(s)*.

Posteriormente, procede-se a calibração propriamente dita. No menu, clicar em *Settings* e escolher a opção *Calibrate Spatial Measurements*. Em seguida, informar a linha de comprimento conhecido clicando no fio de referência e informar o tamanho e a unidade de medida correspondente. A seqüência é apresentada na Figura 2.7; 2.8 e 2.9.

Figura 2.7 Imagem binarizada da foto de referência.

Figura 2.8 Escolha do comprimento de referência com base em um tamanho conhecido.

Figura 2.9 Janela visual correspondente ao tamanho fornecido em diferentes unidades.

Em seguida, a calibração deve ser salva. Para tal, no menu, clicar em *Settings* e escolher a opção *Save Spatial Calibration*. Escolha um nome e salve a calibração. Aconselha-se a escolha de nome tais como nome do ensaio ou data de coleta. Assim, todas as imagens adquiridas naquelas condições poderão ser medidas através da escolha da calibração correspondente sem a necessidade de repetir a operação (Figura 2.10 e 2.11).

Figura 2.10 Salvando a calibração efetuada.

Figura 2.11 Nomeando a calibração efetuada.

Prática 2- Calibração:

1 Abrir o arquivo imagem contendo a foto de calibração ;

2 Transformar a imagem em escala de cinza: menu “Processing” » “Color-to-grayscale”;

3 Binarizar a imagem: » escolher o limiar no histograma;

4 Calibrar o tamanho conhecido: menu “Settings” » “Calibrate Spatial Measurements” » desenhe a linha de tamanho conhecido » forneça o valor e a unidade correspondente ao tamanho da linha;

5 Salvar a calibração: menu “Settings” » “Save Spatial Calibration”;

6 Ler a calibração correspondente cada vez que for efetuar a determinação de tamanho daquela série de imagens coletadas para aquela determinada calibração: menu “Settings” » “Load Spatial Calibration”.

Tratamento das imagens e obtenção dos tamanhos

O tratamento é intimamente determinado pela qualidade das imagens adquiridas e pode ser alterado em função desta etapa. Neste trabalho as imagens foram adquiridas de modo que os objetos que passaram pelo foco possuísem nível de brilho mais acentuado que os demais e, por isso fossem facilmente determinados no tratamento, mais especificamente na binarização da imagem. Assim, o limiar de binarização foi determinado manualmente em função do número de objetos que apareciam na imagem de acordo com este ou aquele limiar adotado.

Primeiramente, o arquivo imagem deve ser aberto. A imagem deve ser transformada em escala de cinza e, em seguida, efetue a binarização através da ferramenta *threshold* (Figuras 2.12; 2.13; 2.14 e 2.15). Estas etapas foram detalhadamente descritas na subseção Calibração.

O tratamento das imagens é composto basicamente pelas seguintes etapas:

- Transformação da imagem em escala de cinza (depende da aquisição);
- Binarização manual da imagem (transformação em imagem de 1 *bit*);
- Segmentação e detecção dos objetos, e;
- Obtenção dos tamanhos.

Figura 2.12 Transformação *Color-to-Grayscale*.

Figura 2.13 Binarização através da ferramenta *Threshold* modo *Manual*.

Figura 2.14 Escolha do limiar de binarização através do histograma de intensidade.

Figura 2.15 Aparecimento dos objetos na imagem de acordo com o limiar de binarização adotado.

Caso haja objetos com interseção visível, utilizar a ferramenta *Watershed* no menu *Processing* para separá-las (Figura 2.16).

Figura 2.16 Imagem binária e separação dos objetos através da utilização da ferramenta *Watershed* no menu *Processing*.

Posteriormente, inicia-se a análise dos objetos. Para tal, clicar em *Analysis* no menu e escolher a opção *Object Analysis* e *Find Objects* (Figura 2.17).

Figura 2.17 Etapa de detecção dos objetos ou segmentação.

Figura 2.18 Janela de visualização contendo opções do *Find Objects*.

Como a imagem já foi binarizada em etapas anteriores a opção *None (image is already thresholded)* deve ser escolhida (Figura 2.18). A janela de visualização informando o número de objetos identificados aparece (Figura 2.19).

Figura 2.19 Janela confirmando o número de objetos detectados.

Os objetos são então delineados e o número de cada objeto é apresentado (Figura 2.20).

Figura 2.20 Delimitação da área de cada objeto e o número correspondente a contagem efetuada.

Depois de identificados, os objetos devem ser analisados. Para isso clicar em *Analysis* no menu, escolher a opção *Object Analysis e Classification* (Figura 2.21).

Figura 2.21 Etapa de classificação dos objetos efetuada após identificação dos objetos.

Na janela visual de classificação, a propriedade a ser analisada deve ser selecionada em *Attribute* (Figura 2.22). A opção *Feret Diameter* foi adotada neste estudo pois, de acordo com manual, esta propriedade calcula o diâmetro equivalente à mesma área do objeto. Posteriormente, entrar com os valores das classes em que deseja obter a faixa de tamanho (Figura 2.23). A primeira classe contém objetos com tamanho até o valor estipulado. A última classe contém objetos com valores maiores que o estipulado. As demais classes contêm objetos com tamanho entre a classe correspondente e a anterior.

Figura 2.22 Escolha da propriedade a ser classificada.

Figura 2.23 Escolha dos valores correspondentes a cada classe.

Os objetos são então classificados e separados por cores diferenciadas de acordo com a classe pertencente (Figura 2.24).

Para cada arquivo imagem devem ser repetidos os procedimentos de tratamento descritos. Cada vez que o programa for iniciado, a etapa de calibração deve ser efetuada ou deve-se efetuar a leitura da calibração previamente realizada.

Os resultados são apresentados na janela independente (*Results*) e armazenados no formato *txt*. A partir daí, os resultados são tratados em planilha eletrônica onde devem ser construídos os gráficos de frequência relativa e acumulada para cada propriedade de interesse.

Evidentemente, podem ser criadas rotinas através do *script* do programa - que pode implicar em significativa economia de tempo no tratamento e obtenção das classes de tamanho dos objetos de cada arquivo imagem. No entanto, o uso desta opção pode incorrer em erros grosseiros na etapa de binarização (transformação em imagem 1bit), podendo comprometer os resultados finais, já que a visualização das imagens é essencial para identificação do limiar de binarização.

Figura 2.24 Resultado obtido para cada classificação com separação com cores de acordo com a faixa pertencente.

Prática 3 - Tratamento das imagens e obtenção dos tamanhos :

- 1 Abrir o arquivo imagem contendo os objetos a serem analisados ;
- 2 Transformar a imagem em escala de cinza: menu "Processing" » "Color-to-grayscale";
- 3 Binarizar a imagem: » escolher o limiar no histograma;
- 4 Separar os objetos que porventura estejam unidos: menu "Processing" » "IP*EDM" » "Watershed";
- 5 Delimitar a área de cada objeto: menu "Analysis" » "Object Analysis" » "Find Objects" » opção "None (image is already thresholded)";
- 6 Classificar os objetos identificados em faixas de tamanho: menu "Analysis" » "Object Analysis" » "Classification";
- 7 Escolher a faixa de tamanho pertinente de acordo com a propriedade em que deseja analisar ou leia classe previamente estipulada;
- 8 Efetuar os passos para cada arquivo imagem a ser analisado;
- 9 Salvar os dados da janela visual "Results" e copiar os dados para planilha eletrônica para consecução dos gráficos: menu "File" » "Save Results As".

2.2.4 Flocos

2.2.4.1 Aquisição

A aquisição das imagens dos flocos em suspensão foi realizada na última câmara de floculação da unidade piloto, na entrada do flotador. Isso foi possível, pois o floculador é construído em acrílico e o plano de laser produzido foi capaz de atravessar a unidade. As imagens foram adquiridas no modo macro com a maior resolução disponível (5.1MPixel) para que a área fosse a maior possível. Assim, não houve nenhum problema decorrente da velocidade de captura das imagens. No entanto, as imagens foram adquiridas em velocidade 1/125 - para que houvesse contraste suficiente para separar os objetos que passaram pelo foco iluminado com o plano de laser. O sistema é composto pelos seguintes itens:

- tripé;
- máquina fotográfica digital;
- suporte para fixação da fonte de laser;
- fonte de laser;

Passos para procedimento de captura de imagens:

- 1- Limpar convenientemente a parede de acrílico do floculador;
- 2- Ligar a iluminação fria constituída por plano de laser;
- 3- Posicionar a câmera digital;
- 4- Definir o plano de foco utilizando o modo macro e fixá-lo manualmente;
- 5- Adquirir as imagens na maior resolução (5.1MPixel para Nikon 5400);

O tratamento e obtenção dos tamanhos foram realizados da mesma forma descrita para as micro-bolhas.

2.2.5 Precisão do Método

Existem duas principais fontes de erro no método utilizado: i) erro referente à amostragem; ii) erro inerente ao método de tratamento e análise das imagens.

O erro na amostragem depende do número de amostras analisadas frente à população total e do dispositivo de coleta de micro-bolhas. Este último é inerente ao método de coleta utilizado e não pode ser estimado precisamente. Neste trabalho foi utilizado a USMB de modo que as imagens foram adquiridas no interior da zona de

reação sem a necessidade realizar a coleta de amostras para posterior análise. Assim eliminou-se o erro referente à coleta de amostras.

Estima-se cerca de 100000 micro-bolhas/ml para 0,075ml ar/ml água e micro-bolhas de diâmetro médio de 50 μ m. Para as razões de recirculação estudadas ($p=0,1$ e $0,05$) o número de micro-bolhas liberadas no sistema foi da ordem de 5×10^7 e 10^8 micro-bolhas/minuto. Assim, para o cálculo do número de micro-bolhas foi considerada uma população infinita. No entanto, no momento da aquisição das imagens não foi possível controlar o número de bolhas adquiridas. O número de micro-bolhas adquiridas era determinado somente após a aquisição e análise dos dados. Sendo assim, foi coletada o máximo de imagens possível e o erro amostral foi diferente para cada condição investigada. O cálculo deste erro será convenientemente apresentado nos ensaios que envolveram a análise da distribuição de tamanho de micro-bolhas e flocos, pertencentes às etapas subseqüentes desta tese (Capítulos 4 e 5).

O segundo erro refere-se ao método de análise e tratamento de imagem utilizado, mais precisamente, na binarização manual da imagem.

As imagens foram adquiridas de modo que não foi possível identificar os objetos antes do tratamento, pois a velocidade de captura para congelar as micro-bolhas foi de 1/500 e a iluminação foi propositalmente insuficiente. Assim, na binarização manual das imagens, foi possível separar as micro-bolhas que passaram pelo foco, pois estas apareciam com maior nível de brilho sendo mais facilmente detectadas.

A área equivalente de cada micro-bolha foi definida em função da área dos *pixel(s)* (menor elemento unitário que compõem a imagem) que contém cada bolha (Figura 2.25). O tamanho de cada *pixel* depende da resolução adotada e do grau de aumento utilizados na captura da imagem. Quanto maior a resolução e o grau de aumento menor o tamanho do *pixel* e, assim maior a precisão na definição das bordas do objeto. Entretanto, quanto maior o grau de magnificação, menor a área de captura, e assim, menos bolhas seriam capturadas. Da mesma forma, quanto maior a resolução, mais informações a imagem contém e, portanto, mais difícil de trabalhar no software.

A escolha das condições adequadas de captura depende do tamanho médio dos objetos que serão analisados, da capacidade de processamento do sistema de aquisição e do erro requerido.

Para a aquisição das imagens, foi utilizada ampliação de 60x para resolução de 480x640 supondo diâmetro médio de micro-bolhas de 50 μ m. Assim, o tamanho do pixel foi de aproximadamente 5 μ m.

O erro no tratamento foi determinado em função da área dos *pixel(s)* que continham a imagem referente ao tamanho médio das micro-bolhas para cada faixa. A área pode ser sub ou superestimada (Figura 2.25) dependendo da binarização da imagem. Assim, o erro foi calculado em função da área de *pixel(s)* (para mais ou para menos) em relação à área do objeto. Fica evidente que quanto

menor a micro-bolha, maior o erro na determinação de sua borda (para um mesmo tamanho de *pixel*). Para micro-bolhas de 50 μm o erro foi menor que 0,50% (~0,30%). A Tabela 2.1 apresenta o erro do método para cada faixa de tamanho de micro-bolhas.

2.2.6 Considerações Finais a Respeito do Método Proposto

O aprimoramento de sistemas de tratamento de água e de esgoto tem sido limitado pelo pouco conhecimento dos fenômenos ocorridos no interior das unidades e pela utilização de “parâmetros” não específicos (DBO, DQO, turbidez, sólidos suspensos etc.) no monitoramento e controle dos processos de tratamento. Por outro lado, fenômenos como transferência de massa, adsorção, difusão e reações bioquímicas são todos influenciados pela distribuição de tamanho de partículas, de modo que, o emprego da análise de tamanho de partículas pode auxiliar na escolha e no aprimoramento de tecnologias de tratamento e na adoção de procedimentos operacionais apropriados (SANTOS et al., 2004). Nesse sentido, o método desenvolvido vai de encontro aos novos desafios da área de saneamento, mais especificamente na área de tratamento de efluentes líquidos.

O método desenvolvido para determinação de tamanho de partículas consumiu a maior parte do tempo destinado a esta tese e foi concebido segundo um procedimento dedicado e único. Muitos de seus componentes foram adaptados de equipamentos ociosos de acordo com as necessidades que se impunham e dessa forma foram totalmente originais. Não são originais os dispositivos ópticos e os demais periféricos que compõem o sistema, no entanto, são originais as formas como estes componentes foram adaptados e conjugados.

Não é comum, em análise de partículas, o emprego de técnicas *in-loco* sem a extração de amostras. As aplicações usuais, nos mais diferentes princípios de medição, referem-se à análise das partículas a partir da coleta de amostras no interior dos reatores e a posterior análise destas amostras. A necessidade de implementar o sistema de aquisição sem a extração de amostra ocasionou um esforço adicional no desenvolvimento do método, culminando na unidade denominada USMB, sem mencionar os aspectos inerentes à obtenção de imagens em movimento.

A instalação dos dispositivos e periféricos é um fator importante que merece cuidado especial. As medidas tomadas pelo método são micrométricas e alguns detalhes de instalação tais como: alinhamento, posicionamento, manutenção do foco e calibração são essenciais para uma aquisição e registro adequados. Após a aquisição dos dados referentes a esta tese, o sistema continuou sendo aprimorado e hoje conta com dispositivos, tais como o braço mecânico, mais adequados que agilizam o processo de aquisição.

Assim, o desenvolvimento do método consistiu na aquisição, tratamento e obtenção de tamanhos de partículas em movimento por meio de método não-intrusivo que emprega análise de imagem. O tema é complexo e, certamente, não se esgota na presente tese. No entanto, considera-se que este constituiu um importante passo na direção do aprimoramento das análises para a obtenção de sistemas de tratamento mais econômicos e eficientes.

O método desenvolvido foi aplicado em etapas posteriores à tese em um sistema de FAD em escala piloto (Capítulos 4 e 5). Avaliou-se a interferência da TAS na zona de reação e seu efeito na distribuição de tamanho de micro-bolhas (Capítulo 4), bem como o efeito do tamanho dos flocos, tempo de detenção na zona de reação e a TAS na zona de clarificação na eficiência da FAD (Capítulo 5). O ferramental desenvolvido forneceu subsídios importantes para a avaliação da interferência da distribuição de tamanho de partículas em sistemas de separação sólido/líquido por flotação.

A aplicação do método em unidades em escala real depende de diversos fatores relacionados às características particulares de cada sistema. No entanto, acredita-se que com adaptações adequadas nas instalações isso seja possível.

2.3 MÉTODO PARA UTILIZAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS DA SONDA MICROADV

2.3.1 Considerações Iniciais

Nesta seção da metodologia será apresentado o método para a aquisição, processamento e tratamento dos dados provenientes da sonda que emprega o princípio Doppler (Acoustic Doppler Velocimeter) microADV 16MHz marca Sontek

Para a fixação e posicionamento da sonda foi concebido um suporte especial. A aquisição e processamento dos dados foi realizada com o software fornecido pelo fabricante da sonda. Para tratamento dos dados foi desenvolvido pelo autor da tese, juntamente com o Eng Daniel Razera e a Doutora Eng Leila Jorge Patrizzi, um programa em linguagem *MatlabR12*.

2.3.2 Aquisição dos Dados

Para locação (posicionamento) da sonda nos pontos de interesse foi utilizado o suporte ilustrado na Figura 2.26. O MicroADV foi fixado na haste vertical do suporte que permitiu a translação e rotação em relação ao eixo horizontal bem como a movimentação na vertical. O ângulo foi medido através de transferidor instalado em uma das extremidades do suporte calibrado com prumo de ponta com fio de nylon. O valor do ângulo de aquisição foi tomado com auxílio de um *Laser point* instalado na parte superior da haste de fixação da sonda (Figura 2.26).

A coleta dos dados foi realizada através do *software* do ADV seguindo as recomendações feitas pelo fabricante (programa de diagnóstico: ADVCheck; nível de ruído: $SNR > 30$ e correlação entre medidas $C\% > 70\%$). Por ser essencial para a coleta de dados, apresenta-se uma breve descrição dos procedimentos adotados para a rotina de aquisição de dados. Entretanto, para informações mais detalhadas o manual do fabricante deve ser consultado.

É recomendado pelo fabricante que a rotina de coleta de dados seja sempre precedida pela verificação dos sinais (emitidos e recebidos), pela presença de barreiras aos sinais (paredes, fundo etc) assim como a integridade e funcionalidade da sonda e do hardware que compõem o sistema. Esta operação é efetuada através de programa de diagnóstico denominado *ADVCheck*. Os procedimentos para a realização desta etapa são apresentados a seguir:

Figura 2.26 Esquema do suporte para MicroADV e foto com vista geral e detalhe da leitura do ângulo de coleta de dados.

Passos para efetuar diagnóstico da sonda microADV (ADVCheck)

1- No *prompt DOS* digite:

```
C:\WINDOWS>cd..
```

```
C:\>cd adv
```

```
C:\ADV>advcheck 0 teste.txt
```

onde:

0 = número da sonda a ser checada (0-7)

*teste.txt = nome do arquivo de saída com extensão

*desta forma os resultados serão apresentados em forma de tabela com o sinal para cada receptor em função do tempo.

2- O programa será iniciado com a construção de gráfico conforme exemplo Figura 2.27.

Figura 2.27 Exemplo de resultado utilizando ADVCheck.

Inicialmente deve ser informado o tipo de sonda que está sendo utilizada para que o programa de diagnostico execute o algoritmo apropriado. Para tal, selecionar a letra correspondente a sonda utilizada na parte inferior da tela. A letra “S” corresponde a sonda empregada na presente pesquisa (microADVlab).

O funcionamento da sonda é verificado através da análise do gráfico fornecido pelo ADVCheck. A magnitude do sinal é plotada como função do tempo depois da emissão de um sinal acústico. Para a sonda utilizada, cada unidade de sinal corresponde a 0,43 dB e cada unidade de tempo corresponde a 0,6mm do emissor. A ocorrência dos dois primeiros picos indica o nível de sinal emitido e o recebido pelos três receptores, respectivamente. O último pico indica a detecção de bordas ou parede de fundo. O volume de amostragem é numericamente igual a área do segundo pico e a distância pode ser determinada multiplicando-se o intervalo de tempo entre o final do primeiro pico e o ponto de máximo do segundo pico por 0,6mm.

A alteração do comportamento apresentado na Figura 2.27 pode indicar mau funcionamento da sonda, baixa concentração de partículas, problemas nos receptores, danos físicos entre outros.

A Figura 2.28 ilustra a situação hipotética onde os sinais emitidos não são captados pelos receptores indicando mau funcionamento da sonda ou defeito no hardware.

Todas estas informações foram extraídas do manual do equipamento ou em contato direto com o fabricante todavia, não foram apresentados todos os possíveis

problemas oriundos do mau funcionamento da sonda. Assim, aconselha-se veementemente a leitura rigorosa do manual antes da aquisição de dados.

Figura 2.28 ADVCheck detectando problemas na recepção dos sinais. Outros exemplos podem ser verificados no manual do fabricante.

Após a verificação das condições de funcionamento da sonda o software de aquisição pode ser executado.

Aquisição de dados com a sonda microADV

No ambiente *DOS* (prompt *DOS*) digitar:

```
C:\WINDOWS>cd..
C:\>cd adv
C:\ADV>adv
```

A Figura 2.29 a apresenta a tela principal do software de aquisição de dados e os campos para entrada dos dados requeridos. Já a Figura 2.29 b, apresenta a segunda janela visual após a entrada de dados. Nesta, é confirmado o número da sonda, a distância do topo da sonda ao fundo (quando detectado), o volume de amostragem e a velocidade máxima de aquisição. Caso os dados não confirmem com o desejado, a tecla *ESC* deve ser pressionada para retornar a janela inicial.

Figura 2.29 Telas iniciais do software de aquisição de dados da sonda ADV. a) tela principal contendo dados de entrada. b) tela de confirmação dos dados e localização das bordas ou fundo.

Os dados são confirmados com a seleção da tecla *F10*. Posteriormente, a tela de aquisição de dados propriamente dita surgirá (Figura 2.30). Nesta tela, poderá ser selecionada/alterada:

- 1- a visualização dos dados da sonda através da tecla *F1* (caso haja mais de uma sonda sendo utilizada simultaneamente);
- 2- o intervalo de tempo para visualização do gráfico (*F2*);
- 3- a visualização da componente x, y ou z pode ser feita simultaneamente ou em separado (*F4*);
- 4- a escala do eixo das ordenadas, correspondente a velocidade pode ser alterada (*F5*).
- 5- um filtro para alterar cálculo da velocidade média (*F6*, ver manual para maiores detalhes);

- 6- pode-se marcar ou apagar um ponto qualquer (F7 ou F9, respectivamente);
- 7- o arquivo e o status da gravação podem ser visualizados;
- 8- pausa na aquisição (barra de espaço);
- 9- para voltar à tela inicial pressionar ALT+F10.

Figura 2.30 Tela de aquisição de dados da sonda ADV.

Além desses, podem ser visualizados: o arquivo no qual os dados estão sendo gravados, o tamanho do arquivo, espaço restante, velocidade instantânea, velocidade média, nível do sinal, correlação, tempo e número de amostragem, velocidade máxima adotada (existe uma margem de velocidade admitida superior a velocidade máxima adotada - ver manual) e localização das bordas ou fundo.

O tempo de amostragem para cada ponto deve ser adotado em função das condições de escoamento presente. Para escoamentos tendendo ao laminar podem ser adotados tempos de coleta menores dos que ocorrem quando o escoamento tende ao turbulento.

Para o estudo em questão, o tempo de 120seg foi escolhido de acordo com recomendações feitas por Lundh, Jönsson e Dahlquist (2000), que sugeriu coleta por tempo maior que 100seg. A frequência de amostragem foi de 50Hz, adotada de acordo com ensaios os complementares (Capítulo3). Os mesmos ensaios complementares validaram a utilização do MicroADV para as concentrações de micro-bolhas usuais no processo de FAD.

2.3.3 Processamento

Os pontos da malha investigada devem ser rodados um a um no *GETVEL* (programa que compõe o software de aquisição e que roda em ambiente DOS). No *GETVEL*, os sinais sonoros com extensão *.adv* são transformados em dados de velocidade com extensão *.vel*. Para tal, no diretório do adv devem ser digitados *getvel^nome do arquivo* tal como ele foi denominado no software de aquisição. Somente depois, estes arquivos podem ser lidos em qualquer editor que interprete a extensão *txt*.

Para rodar o programa *Getvel* digite no *prompt DOS*:

```
C:\ADV>getvel 310
      onde:
      310 = exemplo de nome do arquivo com extensão .adv
```

Assim, será indicado na tela o nome do arquivo de extração de dados, o nome do arquivo onde os dados serão gravados em extensão *txt*, a sonda utilizada e o número de amostras extraídas, que depende da frequência e tempo de amostragem.

Para o exemplo do arquivo 310.adv:

```
Extracting data from ADV file -----> 310.ADV
Writing Velocity data to file -----> 310.VEL
Extracting data for ADV probe(s) ---> 0
First Sample to extract -----> 1
Last Sample to extract -----> 999999999

Extracting Sample: 3052

<END OF FILE> found after 3051 samples have been extracted
C:\ADV>
```

2.3.4 Tratamento dos Dados em txt

Para tratamento dos dados obtidos com a sonda microADV, foi desenvolvido por Rodrigo Moruzzi, Leila Patrizzi e Daniel Razera, um programa em linguagem do *MatlabR12* nomeado *Veldigital3D*. O código fonte do programa não está disponível nesta tese pois está em processo de registro de software. O programa tem como ponto de partida os dados gerados em extensão *VEL* pelo microADV, possui interface simples e é executado utilizando cerca de 10 janelas visuais e 5 janelas de mensagens com cerca de 10 botões de comando. O objetivo foi proporcionar a visualização em três dimensões dos vetores resultantes da coleta de dados com a sonda microADV. Também é possível efetuar corte e visualização em qualquer

região de interesse da malha de vetores. Com os resultados, podem ser construídos gráficos de superfície em 3D e gráficos 2D nas seções de interesse, ambos com intensidades diferenciadas por barras coloridas. Existe a opção de compor os gráficos de vetores com o gráfico de intensidade em 2D, permitindo uma melhor visualização tridimensional dos resultados. A operação do programa é muito simples no entanto, os comandos não foram compilados e o *MatlabR12* deve ser executado para que o programa possa ser rodado.

O programa calcula o vetor resultante de cada ponto de coleta e plota convenientemente no esquema, de acordo com as coordenadas fornecidas pelo usuário. As coordenadas são determinadas em função da origem e cada ponto deve conter - no nome do arquivo - as informações referentes a sua posição.

O primeiro passo, após aquisição dos dados e rodar *GETVEL*, é re-nomear os arquivos referentes aos pontos de coleta, sempre pensando na origem definida no momento da aquisição dos dados.

O nome dos arquivos deve possuir um dos formatos:

1 *P*nro pto[^]**X**posição no eixo x em centímetros[^]**Y**posição no eixo y[^]**Z**posição no eixo z **ANG**ângulo em relação ao plano horizontal

ou

2 *P*nro pto[^]**dX** ou **dY** ou **dZ** deslocamento no eixo(x,y ou z) em relação a um outro pto de referencia **REFP**nro pto referência

ou

3 *P*nro pto[^]**dANG**deslocamento na direção do ângulo do pto de referência **REFP**nro pto referência

onde:

[^] = indica tecla espaço

nro pto = número do ponto

O ângulo refere-se ao equipamento modelo *MicroADV down-looking 3D*, operando na posição vertical. Caso o ângulo não seja informado, será considerado zero.

Após re-nomear os pontos com extensão VEL, o diretório contendo os arquivos re-nomeados devem ser copiados para a pasta *Matlab > Work > Veldigital31* (Figura 2.31)..

Figura 2.31 Pasta na qual os dados devem ser copiados para que possam ser tratados no software Veldigital3D.

Posteriormente, executar o *Matlab*. No campo denominado *Current Directory* do *MatLab*, deve-se entrar no diretório *Veldigital31*. Posteriormente, no campo denominado *Command Window*, do *MatLab* deve-se digitar *vel3d* (Figura 2.32).

Figura 2.32 Janela principal do *Matlab 6.0* onde deverá ser digitado o comando de execução do software *Veldigital3D*.

A janela primária do programa de visualização dos vetores será aberta. Esta janela possui quatro opções de entrada que devem ser desenvolvidas na ordem em

que aparecem, de cima para baixo. A operação descrita nessa seção da metodologia foi realizada utilizando-se um arquivo com extensão *vel* exemplo extraído de um ensaio real.

Sendo assim, escolher primeiro o botão *Definir Pontos* (Figura 2.33).

Figura 2.33 Janela primária do programa *Veldigital3D* onde deverá ser executado o primeiro passo para cálculo e leitura dos vetores resultantes.

A seguir, os arquivos contendo os pontos devem ser carregados a partir do diretório copiado para a pasta *work*. Opcionalmente, no menu *Configuração* da barra de tarefas, pode ser selecionado o tratamento que será dado aos pontos do arquivo (média aritmética, geométrica, maior e menor valor e mediana), de acordo com Figura 2.34. Posteriormente, seleciona-se a opção *Carregar pontos de arquivos*, onde deve ser informado o nome do diretório contendo os pontos. Surge então o quadro de status da leitura onde, neste período, serão conferidos todos os pontos que compõem a malha e calculados os vetores resultantes. Caso haja algum ponto incorreto (referência cruzada, erro na nomeação, ponto inexistente etc) a informação surge em uma caixa independente e os resultados não são lidos. Após a leitura dos dados, pode ser selecionada a opção de inversão dos eixos *x* e *z*, assim como a edição de qualquer ponto. A Figura 2.35 apresenta a sequência das etapas descritas.

Figura 2.34 Detalhe do tratamento estatístico dado aos pontos coletados.

Figura 2.35 Seqüência para carregar pontos do arquivo de extensão *vel*.

Caso não haja nenhum problema com o nome do arquivo, referência etc; a janela com os pontos carregados aparece em colunas contendo o nome dos pontos, coordenadas, componentes da velocidade e ângulo de coleta (Figura 2.36). Caso haja algum problema, aparece uma janela de aviso indicando o tipo de problema encontrado.

Nos casos onde a origem adotada para a malha de pontos não coincide com a orientação da sonda, o sentido dos eixos *x* e *z* podem ser alterados no programa (Figura 2.37). Opcionalmente, os pontos podem ser editados selecionando-se a opção *Editar pontos*.

Ponto	X	Y	Z	Vx	Vy	Vz	angulo
P1	40	0.5	12	1.0946	0.17094	-1.0869	20
P2	40	1	12	1.2089	0.1197	-0.98838	20
P3	40	1.5	12	1.273	-0.3312	-1.12	20
P4	40	2	12	1.592	0.027376	-0.95675	20
P5	40	2.5	12	1.4777	0.009670	-0.97467	20
P6	40	3	12	1.4755	0.096212	-0.87386	20
P7	40	3.5	12	0.87871	0.006231	-0.95494	20
P8	40	4	12	1.1302	0.067687	-1.0406	20
P9	40	4.5	12	1.3474	-0.10143	-0.97147	20
P10	40	5	12	1.2417	-0.19375	-0.67791	20
P11	40	5.5	12	1.0841	-0.16173	-0.72127	20
P12	40	6	12	0.8916	-0.20444	-0.96077	20
P13	40	6.5	12	1.0586	-0.14969	-1.0367	20
P14	40	7	12	0.82385	-0.16166	-0.78246	20
P15	40	7.5	12	0.94975	0.16573	-0.55702	20
P16	40	8	12	0.85675	0.14094	-0.6425	20
P17	40	8.5	12	0.82454	0.26073	-0.51464	20
P18	40	9	12	0.72735	0.15838	-0.41564	20
P19	40	9.5	12	0.439	0.50921	-0.23907	20
P20	40	10	12	0.71807	0.007613	-0.58013	20
P21	39.5	0.5	12	0.63613	-0.045787	-0.42881	20
P22	39.5	1	12	0.88506	-0.24807	-0.38172	20
P23	39.5	1.5	12	0.84029	0.022649	-0.31851	20
P24	39.5	2	12	0.56718	-0.08466	-0.299	20
P25	39.5	2.5	12	0.47817	-0.20957	-0.2803	20
P26	39.5	3	12	0.69573	0.018708	-0.42572	20
P27	39.5	3.5	12	0.84663	-0.21084	-0.37177	20
P28	39.5	4	12	0.75011	-0.045986	-0.49813	20
P29	39.5	4.5	12	0.47855	-0.056745	-0.15484	20
P30	39.5	5	12	0.59224	-0.017737	-0.50633	20
P31	39.5	5.5	12	0.71008	-0.10933	-0.46677	20
P32	39.5	6	12	0.73375	-0.1558	-0.31384	20
P33	39.5	6.5	12	0.59959	-0.088721	-0.43174	20
P34	39.5	7	12	0.71918	-0.20883	-0.50727	20
P35	39.5	7.5	12	0.50282	-0.33072	-0.37234	20
P36	39.5	8	12	0.54384	-0.13775	-0.29796	20
P37	39.5	8.5	12	0.366	0.10300	0.24300	20
P38	39.5	9	12	0.5738	0.10300	0.24300	20

Figura 2.36 Pontos carregados, calculados a partir da definição dada na Figura 2.34.

Figura 2.37 Inversão do sentido do eixo de acordo com definição de origem e aquisição dos dados adotada para a sonda.

Os pontos são confirmados com a tecla **OK**. Após, a janela primária aparece novamente e o segundo passo deve ser executado (Figura 2.38)

Figura 2.38 Janela primária do programa *Veldigital3D* onde deverá ser executado o segundo passo necessário para definição do esquema onde serão plotados os vetores.

O segundo passo caracteriza-se pela definição do esquema no qual os vetores resultantes serão plotados. Para tal, selecionar o botão de comando “Definir Esquema” (Figura 2.38). O desenho deve ser construído a partir do *MatlabR12*. O incremento do programa deve prever a leitura de dados importados de programas com extensão *dwg*.

A janela visual apresentada na Figura 2.39 é exibida. Nesta janela, deve ser definido o desenho e a origem da malha de vetores adotada. Após a definição do desenho (Figura 2.39a), a origem deve ser definida clicando em um dos vértices do desenho e escolhendo a opção *Definir Origem* (Figura 2.39b).

Figura 2.39 Janelas visuais para definição do desenho no qual os vetores resultantes são plotados. a) definição do esquema. b) definição da origem.

O terceiro passo consiste na visualização dos vetores resultantes calculados e locados nas etapas anteriores. Para isso, deve-se selecionar o botão de comando *Visualizar* na janela primária do programa (Figura 2.40).

Figura 2.40 Janela primária do programa *Veldigital3D* onde deve ser executado o terceiro passo necessário para a visualização dos vetores resultantes.

A janela da Figura 2.41 aparece. Nesta, o botão de comando *3D* deve ser selecionado para que os vetores sejam plotados no esquema definido.

Figura 2.41 Tela para visualização dos vetores resultantes em 3D.

Opcionalmente, o desenho e vetores podem ser configurados a partir do comando *Configuração* no menu de tarefas (Figura 2.42). O esquema pode ser rotacionado em torno do eixo vertical e horizontal a partir da seleção da barra de

rolagem localizada à esquerda. Os nomes e a posição dos eixos podem também podem ser alterados selecionando-se a opção “Move label”.

Figura 2.42 Opção para configuração dos gráficos e esquemas resultantes do tratamento dos dados da sonda microADV.

A partir do esquema gerado em 3D, podem ser efetuados cortes nos diferentes planos que compõem a malha definida pelos vetores resultantes (Figura 2.43 a e b).

a)

b)

Figura 2.43 Exemplos de possíveis cortes efetuados na malha de vetores. a) corte no plano xz; b) corte no plano yz.

Posteriormente, pode-se gerar uma figura a partir do esquema em 3D. As ferramentas para edição de figuras do *MatlabR12* podem ser utilizadas para alterar as características da figura gerada. A Figura 2.44 apresenta exemplo para

rotacionar o desenho livremente em torno dos eixos vertical e horizontal. A Figura 2.45 mostra exemplo onde foi utilizada a ferramenta “Zoom” para melhor visualização da malha de vetores resultantes. Após a geração e edição, a figura pode ser copiada e colada em editor de texto.

Figura 2.44 Exemplo de visualização gerada a partir do esquema 3D.

Figura 2.45 Escolha da opção *zoom* no menu de ferramentas para aproximar a visualização da malha de vetores resultantes.

Posteriormente, deve-se retornar à tela para visualização em 3D dos vetores resultantes e selecionar a opção de gráfico desejada. Para tal, selecionar a opção *Visualizar Gráficos* no menu de tarefas e indicar o tipo de gráfico de interesse (Figura 2.46).

Figura 2.46 Definição do tipo de gráfico de interesse.

Supondo-se que a opção *gráfico de superfície* foi escolhida, será plotado o gráfico em 3D da superfície que compõe a região de interesse, definida pela malha adotada (Figura 2.47). O gráfico é plotado com cores diferenciadas de acordo com a intensidade dos vetores velocidade resultantes na direção perpendicular ao plano selecionado.

Figura 2.47 Exemplo de gráfico de superfície para o plano xy.

Da mesma forma que para os vetores, pode-se gerar uma figura com base na superfície 3D plotada e editá-la com as ferramentas disponíveis no *MatlabR12* (Figura 2.48).

Figura 2.48 Exemplo de figura gerada a partir do gráfico de superfície.

Outro tipo de gráfico possível de ser gerado é o gráfico de contorno em um plano de interesse. O gráfico de contorno apresenta regiões segmentadas por cores diferenciadas de acordo com a intensidade da componente do vetor perpendicular ao plano selecionado, para cada ponto da malha (Figura 2.49). Alternativamente, o gráfico de contorno pode ser sobreposto pelos vetores resultantes naquele corte (Figura 2.50). Esta alternativa fornece uma visualização tridimensional no plano selecionado.

Figura 2.49 Exemplo de gráfico de contorno gerado a partir dos vetores resultantes.

Figura 2.50 Exemplo de sobreposição dos gráficos de contorno e de vetores resultantes para um determinado plano de interesse.

2.3.5 Considerações Finais a Respeito do Programa *Veldigital3D* Desenvolvido

Acredita-se que o programa *Veldigital3D* pode auxiliar potencialmente na visualização dos resultados obtidos com a sonda microADV. Através do programa, pode-se aprender a respeito da distribuição espacial dos vetores velocidade e gerar diferentes tipos de gráficos constituindo uma ferramenta poderosa para auxiliar nos estudos de hidrodinâmica em diferentes campos de aplicação.

Assim, a utilização do programa não deve ser considerada apenas para a obtenção de resultados no sistema para o qual este foi desenvolvido. A idealização do programa partiu do ponto de que era viável utilizá-lo nas mais diferentes áreas de pesquisa onde o emprego da sonda microADV fosse possível. Sua concepção foi baseada na busca de uma ferramenta simples que fornecesse um resultado visual possível de ser analisado espacialmente.

O desenvolvimento do programa consumiu cerca de 600 horas de dedicação divididas em 1 ano de trabalho para cada um dos seus três idealizadores. No entanto, seu desenvolvimento não foi esgotado nesta tese e futuras atualizações devem ser feitas à luz das diferentes aplicações possíveis, tais como a leitura de arquivos de desenho com outras extensões (dwg, tiff etc) para definição do esquema no qual os vetores são plotados.

3. ENSAIOS COMPLEMENTARES MICRO ADV**Resumo do Capítulo**

Este capítulo foi dividido em duas seções principais. Na primeira (seção 3.1), são apresentados os resultados referentes a avaliação da sonda microADV para efetuar medidas de velocidade no reator de flotação por ar dissolvido (FAD). Verificou-se a interferência do ar precipitado, na forma de micro-bolhas, nas medidas de velocidade efetuadas. Para tal, foram avaliadas diferentes concentrações de ar. Investigou-se também o valor adequado do parâmetro de entrada do programa de aquisição “frequência de amostragem”. Os ensaios demonstraram que é possível utilizar a sonda microADV na determinação quantitativa dos perfis de velocidade no interior do reator de FAD nas concentrações e ar investigadas.

Na segunda seção (3.2) são apresentados os resultados dos ensaios de obtenção dos vetores velocidade no interior da Unidade Separadora de Micro-bolhas (USMB) através da utilização do microADV. O tratamento dos dados foi realizado através do programa *Veldigital3D* desenvolvido em Matlab12 e apresentado no Capítulo 2, seção 3 desta tese. Foi investigada a taxa de aplicação superficial de 25 m/h com recirculação de água saturada de 10% ($p=0,10$). A malha virtual, composta de 776 pontos, correspondentes aos vetores velocidade, foi definida em função do alcance da sonda e a distância entre os pontos foi de 2cm. Para cada ponto efetuou-se coleta durante 120 segundos com frequência de 50Hz, conforme definido na seção 3.1 deste capítulo.

A sonda de ultra-som microADV conjugada ao programa desenvolvido (*Veldigital3D*) constituiu um importante instrumento para avaliação tridimensional do escoamento. Os resultados demonstraram que existe uma grande recirculação interna na USMB complementando os resultados obtidos nos ensaios de estímulo e resposta apresentados no Capítulo 4 desta tese. Em termos de eficiência global do processo de FAD, acredita-se que esta característica pode ser positiva, nos casos onde o choque entre as partículas e bolhas seja o fator limitante, e negativa nos casos onde a fragilidade dos flocos produzidos demande uma menor mistura para que não haja ruptura da ligação bolhas-floco. Dada a possibilidade de utilização da sonda microADV para a análise quantitativa dos dados - conforme apresentado na seção 3.1 deste capítulo - foi discutida a possibilidade de obtenção de parâmetros como intensidade de turbulência (u') e energia dissipada na massa líquida (K) como potenciais ferramentas para os estudos de turbulência.

3.1 AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO MICROADV PARA A FAD

3.1.1 Considerações Iniciais da Seção 3.1

O equipamento denominado ADV, da abreviação do termo em inglês *Acoustic Doppler Velocimeter*, utiliza ondas de som em uma dada frequência visando obtenção das componentes tridimensionais da velocidade segundo o princípio Doppler. O volume de controle é de 0,1 cm³ e a distância do emissor ao volume é de 5 cm. O equipamento trabalha em uma frequência de amostragem de até 50Hz e é padronizado para faixa de velocidade de ± 3 a ± 250 cm/seg, embora possa ser programado para trabalhar de 1mm/seg a 2,5m/seg. Maiores detalhes sobre esse equipamento podem ser encontrados no *site* da SonTek na Internet e seu endereço eletrônico consta na lista de referências como SonTek (2004).

O equipamento é composto basicamente por um emissor de ultra-som, três receptores (correspondentes às direções x, y e z) e um módulo eletrônico de processamento. O sinal gerado pelo emissor é refletido pelas partículas presentes no meio líquido para os receptores e utilizado para computar o sinal *Doppler* através do qual as componentes da velocidade são calculadas. A Figura 3.1 apresenta uma foto e um esquema da ponta da haste de amostragem ilustrando o sinal emitido, o volume de controle e os três receptores.

O fabricante destaca que não é necessária a visualização do fluxo, conforme os métodos que empregam imagem, e apresenta esta como uma das vantagens do equipamento. No entanto, o fluido deve conter material particulado suficiente para refletir o sinal gerado para os receptores. O programa *ADVcheck* (componente do software de aquisição) verifica os sinais e deve ser rodado antes de proceder a coleta de dados.

Figura 3.1 Foto e esquema ilustrativo da ponta da haste de amostragem do Micro ADV.
Fonte: Adaptado de SonTek (2004).

3.1.2 Questões Elaboradas para a Seção 3.1

A flotação por ar dissolvido (FAD) constitui-se em um sistema trifásico de micro-bolhas de ar e partículas em suspensão presentes em meio líquido. A separação sólido-líquido baseia-se no contato e na aderência das micro-bolhas com a fase sólida. Dessa

forma, a grande quantidade de ar presente na forma de micro-bolhas é uma característica inerente ao processo de FAD. Sendo assim, fez-se necessária a verificação da aplicabilidade e condições de uso do equipamento como ferramenta para caracterização do escoamento frente às particularidades da unidade de FAD. Especialmente para estes ensaios foram utilizadas somente bolhas de ar dispersas no meio líquido constituindo-se, portanto, em sistema bifásico.

A utilização do microADV foi verificada com base em duas principais questões:

- 1- Qual é a frequência adequada de amostragem do equipamento?
- 2- A alta concentração de micro-bolhas de ar presentes em unidades de FAD interfere nas medidas das velocidades?

Dados de entrada no software de aquisição do equipamento permitem utilizar frequências de amostragem (f_r) de 1 a 50Hz. É importante salientar que a frequência de trabalho do equipamento (f_s) é de 16MHz e a relação entre f_r e f_s é dada por: $f_r = f_s / N$, onde N é o número de amostras contidas no tempo $1/f_r$. A definição da frequência de amostragem correta depende das condições de escoamento.

Embora Vulgaris e Trowbridge (1998) reportaram grande precisão na medida de velocidades médias do escoamento turbulento utilizando microADV quando comparado à técnica que emprega o princípio do Laser Doppler Velocimeter (LDV), García et al. (2004) verificaram a aplicação do ADV para medidas de turbulência uma vez que estas condições foram consideradas críticas por Lohrman, Cabrera e Kraus. (1994) citados pelos autores. Para verificação da frequência adequada de aquisição foi desenvolvido um modelo conceitual que simulou a operação do instrumento e o espectro de energia associado com diferentes condições de vazão. Os autores chegaram a um parâmetro adimensional definido por $F = f_r \cdot L / U_c$ onde, L é definido como comprimento da macro-escala de turbulência e U_c é a velocidade média do fluido. Para valores de $F=20$ as velocidades obtidas apresentam, segundo os autores, erro desprezível. Para valores de $F=20$ os autores propuseram curvas denominadas *Acoustic Performance Curves* (APC) para estimar os valores das correções necessárias.

Quanto à segunda questão levantada, testes realizados por Lundh, Jönsson e Dahlquist (2000) indicaram uma redução de até 50% no valor da velocidade medida em água contendo grande concentração de micro-bolhas, quando comparada a água sem a presença de micro-bolhas. O sinal de velocidade foi induzido através do movimento oscilatório de um pêndulo sobre o qual o equipamento estava fixado. Os resultados apresentados não explicitaram sobre qual eixo esta influência foi verificada embora existam evidências de que os valores referem-se a resultante das componentes da velocidade nas três direções. Se assim o for, fica claro que a diferença deveria ser verificada uma vez que as micro-bolhas estão em constante movimento ascensional propiciando um escoamento diferenciado quando comparado a água sem micro-bolhas.

Portanto, a questão a ser analisada é se as micro-bolhas alteram a medida da velocidade e não as condições de escoamento.

Suposição levantada: As medidas dos vetores velocidade não são alteradas pela presença de micro-bolhas.

Objetivo específico da seção 3.1 deste capítulo: Validar a utilização do equipamento MicroADV na obtenção dos vetores velocidade na zona de reação da unidade piloto de FAD (USMB).

3.1.3 Metodologia Utilizada nos Ensaio da Seção 3.1

Antes da realização dos ensaios o programa *ADVCheck* era rodado e os resultados verificados de acordo com recomendações feitas pelo fabricante e observadas no Capítulo 2, seção 3 desta tese.

A velocidade média (U_c) foi obtida para a região mais crítica (menor seção) e o comprimento da macro-escala de turbulência foi estimado através de ensaios fotográficos utilizando traçador. O comprimento da macro-escala foi então determinado utilizando o programa (*freeware Image-Tool 3.0®*) de tratamento de imagem calibrado através de uma dimensão conhecida.

Vale salientar que a intenção foi estimar o valor de F , de preferência com um certo coeficiente de segurança, a luz dos resultados apresentados por Garcia et al. (2004), e não obter o valor preciso de F uma vez que tais resultados demandariam tempo adicional e fugiriam do escopo do trabalho e da competência do autor da presente tese.

Visando averiguar os resultados apresentados por Lundh, Jönsson e Dahlquist (2000), foi realizado o ensaio descrito a seguir:

- a- Foi construído um pendulo sobre o qual o microAdv foi fixado (Figura 3.2);
- b- O conjunto (pendulo+ADV) foi fixado sobre um tanque completado com água de modo que a haste do ADV ficasse parcialmente submersa;
- c- A haste do pendulo foi posicionada e depois liberada em um ponto pré-definido de modo que produzisse um movimento oscilatório na direção orientada pelo eixo x;
- d- Os ensaios foram repetidos dez vezes para cada condição (0; 125; 250 e 500 mg ar/min) correspondentes com segurança, as faixas utilizadas na unidade piloto de FAD investigada.

Figura 3.2 a) Esquema ilustrativo dos ensaios realizados visando verificar a interferência das micro-bolhas nas medidas de velocidade, b) Fotografia do topo da haste da sonda submersa em meio à micro-bolhas dispersas na massa líquida, responsável pela aparência acinzentada da água.

Assim, foi verificada a interferência das micro-bolhas na medida de uma velocidade definida a partir do movimento oscilatório do pendulo. Analisando somente os picos de velocidade na direção do eixo x foi possível verificar se houve, ou não, alteração no valor da velocidade medida pois, nestas condições, a velocidade ascensional das micro-bolhas é perpendicular à direção x.

A alteração da resistência do movimento devido a variação da densidade do fluido foi desprezada. Os resultados apresentados no item 3.1.4 deixaram claro que a variação da densidade não interferiu nas medidas tendo em vista que as variações encontradas para uma mesma situação foram maiores do que a interferência da densidade poderia influenciar, com base na acuracidade do equipamento utilizado.

3.1.4 Resultados e Discussão Específicos da Seção 3.1

3.1.4.1 A questão da frequência de amostragem

Conforme exposto anteriormente, a equação proposta por Garcia et al. (2004) pressupõem a obtenção do comprimento da macro-escala de turbulência (L) e da velocidade advectiva (U_c). A Figura 3.3 apresenta algumas das imagens adquiridas visando estimativa do comprimento da macro-escala de turbulência (L).

Figura 3.3 Algumas imagens adquiridas visando estimativa do comprimento da macro-escala de turbulência (L).

Com base nos resultados destes de ensaios adotou-se o valor de L de 15 cm (menor valor) para que os resultados ficassem dentro de considerável margem de segurança. A maior velocidade calculada (U_c) foi de 3cm/s. Assim, $L/U_c=5s$ o que garante uma frequência de amostragem (f_s) de apenas 4Hz de modo que a condição $F=20$ fosse satisfeita, de acordo com recomendação feita por Garcia et al. (2004). No entanto, a

freqüência (f_s) adotada durante os ensaios foi de 50Hz ($F=250 \gg 20$), o que garantiu uma amostragem com erro menor que 1% de acordo com dados do fabricante.

3.1.4.2 A questão da interferência das micro-bolhas nas medidas de velocidade

A figura 3.4 apresenta os resultados dos 10 ensaios realizados para cada condição de concentração de ar no tanque. Observa-se a grande coincidência de comportamento das curvas para as diferentes condições investigadas o que, a princípio pode representar que as micro-bolhas não interferem nas medidas de velocidade do pêndulo na direção do eixo x.

Figura 3.4 Gráfico geral com o conjunto de resultados obtidos por condição investigada. a) sem micro-bolhas; b) 125mg_{ar}/min; c) 250mg_{ar}/min e, d) 500mg_{ar}/min. Os valores plotados referem-se as velocidades obtidas pelo ADV no eixo x.

No entanto, um olhar mais detalhado permite observar que existe uma variação nas medidas efetuadas tanto para diferentes condições quanto para uma mesma condição pesquisada (Tabela 3.1 e Figura 3.5). Assim fez-se necessária a análise estatística dos resultados com base nos valores médios obtidos das 10 medidas para cada caso. Para tal, procedeu-se da seguinte forma: foram identificados os valores pico da velocidade na direção do eixo x (positivo e negativo) de cada ensaio e deles foram obtidas as médias correspondentes. Os resultados foram plotados em gráfico onde o eixo das abscissas continha os valores médios dos picos correspondentes ao ensaio sem a adição de micro-bolhas e as ordenadas continham os valores dos picos para as demais condições (com diferentes concentrações de ar). A figura 3.6 contém os referidos valores.

Figura 3.5 Resultados dos ensaios do pendulo: a) sem micro-bolhas; b) 125mg_{ar}/min; c) 250mg_{ar}/min e, d) 500mg_{ar}/min. Os valores plotados referem-se às velocidades obtidas pelo ADV no eixo x.

Tabela 3.1 - Valores dos picos de velocidade no eixo x para as diferentes condições investigadas. Para cada condição foram realizados 10 ensaios.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	média picos sem bolha	desvio padrão	int	confiança 95%
50,25	50,38	47,76	50,4	48,2	48,27	49,57	49,29	48,68	47,73	49,053	1,066333802	0,66090799	
48,2	42,99	46,09	45,97	42,07	47,81	45,13	44,16	47,58	45,66	45,586	2,043271886	1,266408991	
46,37	38,05	43,7	40,47	36,83	45,63	40,36	40,73	43,86	44,93	42,093	3,26762928	2,02525158	
41,84	32,98	40,66	36,02	32,22	45,31	37,29	37,83	40,9	43,85	38,89	4,384708276	2,717618748	
37,57	27,17	38,7	29,82	24,81	36,23	31,41	27,96	39,9	30,38	32,395	5,309624908	3,290877132	
-33,15	-32,89	-30,97	-31,58	-33,62	-29,48	-29,65	-29,03	-31,91	-30,46	-31,274	1,625458568	1,00745053	
-33,13	-30,14	-29,66	-29,19	-33,51	-28,43	-24,1	-27,78	-30,47	-30,34	-29,675	2,674817751	1,657837742	
26,83	26,36	25,87	25,21	24,62	26,84	27,28	25,07	25,99	27,57	26,164	0,98707424	0,611783337	
26,21	25,23	25,13	24,05	24,88	25,02	24,38	22,27	24,78	24,78	24,708	1,027469058	0,63681735	
-13,09	-12,92	-12,42	-15,01	-18,55	-11,83	-13,46	-13,46	-12,6	-14,4	-14,792	3,59590755	2,228724275	
-12,79	-12,58	-11,4	-14,45	-15,47	-11,76	-12,37	-12,78	-12,52	-13,71	-12,983	1,233712104	0,764648166	
5,55	5,11	5,9	3,48	3,41	4,22	4,22	6,13	4,97	5,57	4,856	0,976171024	0,604992113	
5,31	5,08	5,54	3,02	3,04	4,13	3,71	5,77	4,29	5,21	4,51	1,017469628	0,630622236	
-1,84	-1,9	-1,01	-1,31	-1,56	-2,75	-2,16	-2,13	-3,19	-2,35	-2,02	0,651920241	0,40405668	
1,97	1,94	1,31	1,62	1,36	2,5	0,35	1,74	1,23	1,5	1,552	0,568678781	0,352464068	
-1,11	-1,44	-0,87	-0,9	-1,22	-0,86	-0,83	-1,33	-0,33	-0,94	-0,963	0,314114275	0,194686348	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	bolha 1l/min	desvio padrão	int	confiança 95%
44,73	50,94	38,72	49,01	48,24	52,61	48,81	49,72	49,52	50,49	48,279	3,931797582	2,436907121	
43,2	35,77	35,85	41,57	49,71	49,68	41,03	47,06	39,3	50,26	43,343	5,584824776	3,461444538	
38,69	31,15	35,68	37,81	48,34	47,17	36,43	40,96	38,06	49,57	40,386	6,073500181	3,764322941	
35,73	25,61	29,92	32,92	39,12	44,52	29,3	34,73	36,25	46,64	35,474	6,614889266	4,099873002	
35,96	20,38	24,98	26,98	37,57	43,4	25,71	29,44	31,55	38,72	31,429	7,237110304	4,485522275	
-38,46	-36,42	-33,92	-34,12	-29,19	-34,59	-38,65	-31,95	-33,77	-32,31	-34,338	2,922034299	1,811061237	
-33,14	-27,92	-27,95	-32,95	-27,2	-32,87	-36,28	-28,47	-32,77	-31,01	-31,056	3,027445568	1,876394577	
-31,87	-27,39	-26,14	-29,79	-24,23	-31,48	-34,15	-25,61	-30,37	-28,61	-28,964	3,136995024	1,944292744	
-28,87	-25,42	-22,71	-27,87	-22,91	-28,07	-32,14	-23,26	-28,19	-26,37	-26,581	3,045796557	1,887768422	
24,52	24,72	24,94	25,36	26,11	25,87	25,56	25,52	24,56	24,79	25,195	0,564943458	0,350148935	
24,47	24,22	24,64	25,02	25,78	25,53	24,85	24,71	24,45	24,57	24,824	0,493608032	0,305935619	
-12,68	-15,16	-14,32	-14,38	-13,16	-12,29	-12,63	-14,07	-13,06	-12,4	-13,415	0,99261999	0,615220563	
-12,36	-14,55	-13,57	-14,04	-12,9	-12,23	-12,09	-13,6	-12,57	-11,4	-12,97	0,91350834	0,566184668	
5,42	4,68	5,76	6,42	7,33	4,08	5,67	5,48	4,89	3,8	5,353	1,055851947	0,654411392	
4,63	4,65	5,48	6,05	6,61	3,9	5,42	5,4	4,74	3,77	5,065	0,89870586	0,557013087	
-1,27	-2,71	-1,23	-1,83	-0,44	-0,92	-1,08	-1,97	-1,1	-0,98	-1,353	0,647251454	0,401162991	
-1,17	-2,35	-0,87	-1,51	-0,29	-1,66	-0,68	-1,93	-0,94	-0,83	-1,223	0,629868593	0,390389186	
-1,11	-2,32	-0,76	-1,43	0,36	-1,55	-0,63	-1,75	-0,94	-0,18	-1,03	0,782687677	0,485105638	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	bolha 2l/min	desvio padrão	int	confiança 95%
50,97	51,2	50,94	48,31	48,94	50,45	50,28	49,13	50,3	49,19	50,001	1,045224234	0,648010386	
50,75	50,17	50,83	45,92	48,38	49,75	42,47	48,5	50,05	46,24	48,306	2,687589585	1,665753656	
47,54	49,87	48,95	45,87	47,19	49,19	41,06	39,99	49,81	44,21	46,368	3,567597386	2,211177787	
47,15	38,08	45,04	44,78	42,9	48,57	36,83	36,16	47,68	32,71	41,99	5,99938492	3,470811938	
45,8	37,03	42,94	43,18	39,67	41,18	33,53	32,88	43,76	27,27	38,724	5,917790879	3,667815149	
-33,73	-34,1	-37,2	-34,9	-32,02	-36,32	-34,38	-37,41	-38,34	-33,7	-35,21	2,01364236	1,24804477	
-32,94	-32,93	-33,87	-31,78	-30,4	-30,1	-33,25	-36,71	-37,77	-32,14	-33,189	2,458221805	1,523592733	
-31,84	-29,64	-32,4	-30,39	-27,68	-29,84	-33,17	-34,32	-34,8	-30,37	-31,445	2,256921453	1,38882785	
-29,38	-27,3	-30,31	-27,98	-26,16	-26,67	-30,12	-32,83	-30,19	-28,1	-28,904	2,038954153	1,262493294	
24,62	24,24	25,05	24,96	24,96	26,02	26,11	24,7	25,1	25,22	25,098	0,582385897	0,360959666	
23,43	23,65	24,56	24,95	24,3	24,3	26,04	24,3	24,73	24,31	24,457	0,717682226	0,444815607	
-13,7	-12,94	-12,23	-13,96	-14,08	-11,22	-15,46	-13,25	-13,76	-12,32	-13,292	1,185296962	0,73464072	
-12,89	-12,64	-12,01	-12,79	-14,07	-10,95	-14,55	-11,71	-13,18	-12,07	-12,686	1,07967279	0,669175423	
4,36	4	5,44	5,31	5,13	5,9	5,44	5,25	5,38	5,06	5,127	0,554678085	0,343786512	
4,18	3,85	4,87	5,21	4,17	5,63	4,61	5,07	5,16	5	4,775	0,559568286	0,346817432	
0,45	0,44	0,78	1,22	1,17	1,54	1,08	1,9	1,4	1,63	1,161	0,488477226	0,302755573	
-1,21	-1,3	-1,18	-1,32	-1,83	-0,07	-1,77	-0,55	-0,99	0,12	-1,01	0,655879393	0,406510541	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	bolha 4l/min	desvio padrão	int	confiança 95%
45,2	48,97	50,47	51,81	50,61	50,31	48,7	49,93	47,86	52,99	49,685	2,16765234	1,343499331	
37,34	39,86	47,89	51,27	49,29	47,7	47,05	49,83	38,73	52,27	46,103	5,457730603	3,382672249	
32,7	34,13	42,9	42,18	39,93	44,45	43,67	43,72	32,27	50,35	40,63	5,87773955	3,642991549	
32,35	28,95	42,53	37,6	32,55	42,21	40,38	43,13	32,27	44,11	37,608	6,602998817	3,472707472	
28,54	23,71	40,28	34,65	29,08	38,44	39,63	42,32	27,29	37,11	34,105	6,454816031	4,000660467	
-39,59	-30,58	-39,83	-35,34	-34,22	-33,35	-35,93	-38,12	-33,96	-35,61	-35,653	2,88998827	1,791205477	
-31,33	-29,62	-38,15	-32,37	-30,98	-31,73	-32,44	-31,05	-32,07	-33,48	-32,322	2,295903598	1,422988776	
-29,67	-28,08	-37,23	-29,9	-29,41	-28,8	-30,75	-28,5	-29,9	-30,9	-30,314	2,592999979	1,607127524	
-28,14	-24,78	-34,98	-28,78	-26,78	-27	-30,63	-26,15	-29,05	-28,85	-28,514	2,8230724	1,749725181	
-24,98	-23,39	-13,3	-27,13	-25,71	-24,57	-27,19	-25,35	-26,73	-26,73	-26,297	2,518712414	1,561084488	
26,16	27,97	26,85	28	26,67	25,61	28,44	26,21	26,26	26,05	26,822	0,974164029	0,603781657	
25,85	26,32	26,74	27,07	25,2	24,97	27,65	26,04	24,95	25,05	25,984	0,957127647	0,593225999	
-14,8	-14,47	-14,33	-13,14	-13,99	-13,9	-14,11	-13,08	-12,77	-14,04	-13,863	0,68686403	0,408250311	
-14,74	-14,08	-13,77	-12,76	-13,89	-13,05	-12,73	-12,49	-12,61	-12,85	-13,297	0,764824599	0,474034197	
5,34	8,74	8,24	9,31	8,41	6,62	7,35	6,83	8,22	8,62	7,768	1,209010615	0,749338315	
4,75	7,59	8,17	7,41	8,04	6,49	6,52	4,38	7,49	8,16	6,9	1,369095403	0,848558011	
4,75	4,82	4,93	4,98	4,64	4,45	4,44	4,38	4,59	4,48	4,646	0,214900494	0,133194177	
-1,75	-1,5	-1,01	-0,81	-0,84	-1,28	-1,32	-1,55	-0,65	-0,46	-1,117	0,426198862	0,264155838	

Tabela 3.2 - Valores médios dos picos de velocidade no eixo x

média picos						
bolha 0l/min	bolha 1l/min	bolha 2l/min	bolha 4l/min	desvio padrão	int confiança 95%	
49,053	48,279	50,001	49,685	0,760437374	0,745214478	
45,586	43,343	48,306	46,103	2,037132707	1,99635215	
42,093	40,386	46,368	40,63	2,770354174	2,714895545	
38,89	35,474	41,99	37,608	2,725446691	2,670887047	
32,395	31,429	38,724	34,105	3,235566141	3,170794616	
-31,274	-34,338	-35,21	-35,653	1,973611136	1,934102192	
-29,675	-28,964	-31,445	-30,314	1,052923074	1,031845022	
26,164	25,195	25,098	26,822	0,823457902	0,806973423	
24,708	24,824	24,457	25,984	0,678027224	0,664454064	
-14,792	-13,415	-13,292	-13,863	0,680137486	0,666522082	
-12,983	-12,97	-12,686	-13,297	0,249646417	0,244648843	
4,856	5,353	5,127	7,768	1,343452517	1,31655847	
4,51	5,065	4,775	4,646	0,236827645	0,232086685	
-0,983	-1,03	-1,01	-1,117	0,057959756	0,056799483

Figura 3.6 Valores médios dos picos de velocidade para diferentes vazões de ar nos ensaios que envolveram a verificação do ADV para obtenção de medidas no tanque de FAD. As vazões de 1, 2 e 4 l/min de água saturada correspondem a 0; 125; 250 e 500 mg ar/min, respectivamente.

Pelos resultados apresentados na Figura 3.6 ficou claro que existe grande coincidência entre as médias dos 10 valores medidos para cada situação investigada indicando que não houve interferência na média dos vetores velocidade medidos. No entanto, julgou-se conveniente verificar as diferenças encontradas entre as medidas efetuadas para as diferentes situações e contrapô-las com as diferenças entre as medidas de uma mesma situação. A Figura 3.7 mostra que os resultados dos diferentes pontos plotados com o intervalo de confiança de 95% para a média foram

estatisticamente iguais uma vez que cada ponto, nas quatro condições, esta dentro do intervalo de confiança, para cada velocidade investigada.

Figura 3.7 Resultados dos picos de velocidade na direção do eixo x plotados com intervalo de confiança de 95% em relação a média de cada medida. As vazões de 1, 2 e 4 l/min de água saturada correspondem a 0; 125; 250 e 500 mg ar/min, respectivamente.

3.1.5 Conclusões referentes à seção 3.1

Os resultados apresentados nesta seção do Capítulo 3 permitem concluir que:

- ✓ a frequência de amostragem de 50 Hz pode ser utilizada, com grande segurança, nos ensaios com o microADV visando determinar as condições de escoamento da zona de reação da unidade piloto de FAD.
- ✓ o microADV pode ser utilizado para as determinações quantitativas dos vetores velocidade nas regiões de interesse do tanque de FAD sem que haja interferência na medida causada pela concentração de micro-bolhas nas faixas investigadas na presente pesquisa.

3.2 ENSAIOS COM O MICROADV NA ZONA DE REAÇÃO DENOMINADA UNIDADE SEPARADORA DE MICRO-BOLHAS (USMB)

3.2.1 Considerações Iniciais da seção 3.2

A característica do escoamento na zona de reação de uma unidade de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) é de suma importância para a eficiência do processo. Nessa região do tanque ocorre o contato entre as partículas sólidas (flocos) e as micro-bolhas de ar. O contato entre as fases sólida e gasosa é condição necessária para que as partículas sejam removidas pois, o conjunto bolhas-floco deve ganhar velocidade ascensional suficiente para sobrepujar as linhas de corrente do escoamento. A modelação matemática proposta por Reali (1991) pressupõe que esta velocidade terminal deve ser atingida no final da zona de reação.

A importância do tema não gerou, no entanto, um número suficiente de trabalhos para elucidar as principais questões pertinentes a esse assunto. Lundh, Jönsson e Dahlquist (2002), apresentaram um mapeamento da zona de reação utilizando o mesmo equipamento utilizado nesta pesquisa. Embora tenha sido recomendada uma faixa de valores em termos de taxa de aplicação superficial, os autores analisaram os resultados majoritariamente pelo ponto de vista qualitativo, uma vez que defenderam que o microADV não foi acurado nas medidas de velocidade em água contendo altas concentrações de micro-bolhas. Assim, as conclusões apresentadas convergiram para as mesmas extraídas por Shawwa e Smith (1998) utilizando ensaios do tipo estímulo e resposta: a zona de reação possui regiões com escoamentos distintos. A parte inferior caracterizada por intensa mistura e a parte superior com escoamento tendendo ao pistonado.

Avaliou-se nesta seção do Capítulo 3 o comportamento do escoamento no interior da zona de reação denominada USMB através da análise dos vetores velocidade resultante em malha virtual definida. Os dados foram extraídos utilizando-se da sonda de ultrassom microADV da SonTek. Os resultados apresentados foram gerados, a partir dos dados obtidos, com o programa denominado *Veldigital3D*, desenvolvido nesta tese e apresentado no Capítulo 2, seção 2.3. A utilização do microADV em água rica em micro-bolhas de ar foi avaliada e os resultados encontram-se apresentados na seção 3.1 deste capítulo.

Objetivo específico da seção 3.2 deste capítulo: Determinar a malha de vetores velocidade no interior da zona de reação (USMB).

3.2.2 Metodologia Utilizada nos Ensaio da Seção 3.2

O mapeamento dos vetores no interior da Unidade Separadora de Micro-Bolhas (USMB) foi realizado utilizando-se a sonda microADV16MHz marca Sontek. Os procedimentos de coleta, processamento e tratamento dos dados encontram-se detalhadamente descritos no Capítulo 2, seção 3 desta tese. O volume de amostragem é situado, para o caso específico desta sonda (microADV), a 5cm do topo da haste e o posicionamento da sonda foi baseado no sistema de coordenada x, y e z bem como no ângulo de rotação em torno de y (z é a profundidade, y é a largura e x é a coordenada longitudinal). O método é intrusivo, sendo assim a malha virtual de pontos no interior da USMB foi definida em função da distância adotada entre os pontos (2cm) e das dimensões da unidade, que limitaram o acesso pleno a todas as regiões da USMB. No total foram coletados 776 pontos, cada um com tempo de coleta de 120 segundos, segundo recomendações feitas por Lundh, Jönsson e Dahlquist (2002). A frequência de amostragem do equipamento foi de 50Hz, definida de acordo com ensaios apresentados na seção 3.1 deste capítulo. A investigação demandou cerca de 80 horas de coleta de dados ininterruptas e o tratamento dos dados exigiu cerca de 30 dias.

A vazão afluenta (655 l/h) foi distribuída ao longo da largura da unidade através de tubulação perfurada na porção inferior da USMB, resultando no valor de $TAS_{z,r}$ de 25 m/h e $td_{z,r}$ de $2,50 \times 10^{-2}h$. A vazão de água saturada (1,1 l/min), proveniente da câmara de saturação, foi adicionada de modo que a recirculação (v/v) fosse de 10% (p 0,10). A coleta da água foi efetuada com tubulação perfurada localizada na parte superior da USMB (Figura 3.8).

Os resultados foram apresentados na forma de vetores resultantes, proporcionais a intensidade. Alternativamente, foram construídos os gráficos de superfície (3D) e de contornos (2D) conjugados com os vetores resultantes.

Figura 3.8 Croquis da vista lateral da Unidade Separadora de Micro-bolhas (USMB) com equipamento microADV utilizado para determinar os vetores velocidade.

3.2.3 Resultados e Discussão Específicos da Seção 3.2

Os resultados dos ensaios de estímulo e resposta são apresentados na Figura 3.9. Nesta verificam-se as curvas normalizadas e a relação entre o valor de E_θ do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de E_θ experimental referentes aos ensaios na USMB para a $TAS_{z,r}$ de 25 m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $2,5 \times 10^{-2}$ h para a recirculação (p) de 0,10. O aparecimento de longa cauda indica que a unidade possuía zona morta ou recirculação interna.

Observa-se que $s^2=0,38$ indicando, de acordo com Levenspiel (1999), uma tendência ao escoamento pistonado. Da mesma forma, verifica-se que a zona de reação (USMB) possui uma certa fração com escoamento pistonado da ordem de 50% pois $T_{modal}/T_{real} \sim 0,50$.

O tempo real (TDH) obtido foi sempre maior que o tempo teórico da ordem de: $TDH = Td_{z,r} \text{teórico} \times (2,5 \pm 0,02)$, causado principalmente pelo alongamento da cauda do gráfico.

Pela Figura 3.9 verifica-se também que o modelo de tanques em série (N-CSTR) forneceu um bom ajuste para estes resultados experimentais e o número de tanques em série foi 3.

Figura 3.9 Resultados dos ensaios de estímulo e resposta com a adição de NaCl no modo pulso. a) curva experimental e ajuste aos modelos de tanques em série, grande e pequena dispersão. b) resultados experimentais e do modelo de tanques em série. Contem tabela com resultados de variância, número de tanques e dispersão.

A Figura 3.10 mostra uma visão geral do resultado do mapeamento dos vetores velocidade no interior da USMB e a Figura 3.11 apresenta os mesmos resultados em maior detalhe.

Figura 3.10 Visão geral dos resultados obtidos através do mapeamento dos vetores velocidade no interior da USMB.

Figura 3.11 Detalhe da malha de vetores obtida com o microADV e tratada com o programa *Veldigital3D*.

Pela Figura 3.11, verifica-se claramente que existe recirculação no interior da USMB, confirmando que o alongamento da cauda da curva foi efeito da recirculação interna do fluxo. Após a entrada, o fluxo foi conduzido no sentido da placa defletora e foi forçado para cima. O choque com a placa produziu uma região de recirculação na porção inferior da unidade, no sentido da entrada (não medida com o microADV). Os vetores resultantes próximos à placa defletora (à direita) estão todos apontados no sentido da entrada, como consequência da recirculação. O contato com a massa de água em sentido oposto produziu uma região de mistura acentuada na porção central da USMB. A porção oposta (à esquerda) contém a maioria dos vetores no sentido da saída. Embora estes resultados referem-se apenas a uma situação investigada, este padrão de recirculação foi observado em todos os ensaios efetuados com a USMB, através da adição de traçador (rodamina) e registro fotográfico. Como os resultados foram plotados em proporção, foi possível verificar que a intensidade dos vetores resultantes foi menor na porção central.

Os resultados podem ser visualizados em diferentes planos de corte, de acordo com a região de interesse. As Figuras 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15 apresentam os planos de corte longitudinais referentes às posições y iguais a 5, 7, 13 e 19 cm, respectivamente.

Figura 3.12 Corte longitudinal da malha de vetores na posição $y=5$.

Figura 3.13 Corte longitudinal da malha de vetores na posição $y=7$.

Figura 3.14 Corte longitudinal da malha de vetores na posição $y=13$.

Figura 3.15 Corte longitudinal da malha de vetores na posição $y=19$.

Os resultados apresentados nas Figuras 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15 indicaram um padrão de recirculação bastante homogêneo nas diferentes posições de corte. Houve sempre um fluxo de retorno na proximidade da placa defletora. Como referência, pode-se observar a intensidade do vetor, à esquerda de cada figura apresentada. Verificou-se que a porção de corte central ($y=13\text{cm}$) apresentou o vetor com maior módulo, provavelmente decorrente do da diminuição do efeito de parede.

As Figuras 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20 apresentam cortes transversais, no plano definido por z . Cada figura contém o gráfico de superfície 3D, o corte na USMB com os vetores correspondentes e o gráfico de contorno (intensidade em 2D) conjugado com as componentes x e y dos vetores naquele plano. A cor vermelha refere-se a maior intensidade no sentido da saída (sobe) e a cor azul, a menor no sentido da entrada (desce).

Figura 3.16 Corte transversal correspondente a posição $z = -5.84 \text{ cm}$.

Figura 3.17 Corte transversal correspondente a posição $z = -0.04$ cm.

Figura 3.18 Corte transversal correspondente a posição $z = 5.75 \text{ cm}$.

Figura 3.19 Corte transversal correspondente a posição $z = 9.61 \text{ cm}$.

Figura 3.20 Corte transversal correspondente a posição $z = 19.27 \text{ cm}$.

É incontestável, pela análise dos gráficos de intensidade plotados conjuntamente com as componentes dos vetores, o fato de que existe uma recirculação transversal (plano x,y) do fluxo no interior da USMB. A mudança de sentido no fluxo transversal foi mais acentuada na seção superior (maiores valores de z), mais próximo a saída da unidade. Quanto ao escoamento vertical (no sentido de z), confirmou-se que o fluxo de retorno (no sentido da entrada-cor azul) foi mais acentuado nas proximidades da placa defletora da unidade.

Diferentemente dos resultados apresentados por Shawwa e Smith (1998) e daqueles apresentados por Lundh, Jönsson e Dahlquist (2002), o escoamento não demonstrou uma tendência ao pistonado nas seções superiores da unidade. Ao contrário, o escoamento no interior da zona de reação (USMB) demonstrou-se com um padrão de recirculação interna, ao longo da altura e da largura, bastante definido. Atribuiu-se isto a diferente geometria da USMB quando comparada com as demais unidades estudadas pelos referidos autores. Shawwa e Smith (1998), estudaram uma coluna de 10cm de diâmetro e 100cm de altura e Lundh, Jönsson e Dahlquist (2002) investigou uma zona de reação com placa defletora a 90° (altura de 60 a 110cm) e seção transversal constante (largura fixa de 16, 24 ou 36cm). Na unidade investigada nesta pesquisa (USMB), a seção transversal variou com a altura. Esta característica diferenciada ocorreu devido às particularidades do estudo a respeito da distribuição de tamanho das micro-bolhas (DTMB) e determinou um diferente padrão de escoamento no interior da unidade.

Em termos de eficiência global do processo de FAD, acredita-se que esta característica pode ser positiva, nos casos onde o choque entre as partículas e bolhas seja o fator limitante, e negativa nos casos onde a fragilidade dos flocos produzidos demande uma menor mistura para que não haja ruptura da ligação bolhas-floco. Além disso, supõe-se que o estreitamento da seção transversal da USMB resultou em maior velocidade crossflow resultando em um efeito benéfico ao desempenho do processo pois, de acordo com Lundh, Jönsson e Dahlquist (2002) recomenda-se valores de crossflow maiores que 65 m/h para beneficiar a distribuição do escoamento na zona de clarificação. Aconselha-se o estudo criterioso de cada situação e recomenda-se a investigação de duas conformações distintas na zona de reação: uma com escoamento tendendo a mistura completa e outra com escoamento tendendo ao pistonado. Desta forma o desempenho da FAD poderá ser avaliado com base nessas duas alternativas.

3.2.4 Extrapolação do Uso da Sonda Micro-ADV Conjugada ao Programa Desenvolvido *VelDigital3D* para Avaliação das Condições de Escoamento na FAD

Em contraposição aos ensaios apresentados por Lundh, Jönsson e Dahlquist (2002), os resultados apresentados na seção 3.1, deste capítulo, demonstraram que foi possível utilizar a sonda microADV para medidas quantitativas do escoamento na presença de micro-bolhas. Assim, seria possível determinar alguns parâmetros tais como: intensidade de turbulência (u'), vorticidade, energia cinética turbulenta dissipada (k), taxa de dissipação de k e até o valor do gradiente médio de velocidade em uma determinada seção da unidade.

Apesar de, na maioria dos casos, provavelmente o volume de amostragem do equipamento apresenta-se maior que o valor da micro-escala de turbulência (λ), acredita-se que seria possível inferir o valor do gradiente médio de velocidade (G_m) a partir da diferença entre as energias médias dissipadas em um determinado volume de controle. A partir dos dados de velocidade nas três direções pode-se calcular a energia cinética turbulenta (k) por ponto da malha. Com este valor, poder-se-ia estimar a taxa

de dissipação média por plano. Conhecendo a massa líquida entre os planos estimar-se-ia a energia dissipada por unidade de massa e, finalmente o gradiente médio de velocidade. Os valores poderiam ser comparados entre ensaios e dariam a possibilidade de analisar as mudanças, por exemplo, na distribuição de tamanho das partículas (bolhas e/ou flocos) decorrentes da variação de Gm para cada caso (Figura 3.21).

Assim, estes procedimentos abrem a possibilidade da realização de estudos visando a obtenção das condições de mistura (em termos de Gm) no interior da zona de reação de unidades de FAD e não somente na visualização tridimensional do escoamento.

Figura 3.21 Ilustração da possibilidade de obtenção de parâmetros de turbulência com os dados de velocidade nas direções x,y e z, obtidos em malha virtual utilizando a sonda MicroADV conjugada ao programa VelDigital3D.

Estas foram apenas algumas considerações a respeito das potencialidades de aplicação do equipamento microADV conjugado ao programa *Veldigital3D* e não fizeram parte do escopo desta tese. No entanto, recomenda-se enfaticamente que este tipo de investigação seja realizado em trabalhos futuros pois a compreensão dos fenômenos que provocam a alteração no tamanho de partículas, principalmente micro-bolhas, no interior da zona de reação e sua relação com o parâmetro prático Gm daria uma grande contribuição no modelo proposto por Reali (1991) e um importante *insight* na tecnologia de FAD.

3.2.5 Conclusões referentes à seção 3.2

Com base nos ensaios apresentados nesta seção do Capítulo 3 foi possível concluir que:

- ✓ O escoamento no interior da zona de reação (USMB) apresentou um padrão bem definido de recirculação ao longo da altura, confirmando a suspeita levantada com os resultados obtidos com os ensaios estímulo e resposta.
- ✓ Verificou-se, também, uma recirculação do fluxo no sentido transversal.
- ✓ O equipamento microADV conjugado ao programa desenvolvido *Veldigital3D* mostrou-se como uma potencial ferramenta para a avaliação tridimensional do escoamento.

4. HIDRODINÂMICA DA ZONA DE REAÇÃO DA UNIDADE DE FAD INVESTIGADA: O EFEITO DA TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL (TAS) E DO TEMPO DE DETENÇÃO MÉDIO ($TD_{z,r}$) NA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE MICRO-BOLHAS (DTMB).

Resumo do Capítulo

A Distribuição de Tamanho de Micro-Bolhas (DTMB) na zona de reação de uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido (FAD) em escoamento contínuo foi investigada. A técnica de análise de imagem foi utilizada de forma não intrusiva para obter a DTMB (Capítulo 2). Foram investigados alguns possíveis agentes na aglutinação das micro-bolhas após a despressurização tais como: i) as condições de mistura expressas em termos da Taxa de Aplicação Superficial (TAS) e tempo de detenção na zona de reação ($Td_{z,r}$), ii) razão de recirculação (p), iii) a variação de pH e, iv) a dosagem de coagulante (Al^{+3}). Verificaram-se variações muito pequenas (20 a 30 μm) no diâmetro médio das micro-bolhas. No entanto, as maiores micro-bolhas carregam grande parte do volume de ar liberado podendo afetar a eficiência global do processo.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um dos grandes “gargalos” para aprimoramento de projetos de unidades de flotação reside, sem dúvida nenhuma, no conhecimento dos mecanismos de formação de micro-bolhas e na interação destas com as partículas presentes (fase sólida). Ives (1995) comenta que estas “caixas pretas” podem resultar em projetos insatisfatórios e que a otimização das unidades de FAD, no estado da arte atual, passa necessariamente pelo conhecimento das interações entre as partículas (bolhas e flocos), descritas pelo autor como “processos internos”.

A zona de reação desempenha um papel fundamental na eficiência do processo de FAD. Ela é determinante no contato das micro-bolhas com a fase sólida (partículas floculentas para tratamento de águas residuárias ou destinadas ao abastecimento). A eficiência na remoção das partículas é influenciada pelas condições de mistura e pelo tempo de detenção na zona de reação (SHAWWA; SMITH, 2000). Por isso, muitos modelos do processo focam a análise nessa seção do reator tais como os apresentados por: Reali (1991), Edzwald e Malley (1991b), Fukushi (1995), Edzwald (1995), Shawwa e Smith (2000), Han, Kim e Dockko (2001), Han (2002), Reali e Campos (2002) entre outros. Por outro lado, o tamanho das partículas e das micro-bolhas produzidas é um dos principais fatores que afetam a eficiência da FAD (HAN, 2000). Bolhas maiores possuem maior velocidade ascensional e podem romper os flocos formados e/ou a ligação bolha-floco. Além

disso, o comprimento limitado dos sítios hidrofóbicos dos flocos demanda bolhas menores (KITCHENER; GOCHIN, 1981).

O tamanho das micro-bolhas formadas depende da pressão de saturação (P_{sat}), temperatura (T), pH, dispositivo de despressurização (D_{dp}), tensão superficial do líquido (σ) e razão de recirculação (p). No entanto, a aglutinação das micro-bolhas após a sua formação também pode interferir na eficiência global do processo. Reali (1991) comenta que o estudo do fenômeno de aglutinação das micro-bolhas de gás no interior das unidades de FAD é muito importante pois a obtenção de bolhas de pequenas dimensões é fundamental para o processo. O mesmo autor ainda coloca que não se tem notícia de estudos específicos sobre a aglutinação de micro-bolhas no interior de reatores de FAD. A faixa usual de tamanho de micro-bolhas para a FAD é de 10 a 120 μm sendo o tamanho médio na faixa de 40 a 60 μm , embora haja discordâncias. De forma simplificada, pode-se dizer que o fenômeno de aglutinação de micro-bolhas depende de dois aspectos fundamentais: i) taxa de colisão entre as micro-bolhas; ii) características da superfície das bolhas e do líquido em torno das mesmas (REALI, 1991).

O incremento da TAS de unidades convencionais de FAD através da disposição adequada de lamelas no interior da zona de clarificação foi apresentado com grande vantagem em diversos trabalhos: Reali e Santos (1996), Reali e Marchetto (1996), Marchetto e Reali (1997a), Marchetto e Reali (1997b) e Reali e Santos (1999). No entanto, esta evolução traz como consequência direta a diminuição do $Td_{z,r}$ e a alteração das condições de mistura na zona de reação podendo incorrer no aumento da taxa de colisão entre micro-bolhas e favorecer a aglutinação. Por outro lado, Lundh, Jönsson e Dahlquist (2000) analisando somente aspectos relativos ao comportamento hidrodinâmico na zona de reação de uma unidade piloto de FAD, recomenda que TAS menores que 98m/h sejam aplicadas na zona de reação de modo a favorecer as condições de mistura. No entanto, Reali (1991) supõe que o aumento do gradiente médio de velocidade na zona de liberação de micro-bolhas aumenta a taxa de aglutinação das mesmas.

A quantidade de micro-bolhas fornecida pode ser alterada, entre outras maneiras, pelo incremento da razão de recirculação ($p=Q_r \times (Q_e+Q_r)^{-1}$) onde: Q_r é a vazão de recirculação e Q_e é a vazão afluente). Neste sentido, Shawwa e Smith (1998) verificaram, através da análise do adimensional número de Peclet (Pe) por meio de ensaios estímulo-resposta, o aumento no grau de mistura com o aumento de p .

O efeito do pH e de cátions metálicos na agregação de sólidos com micro-bolhas, produzidas pela eletrólise, foi investigado por Yang et al. (2000). Os autores verificaram um aumento na aglutinação de micro-bolhas na presença de cátions metálicos.

Assim, a alteração das condições de mistura e $Td_{z,r}$, bem como a razão de recirculação (p), o pH e a dosagem de coagulante, podem favorecer a aglutinação das micro-bolhas na zona de reação das unidades de FAD.

A grande contradição nos mecanismos que envolvem o contato e a aderência das bolhas e flocos no interior da zona de reação é que, ao mesmo tempo em que são recomendados maiores tempos de contato e maior intensidade de mistura para aumentar a oportunidade de choque entre bolhas e flocos, pode haver um aumento na aglutinação das micro-bolhas após a cavitação (formação) que pode interferir negativamente na eficiência do processo de FAD.

Um dos objetivos específicos desta tese, cujos resultados são discutidos neste capítulo, foi avaliar a Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB) frente as alterações nas condições de mistura e $T_{d,z,r}$, p , pH e dosagem de coagulante mantendo-se fixos: P_{sat} , γ , D_{dp} e η . A DTMB foi analisada no interior da unidade piloto com escoamento contínuo por meio de método não intrusivo que utiliza análise de imagem.

Vale lembrar que este capítulo é parte da investigação maior que compreende esta tese onde se avaliou o efeito da Distribuição de Tamanho de Partículas (DTP), $T_{d,z,r}$ e TAS na zona de reação na eficiência global de uma unidade piloto de FAD. Nenhuma relação com a eficiência do tratamento foi verificada neste capítulo.

Suposição levantada: Nas faixas usuais de TAS e $T_{d,z,r}$, bem como para pequenas variações de pH e dosagem de coagulante, a variação da (média) DTMB é insignificante.

Objetivo específico do capítulo: Avaliar a DTMB na zona de reação de uma unidade piloto de FAD frente a variações de TAS vs T_d , p , pH e Al^{+3} .

4.2 “BACKGROUND”

A determinação de tamanho de partículas pode ser realizada utilizando-se de diferentes princípios de medição. As técnicas mais utilizadas no saneamento são aquelas que empregam o princípio da difração a *laser* (LALLS), da interferência de campo (através da eletroresistividade *Coulter* e do bloqueio de luz) e a análise de imagem.

O tema é complexo e relativamente novo na área de saneamento onde a maioria dos trabalhos remonta sobre a última década. Segundo Santos et al. (2004), a escolha do método de determinação mais adequado depende de uma série de fatores, tais como: a natureza da amostra (dissolvida ou em suspensão, solubilidade das partículas, tamanho das partículas, etc.), a natureza do processo (ou seja, qual é o uso do valor de diâmetro obtido), a resolução de cada técnica (precisão do método) e a tradição da utilização da técnica. A escolha de qual propriedade deve ser analisada está fortemente ligada à utilidade desta informação.

Rodrigues e Rubio (2003) apresentam alguns métodos de medição de bolhas utilizados na área de mineração e na área ambiental para diferentes tipos de unidades de flotação. A Tabela 4.1 apresenta outros artigos, complementa as informações apresentadas pelos autores e reapresenta alguns dos métodos utilizados para FAD por se tratar do escopo deste trabalho.

Tabela 4.1 - Exemplos de métodos utilizados para medir alguma propriedade de bolhas de gás.

Método de análise	Geração bolhas	Amostragem	Objetivo	Faixa tamanho investigada (μm)*	Principal conclusão	Autores
Análise de imagem	Ar dissolvido	Célula vidro	Verificar a taxa de crescimento e colapso de bolhas de 100 a 1000 μm	N.A	A camada de impureza que circunda as bolhas altera o coef. Difusão	Manley (1960)
	Ar disperso	Coluna flotação	Verificar a teoria da colisão entre partícula e bolha	50-100	Menor bolha= maior eficiência de colisão. Eficiência colisão >> ef. 1 bolha e 1 part	Flint e Howarth (1971)
	Ar disperso	Célula vidro Plexiglas	Verificar o efeito de tamanho de partícula e bolha na eficiência de contato	0-100	Menores bolhas = maior ef. contato	Reay e Ratcliff (1973)
	FAD	Célula vidro	Verificar o efeito do tamanho bolha na remoção ácido húmico	20-80	Bolhas menores 50 μm são mais eficientes na remoção ac. Húmico.	Cassel, Kaufman e Matuevic (1975)
	FAD	Coluna flotação	Verificar o efeito da pressão e dispositivo de despressurização no tamanho bolhas	30-180	Diâmetro bolha foi influenciado pela P_{sat} ; vazão e dispositivo de despressurização.	Takahashi, Miyahara e Mochizuki (1979)
	FAD	Janela na parede reator	Apresentar a proposta de gerar micro-bolhas juntamente com o processo de coagulação/floculação	N.E	O sistema "floto-floculador" apresentou bons resultados mas deve ser testado em grande escala.	Kitchener e Gochin (1981)
	Injeção ar meio poroso	Coluna flotação	Investigar o perfil de velocidade do líquido induzido pelo movimento de conjunto de bolhas	~2200	O comportamento do conjunto de bolhas pode ser aproximado pelo de uma bolha isolada.	Miyahara, Kaseno e Takahashi (1984)
	N.E	Célula quadrada Plexex	Investigar efeitos de parede e interação entre bolhas na velocidade ascensional	0-1000	Foi aconselhada a utilização da fórmula final obtida.	Dulieu, Aymami e Hamaide (1984)
	FAD	Célula plana	Investigar o efeito do tamanho das micro-bolhas no espessamento do resíduo de tanque de lodo ativado	10-300	Os resultados para o espessamento de lodo não foram satisfatórios.	Rijk, van der Graaf e Blankem (1994)
	FAD	Tubo de observação	Investigar o comportamento de diferentes bocais visando apresentar modelo de crescimento de bolhas	0-80	O modelo de crescimento de bolhas pode contribuir para a melhoria dos bocais	Rykaart e Haarhoff (1995)
Análise de imagem	Eletrolise	Tubo capilar "impinging jet"	Verificar a agregação bolha-sólido para diferentes condições físico-químicas	0-180	A agregação foi influenciada pela hidrodinâmica e pelo potencial Zeta	Yang et al. (2000)
	FAD	Câmara de visualização	Apresentar novo método para determinação tamanho bolhas	<70	O método foi considerado bom para efetuar medidas de bolhas	Rodrigues e Rubio (2003)
	Ar disperso	Câmara de visualização	Apresentar novo método para determinação tamanho bolhas	<2250	O método foi considerado bom para efetuar medidas de bolhas	Rodrigues e Rubio (2003)
	DAF e Eletrolise	Célula (material e dimensões não especificadas)	Comparar os resultados da análise de imagem com contador (Counter) e sensores ópticos de bloqueio de luz	14-56 DAF 5-40 Eletro	A análise de imagem consumiu cerca de 3000 minutos para produção resultados de 2000 bolhas	Han, Park e Yu (2002)

continua

Continuação da Tabela 4.1

Diâmetro fluidodinâmico	Ar disperso	Coluna de visualização	Tratar água oleosa proveniente da produção de petróleo e determinar diâmetro fluidodinâmico	0,5-5mm	Dificuldade em determinar a porosidade do líquido (e) na operação do sistema	Melo, Pereira e Massarani (2000)
Atenuação de luz	DAF	Coluna flotação	Determinar a concentração de micro-bolhas em macro-escala	N.A	Principal vantagem: medidas podem ser realizadas em macro-escala. Cada pixel pode conter muitas micro-bolhas. Principal desvantagem: não é possível realizar medidas de bolhas.	Leppinen e Dalziel (2001)
Eletroresistividade (Counter)	DAF e Eletrolise	Sonda contador em batelada	Comparar os resultados da análise de imagem com contador (Coulter) e sensores ópticos de bloqueio de luz	13-96 DAF	Os resultados foram considerados acurados em curto tempo para obtenção dos resultados (30 minutos para 2000 bolhas)	Han, Park e Yu (2002)
Sensor óptico laser	DAF e Eletrolise	Tubo sucção amostra	Comparar os resultados da análise de imagem com contador (Coulter) e sensores ópticos de bloqueio de luz	15-85 DAF 15-65 Eletro	Os resultados foram considerados acurados em curto tempo para obtenção dos resultados (10 minutos para 2000 bolhas)	Han, Park e Yu (2002)
Acoustic Bubble Spectrometer	Cavitação	"In-line"	Validar o acoustic bubble spectrometer (ABS)	0-600	Comparado com análise de imagem o ABS apresentou grande concordância de resultados com curto tempo de resposta	Chahine et al. (2001)
Phase Doppler anemometry	FAD	N.E	Verificar o modelo cinético proposto na remoção de algas	50-100	O modelo baseado SCE apresenta boa estimativa porém mais investigações são necessárias	Shawwa e Smith (2000)
Ressonância magnética	N.E	N.E	Verificar a aplicação da ressonância magnética nuclear para determinação de tamanho e concentração de bolhas	N.E	O princípio da ressonância pode ser aplicado	Emets (1997)
* exceto quando indicado			N.A - não aplicável	N.E - não especificado		

Uma das principais interferências em qualquer técnica utilizada refere-se a amostragem. Esta interferência manifesta-se mais prejudicialmente nos casos onde existam partículas frágeis (partículas flocculentas e micro-bolhas). Nestes casos, o resultado final pode ser distorcido em função da modificação das características originais da suspensão.

Dentre os poucos trabalhos que apresentaram resultados de medição de tamanho de micro-bolhas para a FAD, a análise de imagem foi a técnica mais empregada. No entanto, técnicas que empregam os princípios da eletroresistividade e bloqueio de luz também foram utilizadas e serão apresentadas nesta revisão.

Cassel, Kaufman e Matuevic (1975) apresentaram trabalho pioneiro na determinação do tamanho de micro-bolhas para FAD e sua influência na remoção de substâncias húmicas. A determinação do tamanho foi realizada através de fotografias com amostragem reduzida (250 bolhas foram analisadas). Um dos principais problemas encontrados pelos autores foi à alta densidade de micro-bolhas produzidas pelo processo, dificultando a iluminação e a aquisição das

imagens. Para solucionar este problema promoveu-se a despressurização de um volume diminuto de água saturada no interior de uma célula de 3cm de comprimento por 1,3cm de largura. A coagulação foi realizada com a adição de Al^{+3} . Os autores verificaram que a eficiência de remoção de cor foi bastante prejudicada quando o diâmetro médio das micro-bolhas excedia 50-60 μ m. Apesar das limitações, o trabalho mostrou que existe uma faixa de tamanho adequada a partir da qual a eficiência do processo pode ser prejudicada.

Uma investigação a respeito dos fundamentos que envolvem a formação de micro-bolhas na FAD foi realizado por Takahashi, Miyahara e Mochizuki (1979). Os autores verificaram o efeito da pressão, vazão e tipo de dispositivo de despressurização no número e diâmetro das micro-bolhas e propuseram equações empíricas. O tamanho das micro-bolhas foi determinado por método fotográfico, mas nenhum detalhe a respeito foi apresentado. Os autores concluíram que maior pressão de saturação e vazão de recirculação produzem menores diâmetros médios e que o tipo de bocal de despressurização influencia no tamanho médio das micro-bolhas havendo tendência de maiores diâmetros para o caso onde o comprimento do bocal foi maior.

Kitchener e Gochin (1981) afirmaram que o processo de flotação, embora efetivo, é ineficiente uma vez que o diâmetro médio das micro-bolhas produzidas é maior que o tamanho ótimo (<50 μ m). Os autores propõem um método de flotação sem bolhas livres, onde a injeção de água saturada seja realizada juntamente com a adição de coagulante seguida da floculação com mistura moderada (floto-floculador) proporcionando, assim a formação de “flocos aerados”. O aparato experimental para determinação de tamanho de bolhas e flocos continha sistema de aquisição de imagem composto por câmara fotográfica e iluminação através de fibra óptica. Os negativos eram impressos e analisados com auxílio de lente (lupa). A resolução era limitada (10 μ m) mas, segundo autores, suficiente para observar o crescimento das bolhas e flocos no interior do tanque. O tamanho e velocidade das micro-bolhas eram medidos através do tamanho e comprimento do rastro, respectivamente. Não foi especificado o número de análises efetuadas. Nos ensaios, o movimento circular da suspensão foi induzido de forma a prevenir a sedimentação e a flotação de modo que a colisão entre bolhas e flocos ocorresse indefinidamente. O “floto-floculador” foi testado somente em escala de batelada, no entanto as recomendações feitas pelos autores põem em dúvida a real aplicação destas unidades.

Mais de uma década depois, Rijk, van der Graaf e Blanken (1994) investigaram o efeito do tamanho das micro-bolhas no espessamento do resíduo de tanque de lodo ativado. Os autores justificaram que a adição de produtos químicos não estava produzindo massa de sólidos seca esperada (3% invés de 4,5% esperado) e que a única solução seria investigar o efeito do tamanho das micro-bolhas no espessamento do lodo. Os resultados para o espessamento de lodo não foram satisfatórios, no entanto os autores verificaram grande interferência provocada pela aglutinação de micro-bolhas quando a distância entre o ponto de despressurização e injeção foi aumentada de 12 para 64cm. O método utilizado foi a análise de

imagem dos negativos através de um analisador automático. A amostragem foi realizada por meio da sucção de uma pequena vazão de água saturada para o interior de uma célula onde as imagens foram adquiridas. Segundo os autores, o método apresentou vantagens em relação a contagem manual, entretanto as imagens devem ter alto contraste e a concentração de micro-bolhas não deve ser muito elevada. Não foi especificado o número de imagens adquiridas bem como as dimensões da célula utilizada. A faixa de tamanho das micro-bolhas analisadas ficou entre 10 e 300µm.

Visando investigar um modelo proposto para o incremento de tamanho das micro-bolhas depois da despressurização, Rykaart e Haarhoff (1995) investigaram o comportamento de diferentes bocais. A determinação de tamanho foi realizada por análise de imagem de fotografias. Para cada condição cerca de 200 micro-bolhas foram medidas automaticamente. A faixa de tamanho obtida foi de 30 a 80µm com média em torno de 80µm. Existem duas diferenças cruciais no método utilizado pelos autores quando comparado aos demais trabalhos citados: i) a célula de aquisição foi substituída por um tubo inserido na porção central do módulo de medida e a velocidade ascensional foi controlada pela elevação do tubo acima do nível de saída; ii) um “filtro” de ar visando capturar parte da concentração de micro-bolhas foi utilizado. Com isso os autores conseguiram minimizar os efeitos apontados por Cassel, Kaufman e Matuevic (1975) no que se refere a dificuldade de aquisição das imagens devido a velocidade ascensional e a elevada concentração de micro-bolhas. Todavia, apesar da grande vantagem em relação aos métodos de amostragem descritos anteriormente, a mudança na velocidade e a condição de entrada no tubo amostrador podem favorecer a aglutinação das micro-bolhas e interferir no resultado final.

Com a intenção de minimizar os efeitos negativos apontados por Cassel, Kaufman e Matuevic (1975) e Rijk, van der Graaf e Blanken (1994) no que se refere a alta concentração e velocidade ascensional de micro-bolhas, Rodrigues e Rubio (2003) propuseram um método de análise de micro-bolhas baseado na sucção de amostra e interrupção de fluxo no interior de uma célula de vidro. O método batizado pelos autores de LTM-Bsizer consiste na análise das imagens adquiridas logo após a interrupção do fluxo na célula (25x25mm de área de visualização e 3mm de espaçamento interno) através do fechamento de pinça. Entre 1000 e 3000 micro-bolhas foram medidas. O diâmetro médio (D_{Sauter}) ficou entre 33 e 37,5µm para todas as faixas de P_{sat} investigadas (294, 392, 490 e 588Kpa) com todas as bolhas menores que 70µm. Os autores apontam que a diferença dos valores médios obtidos em relação aos demais trabalhos se deve a aglutinação de micro-bolhas seja no interior das células de amostragem, seja pela utilização de diferentes tipos de sistemas de despressurização.

Han, Park e Yu (2002) utilizaram contador Coulter (eletroresistividade) em batelada e sistema de medição “on-line” baseado na interrupção de feixe de luz (laser) para determinação de micro-bolhas geradas pela FAD e pela eletro-flotação. Os resultados foram comparados com a análise de imagem digital. Micro-bolhas

menores que 10 μ m foram descartadas da amostragem sem maiores justificativas. A faixa de tamanho obtida para a FAD foi de 15 a 85 μ m e a média situou-se em torno de 28 μ m. Na comparação entre os métodos utilizados o contador “on-line” foi considerado pelos autores como método menos acurado sendo que a única vantagem apresentada foi o tempo para obtenção dos resultados (10 minutos para o contador laser “on-line”, 30 minutos para o contador Coulter e 3000 minutos para método de análise de imagem, necessários para medir 2000 bolhas). Apesar de descrito como novo método para determinação de tamanho de bolhas, o que pode ser considerado realmente novo foi a utilização de outro princípio de medição (bloqueio de luz a laser e eletroresistividade). A amostragem continuou sofrendo interferência pois em todos os três métodos investigados a amostra foi succionada e passou por célula de amostragem.

Em todos os métodos apresentados anteriormente, o ponto nevrálgico foi o método de amostragem utilizado.

Alternativamente, Chahine et al. (2001) apresentam a validação, através da comparação com método que emprega análise de imagem utilizando câmera *High-Speed* (1000 imagens/segundo), de um equipamento que utiliza ondas acústicas para determinação da distribuição de tamanho de micro-bolhas no estudo de cavitação em bombas (Acoustic Bubble Spectrometer – ABS, marca Dynaflo). As ondas sonoras são produzidas por um emissor e captadas por um receptor hidrofônico que devem estar separados por uma distância não especificada pelos autores, mas que deve ser informada na aquisição. A atenuação do sinal e a mudança de velocidade são convertidas em distribuição de tamanho de bolhas. A teoria que embasa o princípio de medição foi apresentada por Prabhukumar, Duraiswami e Chahine (1991). As possíveis vantagens deste equipamento são: i) os hidrofones podem ser locados externamente ao reator caracterizando método não-intrusivo; ii) o curto tempo para obtenção dos resultados (respostas *on-line*); iii) pode ser analisado um grande volume de líquido. Os resultados apontaram para grande concordância nos dois métodos utilizados. Nenhum trabalho visando investigar DTMB para a FAD utilizou o referido equipamento, no entanto existe uma restrição descrita no artigo quanto à utilização do equipamento para sistemas trifásicos, portanto sua utilização para FAD deve ser criteriosa.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS ESPECÍFICOS DO CAPÍTULO

4.3.1 Aparato Experimental

Conforme já comentado de maneira mais abrangente no Capítulo 2, para evitar as interferências decorrentes da amostragem, foi concebida uma zona de reação de vidro em escoamento contínuo com separador de micro-bolhas denominada Unidade Separadora de Micro-bolhas (USMB). A unidade possuía duas regiões distintas, cada uma com *Manifold* de coleta de água independente. A área de coleta e o número de furos de cada *Manifold* foram calculados para uma coleta uniforme e de tal forma que a soma das áreas para cada *Manifold* fosse proporcional a área da seção transversal de cada região no ponto de aquisição das imagens. Durante a operação da USMB as saídas eram ajustadas na mesma posição de modo que a amostra fosse coletada proporcionalmente a área de cada seção independente.

Para a análise da DTMB foi utilizado método que emprega análise de imagem. A aquisição das imagens foi realizada por método não intrusivo no interior da USMB visando obter amostras indeformáveis. Uma câmera digital Nikon 5400 de 5.1MPixel com ajuste de foco manual e programada para disparo múltiplo a 1/500 foi acoplada a conjunto de lentes com 60x de ampliação. O plano de foco foi calibrado com fio de 160 μ m e iluminado por plano de laser com 2mm de espessura. A análise das imagens adquiridas foi realizada com o software *Image Tool versão 3.0*. A Figura 4.1 apresenta uma imagem típica das micro-bolhas adquiridas após binarização da imagem original, conforme procedimento apresentado no Capítulo 2, seção 2. No total foram analisadas 11540 micro-bolhas garantindo amostras com 95% de intervalo de confiança para erro geral de 1%.

Figura 4.1 Exemplo de imagem adquirida digitalmente após binarização utilizando *freeware Image Tool 3.0*. $P_{\text{sat}} 450 \pm 10 \text{ KPa}$, $T 22^\circ \text{C}$.

4.3.2 Condições Investigadas

Os ensaios foram divididos em quatro etapas (Tabela 4.2). Na primeira, a vazão de entrada da unidade foi alterada de modo que as condições de mistura (expressas em termos da $TAS_{\text{zona reação}}$) e o tempo de detenção ($T_{d\text{teórico}}$) fossem variadas. Na segunda, o valor do pH foi ligeiramente alterado de modo a verificar pequenas variações nos valores do pH de coagulação possíveis de ocorrer em unidades de tratamento. Na terceira, a razão de recirculação (p) foi variada de 0,05, 0,10 e 0,20.

Na quarta e última etapa, o efeito do coagulante foi testado. A dosagem foi adotada com base em ensaios preliminares de coagulação efetuados em escala de laboratório.

É importante esclarecer que as condições investigadas foram delimitadas em função dos ensaios que foram investigados em etapas posteriores e que não serão apresentadas neste capítulo. As variações dos parâmetros $TAS_{\text{zona reação}}$ e $Td_{\text{teórico}}$ foram adotadas com base em valores usuais de operação encontradas em unidades plenas de FAD. A dosagem de Al^{+3} , pH e p foram adotados com base em investigações em escala de laboratório.

Tabela 4.2 - Parâmetros e variáveis investigadas para avaliação da variação da DTMB na zona de reação USMB.

Fixos: P_{sat} 450±10KPa, T 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", η não medida porém mantida inalterada.

Etapas	$TAS_{\text{zona reação}}^a$ (m/h)	$Td_{z.r. \text{ teórico}}^b$ $\times 10^{-2}$ (h)	p (-)	pH	Al^{+3} (mg/l)
1	1.1	60			
	1.2	40	0,10	6,50	2,25
	1.3	25			
2	2.1			6,00	
	2.2	25		6,25	
	2.3		0,10	6,50	2,25
	2.4			6,75	
3	3.1		0,05		
	3.2	25	0,10	6,50	2,25
	3.3		0,20		
4	4.1				0
	4.2	25	0,10	6,50	2,25

^a calculada com base na seção média da zona de reação

^b calculada com base no volume útil da zona de reação

Conforme comentado no Capítulo 2, existem duas principais fontes de erro no método utilizado: i) erro referente a amostragem; ii) erro inerente ao método de tratamento e análise das imagens. Este último encontra-se detalhadamente discutido no Capítulo 2 desta tese.

O erro na amostragem depende do número de amostras analisadas frente a população total e do dispositivo de coleta de micro-bolhas. Este último é inerente ao método de coleta utilizado e não pode ser estimado precisamente. Neste trabalho foi utilizado a USMB de modo que as imagens foram adquiridas no interior da zona de reação sem a necessidade realizar a coleta de amostras para posterior análise. Deste modo, eliminou-se o erro referente a coleta de amostras.

Estima-se cerca de 100000 micro-bolhas/ml para 0,075ml ar/ml água e micro-bolhas de diâmetro médio de 50µm. Para as razões de recirculação estudadas ($p=0,1$ e $0,05$) o número de micro-bolhas liberadas no sistema foi da ordem de 5×10^7 e 10^8 micro-bolhas/minuto. Assim, para o cálculo do número de micro-bolhas foi considerada uma população infinita. No entanto, no momento da aquisição das imagens não foi possível controlar o número de bolhas adquiridas. O número de micro-bolhas adquiridas era verificado somente após a aquisição e análise dos dados. Sendo assim, foi coletada o máximo de imagens possível e o erro amostral foi diferente para cada condição investigada (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Erro amostral para 95% de intervalo de confiança para cada condição investigada.

<i>Etapas *</i>	<i>Tamanho amostra</i>	<i>Erro (%)</i>
1	1.1	233
	1.2	591
	1.3	2746
2	2.1	1242
	2.2	1691
	2.3	2746
	2.4	856
3	3.1	830
	3.2	2746
	3.3	1107
4	4.1	2244
	4.2	2746
Total	11540	1,12

* vide Tabela 4.2 em Condições Investigadas

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 Ensaios Estímulo-Resposta

Os ensaios hidrodinâmicos foram conduzidos com a adição de um volume definido de solução concentrada com NaCl utilizando-se da técnica de estímulo e resposta na forma de injeção tipo pulso. A coleta de amostras foi efetuada por eletrodo submerso com intervalo de registro de 1 segundo (TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89).

Após a obtenção da Distribuição do Tempo de Residência (DTR) foram construídas as curvas normalizadas do traçador ($E?$) e o tempo adimensional (θ) conforme Levenspiel (1999). Os dados experimentais foram ajustados utilizando-se dos modelos de grande dispersão (DGI), de pequena dispersão (DPI) e tanques em série (N-CSTR).

As condições investigadas foram as mesmas utilizadas para determinação da DTMB todavia, foi investigada também a condição de escoamento sem a porcentagem de recirculação (p). Assim, foram realizados os ensaios apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Condições investigadas para os ensaios estímulo-resposta na USMB.

$TAS_{z,r}$ (m/h) ^a	$Td_{z,r}$ teórico $\times 10^{-2}(h)$ ^b	P (-)
60	1,10	0
		0,05
		0,10
40	1,70	0
		0,05
		0,10
25	2,50	0
		0,05
		0,10

^a calculada com base na seção média da zona de reação

^b calculada com base no volume útil da zona de reação

A Figura 4.2 (a,b,c) mostra as curvas normalizadas bem como a relação entre o valor de $E?$ do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de $E?$ experimental referentes aos ensaios na USMB para a $TAS_{z,r}$ de 60 m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,1 \times 10^{-2}$ h quando a recirculação (p) foi variada de 0; 0,05 e 0,10.

Para os três valores de p investigados, observa-se $s^2 \sim 0,30$ indicando, de acordo com Levenspiel (1999), uma tendência ao escoamento pistonado. Analisando os gráficos qualitativamente pode-se verificar que a zona de reação não possui regiões com zona morta pois $T_{média}/T_{real}$ foi sempre muito maior que 1. Da mesma forma, verifica-se que a zona de reação (USMB) possui uma certa fração com escoamento pistonado da ordem de 60% pois $T_{modal}/T_{real} \sim 0,60$.

Os ensaios vão ao encontro dos resultados esperados uma vez que, na porção inferior da USMB, espera-se uma mistura intensa para propiciar contato entre bolhas e flocos e, na medida que o fluxo avança no sentido da saída, espera-se que o comportamento seja próximo ao pistonado.

Embora com geometria completamente diferente, esta análise concorda com os resultados apresentados por Shawwa e Smith (1998) onde, estudando uma zona de reação em coluna, verificou-se que as porções inferiores possuíam maior grau de mistura enquanto que na porção superior havia uma maior tendência ao escoamento pistonado.

O tempo real (TDH) obtido através dos dados experimentais foi sempre maior que o tempo teórico da ordem de 2,5 vezes causado principalmente pelo alongamento da cauda do gráfico decorrente da recirculação do fluxo no interior da USMB. Acredita-se que o posicionamento da sonda e o volume teórico considerado no cálculo da zona de reação interferiram na determinação deste valor.

O número de Peclet (Pe), definido como o inverso do número de dispersão, foi calculado para todos os casos. Maiores valores de Pe indicam menor grau de mistura. Ao contrário dos resultados obtidos por Shawwa e Smith (1998), não foi verificada nenhuma alteração coerente deste parâmetro com o incremento da $TAS_{z,r}$ para a condição de $TAS_{z,r}$ de 60 m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,1 \times 10^{-2}$ h.

Pela Figura 4.2 verifica-se também que o modelo de tanques em série (N-CSTR) teve pior ajuste com maiores valores de p , visualizado pelo distanciamento da curva obtida em relação à curva a 45° (gráficos $E?$ do modelo x $E?$ experimental).

A Figura 4.3 apresenta os resultados experimentais e o ajuste ao modelo de tanques em série para todas as condições investigadas na $TAS_{z,r}$ de 60m/h. Verificou-se que, apesar dos pontos experimentais estarem praticamente concordantes para todos os valores de p investigados, o ajuste ao modelo de tanques em série foi diferente para cada situação.

Figura 4.2 Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na TAS_{z,r} de 60m/h e Td_{z,r} teórico de 1,10x10⁻²h e relação entre o valor de E_θ do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de E_θ experimental. a) p=0; Pe=6,25; TDH=2,65x10⁻²h; b) p=0,05; Pe=5,55; TDH=2,63x10⁻²h e c) p=0,10; Pe=7,69; TDH=2,63x10⁻²h. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.

Figura 4.3 Curvas normalizadas contendo pontos experimentais (dispersão) e ajuste com base no modelo de tanques em série (linhas contínuas) referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 60m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,10 \times 10^{-2}$ h. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.

De forma similar, aFigura 4.4 (a,b,c) apresenta as curvas normalizadas e a relação entre o valor de E_T do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de E_T experimental referentes aos ensaios na USMB para a $TAS_{z,r}$ de 40 m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,7 \times 10^{-2}$ h quando a recirculação (p) foi variada de 0; 0,05 e 0,10.

Para os três valores de p investigados, observa-se $s^2 < 0,37$ indicando, de acordo com Levenspiel (1999), uma tendência ao escoamento pistonado. O valor correspondente ao $T_{média}/T_{real}$ foi sempre muito maior que 1, indicando que a zona de reação não possui regiões com zona morta. Da mesma forma, verifica-se que a zona de reação (USMB) possui uma certa fração com escoamento pistonado da ordem de 55% pois $T_{modal}/T_{real} \sim 0,55$.

O tempo real (TDH) obtido através dos dados experimentais foi sempre maior que o tempo teórico da ordem de: $TDH = Td_{z,r}teoricox(2,5 \pm 0,15)$, causado principalmente pelo alongamento da cauda do gráfico decorrente da recirculação do fluxo no interior da USMB.

O número de Peclet (Pe) aumentou de 5,55 para 6,25 até 7,14 com o incremento da razão de recirculação (p) de 0 para 0,05 até 0,10, respectivamente. Isto indica menor grau de mistura com o incremento de p . Novamente, acredita-se que a geometria diferenciada das unidades investigadas no presente trabalho em relação a apresentado no trabalho de Shawwa & Smith (1998) foi a maior causa desta distorção. Na coluna utilizada por Shawwa & Smith (1998), a maior contribuição da mistura foi obtida com o incremento de p , uma vez que o fluxo é predominantemente unidirecional desfavorecendo uma boa condição de mistura pois, a coluna não possuía defletores ou elementos geométricos que proporcionem mudança de sentido de escoamento. Ao contrário, a unidade USMB possui entrada de água na horizontal e duas placas defletoras de inclinação variada ao longo da altura. Estas condições provavelmente fornecem maior intensidade mistura que as micro-bolhas, tornando o sistema menos sensível a variação da mistura com o incremento de p .

Pela Figura 4.4 verifica-se também que o modelo de tanques em série (N-CSTR) não fornece um bom ajuste aos resultados experimentais.

A Figura 4.5 apresenta os resultados experimentais e o ajuste ao modelo de tanques em série para todas as condições investigadas na $TAS_{z,r}$ de 40m/h. Novamente, verificou-se que o ajuste ao modelo de tanques em série foi diferente para cada situação.

$TAS_{z,r}$ 40m/h; $Td_{z,r}$ teórico $1,70 \times 10^{-2}h$

Figura 4.4 Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 40m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,70 \times 10^{-2}h$ e relação entre o valor de E_θ do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de E_θ experimental. a) $p=0$; $Pe=5,55$; $TDH=3,90 \times 10^{-2}h$; b) $p=0,05$; $Pe=6,25$; $TDH=4,06 \times 10^{-2}h$ e c) $p=0,10$; $Pe=7,14$; $TDH=4,56 \times 10^{-2}h$. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.

Figura 4.5 Curvas normalizadas contendo pontos experimentais (dispersão) e ajuste com base no modelo de tanques em série (linhas contínuas) referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 40m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,70 \times 10^{-2}$ h. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.

Mantendo-se o mesmo padrão utilizado nos demais ensaios hidrodinâmicos, a Figura 4.6 (a,b,c) apresenta as curvas normalizadas e a relação entre o valor de $E?$ do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de $E?$ experimental referentes aos ensaios na USMB para a $TAS_{z,r}$ de 25 m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $2,5 \times 10^{-2}$ h quando a recirculação (p) foi variada de 0; 0,05 e 0,10.

Para os três valores de p investigados, observa-se $s^2 < 0,39$ indicando, de acordo com Levenspiel (1999), uma tendência ao escoamento pistonado. O valor correspondente ao $T_{média}/T_{real}$ foi sempre muito maior que 1, indicando que a zona de reação não possui regiões com zona morta. Da mesma forma, verifica-se que a zona de reação (USMB) possui uma certa fração com escoamento pistonado da ordem de 50% pois $T_{modal}/T_{real} \sim 0,50$.

O tempo real (TDH) obtido através dos dados experimentais foi sempre maior que o tempo teórico da ordem de: $TDH = Td_{z,r} \text{teórico} \times (2,5 \pm 0,02)$, causado principalmente pelo alongamento da cauda do gráfico decorrente da recirculação do fluxo no interior da USMB.

O número de Peclet (Pe) diminuiu de 6,67 para 5,0 até 5,25 com o incremento da razão de recirculação (p) de 0 para 0,05 até 0,10, respectivamente. Isto indica que para esta $TAS_{z,r}$, o fornecimento de ar favoreceu as condições de mistura. Supõe-se que, para a USMB na menor $TAS_{z,r}$ investigada, a mistura provocada pelas microbolhas seja mais acentuada quando comparada aos casos onde a $TAS_{z,r}$ foi mais elevada.

Pela Figura 4.6 verifica-se também que o modelo de tanques em série (N-CSTR) forneceu um bom ajuste aos resultados para estes resultados experimentais.

A Figura 4.7 apresenta os resultados experimentais e o ajuste ao modelo de tanques em série para todas as recirculações (p) investigadas na $TAS_{z,r}$ de 25m/h. Novamente, verificou-se que o ajuste ao modelo de tanques em série foi diferente para cada situação.

TAS_{z,r} 25m/h; Td_{z,r} teórico 2,50x10⁻²h

Modelo N-CSTR

a)

Modelo N-CSTR

b)

Modelo N-CSTR

c)

Figura 4.6 Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na TAS_{z,r} de 25m/h e Td_{z,r} teórico de 2,50x10⁻²h e relação entre o valor de E_θ do modelo em tanques em série (N-CSTR) e o valor de E_θ experimental. a) $p=0$; Pe=6,67; TDH=6,21x10⁻²h; b) $p=0,05$; Pe=5,0; TDH=6,30x10⁻²h e c) $p=0,10$; Pe=5,26; TDH=6,31x10⁻²h. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.

Figura 4.7 Curvas normalizadas contendo pontos experimentais (dispersão) e ajuste com base no modelo de tanques em série (linhas contínuas) referentes aos ensaios estímulo-resposta na USMB para diferentes condições de recirculação (p) na $TAS_{z,r}$ de 25m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $2,50 \times 10^{-2}h$. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso.

Em termos gerais, os ensaios hidrodinâmicos demonstraram que o aumento da razão de recirculação (p) não provocou alteração significativa no comportamento das curvas quando foram investigados os maiores valores de $TAS_{z,r}$ (60 e 40m/h). Já para o menor valor de $TAS_{z,r}$ investigado (25m/h), verificou-se que o aumento da recirculação (p) proporcionou diminuição no valor do adimensional Pe indicando um aumento no grau de mistura. Acredita-se que a geometria variada da unidade USMB seja a maior responsável por este resultado. Como a geometria na USMB proporcionou mudança de direção do escoamento, a mistura foi mais eficiente para valores mais elevados de $TAS_{z,r}$ sendo, nestes casos, a variação de p insignificante do ponto de vista da mistura proporcionada. Já no caso onde a $TAS_{z,r}$ foi baixa, as micro-bolhas exerceram um importante papel na mistura observada pela variação do adimensional Pe .

4.4.2 Ensaios para Obtenção da DTMB na USMB

Finalmente, foram conduzidos os ensaios que visaram a obtenção da Distribuição de Tamanho das Micro-bolhas (DTMB) para as diferentes condições investigadas. Os ensaios da Etapa 1 foram conduzidos variando-se as condições de mistura, nos da Etapa 2 foi alterado o valor de pH, na Etapa 3 houve variação da recirculação (p) e, por último, na Etapa 4, verificou-se o efeito de uma dosagem fixa de coagulante na DTMB.

4.4.2.1 Etapa 1: variação das condições de mistura

A alteração do par de valores $TAS_{z,r}Td$ produziu uma leve mudança na DTMB nas condições investigadas (Figura 4.8-a). A fração de micro-bolhas menores que $50\mu m$ (d_{50}) foi maior que 85% em todas as condições investigadas (Figura 4.8-b). O

diâmetro médio das micro-bolhas foi pouco alterado frente às variações impostas sendo que podem ser considerados estatisticamente iguais (Figura 4.10-a). Estas assertivas poderiam levar a conclusão de que a alteração da condição de mistura tem pouca influência na DTMB. Todavia, foram observados valores extremos nas três condições investigadas (Figura 4.10-b).

Quando são analisadas a alteração do volume por faixa de tamanho (Figura 4.9) fica evidente que o incremento da TAS para o maior valor investigado (60m/h) deslocou parcela considerável do volume de ar liberado para as faixas de tamanho maiores (entre 80 e 100 μ m). Os resultados não concordam com aqueles apresentados por Shawwa e Smith (2000), no entanto a geometria da zona de reação pode ser uma possível razão para a discordância encontrada. O fato é que a alteração das condições de mistura influenciou na DTMB. Neste sentido é importante considerar que uma micro-bolha de 90 μ m contém a mesma quantidade de ar que 90 micro-bolhas de 20 μ m. Esta alteração da distribuição volumétrica de micro-bolhas (DVMB) pode ter implicações negativas na eficiência geral da FAD dada a alteração da velocidade ascensional para a mesma condição de agregação (hidrofobicidade), o que pode causar ruptura da ligação bolha-floco, dependendo, é claro, do grau de hidrofobicidade dos flocos presentes. Mais importante ainda é a diminuição do número total de micro-bolhas disponíveis para colidir com os flocos em menor tempo de detenção (Td). Se pensarmos em termos do número mínimo de micro-bolhas (n) aderidas a um floco para que ele vença as linhas de corrente e suba a superfície do líquido, conforme preconiza modelação proposta por Reali (1991) e Haarhoff e Edzwald (2001), a situação pode se agravar, dependendo das condições de floculação, o número de micro-bolhas disponíveis poderia ser menor que $n.N_f$ (onde N_f : número de flocos).

Figura 4.8 Frequência relativa(a) e acumulada(b) em número de micro-bolhas.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente às variações das condições de mistura (expressas em termos de $TAS_{\text{zona reação}}$ e Td). Fixos: P_{sat} 450 $\pm$ 10KPa, θ 22 $\pm$ 1°C, D_p registros de agulha 1/8", θ não medida porém mantida inalterada.

Figura 4.9 Frequência relativa em volume.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente às variações das condições de mistura (expressas em termos de TAS_{zona reação} e Td). Fixos: P_{sat} 450±10KPa, T 22±1°C, D_{ip} registros de agulha 1/8", p, pH, ρ não medida porém mantida inalterada.

a)

b)

Figura 4.10 Diâmetro médio das micro-bolhas analisadas. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente às variações das condições de mistura (expressas em termos de TAS_{zona reação} e Td). Fixos: P_{sat} 450±10KPa, T 22±1°C, D_{ip} registros de agulha 1/8", p, pH, ρ não medida porém mantida inalterada.

4.4.2.2 Etapa 2: pequena variação do pH

A alteração do pH produziu um achatamento na curva de DTMB (Figura 4.11-a) indicando uma alteração nas faixas menores quando o valor de pH foi levemente incrementado (pH de 6,0 a 6,75). A fração de micro-bolhas menores que $50\mu\text{m}$ (d_{50}) variou de 75 a 95% indicando uma alteração em número de micro-bolhas, deslocando das menores faixas para as maiores com a elevação do pH (Figura 4.11-b). O diâmetro médio das micro-bolhas foi pouco alterado (de 27 a $35\mu\text{m}$) com a variação do pH (Figura 4.13-a) porém, o diâmetro estatístico $D_{3,2}$ (D_{Sauter}) mostra uma variação maior (40 a $54\mu\text{m}$) já que este é mais sensível as variações de volume. Os valores extremos foram novamente observados (Figura 4.13-b) sendo que o pH de 6,5 apresentou maior número de valores extremos pois foram contadas mais micro-bolhas neste pH.

A alteração do volume por faixa de tamanho (Figura E4.12) mostra claramente que houve um deslocamento do volume de ar liberado para as maiores faixas quando houve aumento de pH. Os dados divergem ligeiramente dos resultados obtidos por Cassel, Kauffman e Matuevic (1975) os quais obtiveram um discreto incremento do diâmetro médio com a diminuição do valor do pH para as faixas investigadas pelos autores (4,5 a 10,5). No entanto, deve-se levar em conta que naquele trabalho foi utilizado uma célula para captura das micro-bolhas e posterior análise. Sendo assim, os resultados podem ter sido influenciados por uma possível aglutinação das bolhas na célula de amostragem.

Figura 4.11 Frequência relativa (a) e acumulada(b) em número de micro-bolhas.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a pequenas variações de pH. Fixos: $TAS_{\text{zona reação}}$ e T_d , P_{sat} $450 \pm 10 \text{ KPa}$, φ $22 \pm 1^\circ\text{C}$, D_{dp} registros de agulha 1/8", p , ? não medida porém mantida inalterada.

Figura 4.12 Frequência relativa em volume.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a pequenas variações de pH. Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450 ± 10 KPa, φ $22 \pm 1^\circ C$, D_{dp} registros de agulha $1/8''$, p , γ não medida porém mantida inalterada.

a)

b)

Figura 4.13 Diâmetro médio das micro-bolhas analisadas. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente às variações de pH. Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450 ± 10 KPa, φ $22 \pm 1^\circ C$, D_{dp} registros de agulha $1/8''$, p , γ não medida porém mantida inalterada.

4.4.2.3 Etapa 3: variação da razão de recirculação (p)

Embora tenha havido uma pequena modificação no comportamento da DTMB com a alteração da razão de recirculação (p) indicada na Figura 4.14-a, a distribuição de frequência acumulada permite visualizar que o d_{50} variou de 90 a 95 μ m (Figura 4.14-b) indicando que a recirculação foi pouco importante na DTMB, mantidas as mesmas condições de saturação (p_{sat} 450 $\pm$ 10KPa), dispositivo de despressurização (D_{dp} válvula de agulha) e tensão superficial (γ).

Observou-se no entanto que o diâmetro médio das bolhas variou de 25 a 30 μ m sendo o maior valor observado para p de 0,1 (Figura 4.16-a). Esta pequena variação parece estar em concordância com os resultados obtidos por Rijk, van der Graaf e Blanken (1994), os quais verificaram que a alteração da vazão de recirculação pouco influenciou o tamanho médio das micro-bolhas quando a pressão de saturação foi maior que 5KPa. Para menores valores de pressão de saturação, o aumento da razão de recirculação resultou em diminuição do diâmetro médio das bolhas. Os resultados obtidos por Cassel, Kaufman e Matuevic (1975) não indicaram nenhuma alteração significativa do diâmetro das micro-bolhas com o acréscimo da razão de recirculação. Entretanto, Shawwa e Smith (2000) verificaram um ligeiro incremento no diâmetro das bolhas (de até 10%) quando a razão de recirculação foi diminuída de 7 para 3%. Sem dúvida, o dispositivo de despressurização tem grande influência nestes resultados, conforme observado em Takahashi, Miyahara e Mochizuki (1979), e os dados não podem ser analisados somente com relação ao valor de p.

Os valores extremos foram observados (Figura 4.16-b) com maior intensidade para p de 0,1 pois foram contadas mais micro-bolhas nesta situação.

A alteração do volume por faixa de tamanho pode ser observada na Figura 4.17. Os resultados indicam que houve um discreto deslocamento do volume de ar liberado para as maiores faixas quando o valor de p foi de 0,1.

Figura 4.14 Frequência relativa(a) e acumulada(b) em número de micro-bolhas.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da razão de recirculação (p) Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} 450 $\pm$ 10KPa, γ 22 $\pm$ 1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, γ não medida porém mantida inalterada.

Figura 4.15 Frequência relativa em volume.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da razão de recirculação (p). Fixos: TAS_{zona reação} e Td, P_{sat} 450±10KPa, ? 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, ? não medida porém mantida inalterada.

Figura 4.16 Diâmetro médio das micro-bolhas analisadas. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da razão de recirculação (p) Fixos: TAS_{zona reação} e Td, P_{sat} 450±10KPa, ? 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, ? não medida porém mantida inalterada.

4.4.2.4 Etapa 4: variação da dosagem de coagulante (Al³⁺)

O comportamento das curvas de frequência em número foi muito semelhante para as duas condições investigadas (Figura 4.17-a). Houve um discreto aumento no número de bolhas com diâmetros menores que 50μm (d₅₀) quando não foi aplicado coagulante (Figura 4.17-b). No entanto, analisando as curvas de

freqüência em volume (Figura 4.18) nota-se um deslocamento do valor médio para as maiores faixas de tamanho quando o coagulante foi aplicado. O diâmetro médio foi praticamente o mesmo na presença ou não de coagulante (de 27 μm , sem Al^{+3} para 29 μm , com Al^{+3}) pois a variação em número foi pouco sensível a aplicação de coagulante devido ao elevado percentual do d_{50} (Figura 4.19 a e b). No entanto, o D_{Sauter} ($D_{3,2}$) variou de 40 para 48 μm quando o coagulante foi aplicado para as mesmas condições de mistura e tempo de detenção indicando que o fenômeno da aglutinação foi ligeiramente mais acentuado na presença do cátion Al^{+3} . Esta observação encontra respaldo nos resultados obtidos por Cassel, Kaufman e Matuevic (1975) onde também foi observado um discreto incremento no diâmetro médio das micro-bolhas com a adição de Al^{+3} .

Figura 4.17 Frequência relativa(a) e acumulada(b) em número de micro-bolhas.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da dosagem de Al^{+3} . Fixos: $TAS_{\text{zona reação}}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, ? 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, p, ? não medida porém mantida inalterada.

Figura 4.18 Frequência relativa em volume.

Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da dosagem de coagulante Al^{+3} . Fixos: p, $TAS_{\text{zona reação}}$ e T_d , P_{sat} 450±10KPa, ? 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, ? não medida porém mantida inalterada.

Figura 4.19 Diâmetro médio das micro-bolhas analisadas. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações da dosagem de coagulante Al^{+3} Fixos: p, $TAS_{zona\ reação}$ e T_d , P_{sat} $450 \pm 10 KPa$, $22 \pm 1 ^\circ C$, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH, ? não medida porém mantida inalterada.

A análise por meio do diâmetro médio das micro-bolhas foi utilizada para efetuar todos os cálculos estatísticos apresentados e constitui parâmetro importante para a análise dos resultados. No entanto, os valores médios foram fortemente influenciados pelo alto número de partículas nas menores faixas de tamanho.

Analisando os resultados em termos de $D_{3,2}$, denominado diâmetro superfície-volume ou simplesmente D_{Sauter} , nota-se que os resultados foram trasladados em relação aos valores dos diâmetros médios. O D_{Sauter} é o diâmetro estatístico mais utilizado nos estudos que envolvem a análise de combustão, movimento de fluido e demais fenômenos onde a característica de superfície é um parâmetro importante. Muitos dos trabalhos da literatura que envolveram a análise da distribuição de tamanho de micro-bolhas para a FAD utilizaram $D_{3,2}$ ou D_{Sauter} . Ele indica em qual faixa de tamanho está a maior parte do ar liberado pela câmara de saturação.

Em comparação com o $D_{médio}$ observa-se, na Figura 4.20, que o $D_{3,2}$ apresenta valores mais elevados e os resultados são próximos aos preconizados pela literatura (entre 40 e 60 μm).

Figura 4.20 Diâmetros médios e de Sauter ($D_{3,2}$) obtidos por método que emprega análise de imagem para todas as condições investigadas na USMB.

4.4.3 O Efeito da Variação DTMB na FAD

Embora os valores dos diâmetros médios ($D_{\text{médio}}$) de micro-bolhas obtidos não apresentaram alteração significativa em nenhuma das condições investigadas (18 a 32 μm), ou entre 40 e 50 μm quando utilizado o diâmetro estatístico D_{Sauter} , os resultados apresentados indicaram uma variação, algumas vezes expressivas da frequência volumétrica relativa das micro-bolhas. Mas, quais são as implicações destas variações na eficiência de unidades de separação que empregam a FAD?

O número e a velocidade ascensional das micro-bolhas são alterados quando a DTMB varia. Tomando por base o modelo desenvolvido por Reali (1991), vemos que, entre outras coisas, a variação do $D_{\text{médio}}$ altera as condições de choque a qual é fortemente dependente do número de bolhas e partículas presentes descritas no modelo como uma função de primeira ordem. A velocidade ascensional do conjunto bolha-floco quando alterada pode implicar em duas conseqüências: i) o rompimento da ligação bolha/floco se o ângulo de contato não possuir valor suficiente para resistir ao aumento das tensões cisalhantes (viscosidade do líquido) devido ao aumento do empuxo atuante e ii) em uma situação extrema pode haver um número menor de bolhas que o mínimo necessário para que a flotação ocorra ($n.N_f$, onde: n =número mínimo de micro-bolhas aderidas a um floco para que este se torne flotável e, N_f = número de flocos presentes), embora, de acordo com Edzwald (1991), na maioria das vezes as micro-bolhas estão em excesso no sistema. Estas situações acarretariam, em uma condição extrema, no colapso do sistema de FAD.

Para facilitar a discussão, tomemos como exemplo o caso observado nos ensaios referentes a Etapa 1 de investigação, onde foi verificada a variação das condições de mistura e seu efeito na DTMB. Nestes ensaios, observando a Figura 4.9, verifica-se um incremento da frequência relativa em volume para a faixa de tamanho entre 80 e 90 μm (20% do volume) quando foi investigada a $TAS_{z,r}$ de 60m/h e $Td_{z,r}$ teórico de $1,10 \times 10^{-2} \text{h}$, comparado com as demais situações. Somente para efeito de visualização vamos supor que as demais micro-bolhas situavam-se todas na faixa da média expressa em termos do D_{sauter} ($\sim 50 \mu\text{m}$, com 80% do volume). Assim, vamos verificar a variação no número de micro-bolhas de $50 \mu\text{m}$ decorrente da alteração da frequência volumétrica.

Considerando a concentração volumétrica de bolhas (S_v) de $0,075 \text{ cm}^3$ de ar/ cm^3 de água e 100% das bolhas na faixa de $50 \mu\text{m}$ de diâmetro, temos de acordo com equação proposta por Reali (1991):

$$Nb_{d50\mu\text{m}} = 1,04 \times 10^{11} \text{ bolhas/cm}^3$$

Agora, com 20% do volume de ar liberado para bolhas de diâmetro de $90 \mu\text{m}$ o número de bolhas de $50 \mu\text{m}$ de diâmetro cai para:

$$Nb_{d50\mu\text{m}} = 8,33 \times 10^{10} \text{ bolhas/cm}^3$$

Isto implica em uma diminuição de $2,08 \times 10^{10}$ bolhas/ cm^3 para as micro-bolhas com diâmetro de $50 \mu\text{m}$ alterando a cinética da FAD já que esta é dependente do número de bolhas. Outro fator a ser considerado refere-se as distâncias entre micro-bolhas. Assumindo que uma micro-bolha ocupa o centro de um volume determinado por um cubo de lado D , pode-se calcular a distância de acordo com a equação obtida por Reali (1991):

$$Db^*(m) = [p(1+p)db^3/6.S_v p]^{1/3}, \text{ onde}$$

Db^* = distância entre bolhas (m);

p = razão de recirculação;

S_v = volume de ar dissolvido (liberado)/volume de água de recirculação.

A Figura 4.22 e 4.23 apresenta a variação da distância entre micro-bolhas por classe de tamanho para as condições investigadas na Etapa 1 deste capítulo. Verifica-se que o aumento do diâmetro implica em aumento na distância entre bolhas. Se considerarmos a hipótese assumida por Reali (1991) de que a colisão se dá quando bolha e floco se encontram dentro da área determinada pelo cilindro de colisão, fica evidente que para um mesmo tamanho de floco, a probabilidade de choque diminui com o aumento do diâmetro das micro-bolhas, sem considerar a questão da efetividade dos choques. Considerando o caso do exemplo adotado, a

diminuição do número de micro-bolhas de 50 μm de diâmetro implicaria em um aumento de 7,5% na distância entre as mesmas.

Além disso, existiriam cerca de $3,6 \times 10^9$ bolhas/ cm^3 na faixa de 90 μm alterando a velocidade e a dissipação de energia no interior da zona de reação. A variação da velocidade com o diâmetro das micro-bolhas pode ser observada na Figura 4.21. As velocidades foram calculadas com base na equação de Stokes cuja aplicação foi justificada por Reali (1991) para micro-bolhas de até 140 μm . A velocidade é incrementada na ordem de 3,5 vezes quando o diâmetro da bolha é alterado de 50 para 90 μm . Da mesma forma, verifica-se que o aumento do diâmetro das micro-bolhas altera o valor do gradiente médio de velocidade na zona de reação (de 10 para 20 s^{-1} , para $p=0,1$). Tal fato pode ser benéfico sob o ponto de vista da mistura pelo incremento da turbulência. Todavia, dependendo das características dos flocos formados na etapa de floculação, pode haver prejuízo na eficiência da FAD devido ao desequilíbrio entre a força de ligação bolha-floco (expressas em termos do ângulo de contato) e a força resultante da velocidade ascensional do conjunto, ou mesmo devido à quebra de ligações já formadas entre bolhas e flocos.

Um outro ponto importante, observado por Amato et al. (2001), refere-se ao ar residual que é impelido para fora do sistema de FAD, no efluente do tanque. Este ar é composto por micro-bolhas de ar livres, ou seja, que não se agregaram aos flocos, formando um conjunto de micro-bolhas residuais passíveis de serem arrastadas. Amato et al. (2001) comenta que, qualquer bolha livre que entra na zona de clarificação do tanque de FAD pode potencialmente sair com o efluente. Na prática, dentro dos típicos valores de TAS adotados para unidades de FAD convencional (6-12m/h) as bolhas livres com diâmetro de até 80 μm seriam potenciais candidatas ao arraste juntamente com o efluente (Figura 4.21). A consequência direta deste fato é que os filtros subsequentes ao sistema de tratamento teriam menores carreiras de filtração devido a colmatação do meio filtrante, decorrente do acúmulo de ar no mesmo. Nesse sentido, deve-se considerar que grande parte do número de micro-bolhas determinadas nos ensaios deste capítulo possuía diâmetro menor que 30 μm (~50%). Sob o ponto de vista específico da cinética e hidrofobicidade, bolhas menores são preferíveis, conforme observado pela maioria dos pesquisadores. No entanto, considerando-se os pontos de vista de projeto e operacional de uma unidade de FAD integrada a um sistema de tratamento e projetada para operar com uma determinada TAS, pode-se supor que as micro-bolhas com velocidades menores que a TAS estipulada e que, porventura, não tenham sido agregadas aos flocos, irão escapar do tanque de FAD e alcançar as unidades de filtração subsequentes, caso não haja nenhum dispositivo para remoção destas micro-bolhas residuais. Neste sentido, Valade et al. (1996 apud AMATO et al., 2001)¹, reportaram que as bolhas livres que escapam do sistema interferem negativamente na carreira

¹ VALADE, M.T. et al. Pretreatment effects on particle removal by flotation and filtration. **J. AWWA**, 88(12), 35.

das unidades de filtração. Em contraposição, estudos efetuados por Hedberg et al. (1998), demonstraram que o uso de lamelas dispostas no interior do reator de FAD, antes do sistema de coleta de água flotada, reduz a quantidade de ar que escapa do sistema, aumentando a carreira das unidades de filtração. O mesmo autor investigou também lamelas dispostas externamente ao tanque de FAD, antes do sistema de filtração.

Na opinião do autor da presente tese, deve-se considerar, no entanto, que o arraste de micro-bolhas livres é potencialmente diminuído devido à agregação e aglutinação secundária que ocorre na parte superior da zona de clarificação do tanque de FAD. O chamado *white water* ou *white water cushion*, que nada mais é do que a região de acúmulo de micro-bolhas na porção superior da zona de clarificação do tanque de FAD, promove um contato secundário das micro-bolhas com os flocos, ou mesmo com as demais micro-bolhas, favorecendo a permanência destas no tanque de FAD. É importante enfatizar que, entende-se por secundário o contato que ocorre fora da zona de reação da unidade de FAD uma vez que esta é vista, pela maioria dos autores, como a principal região de contato entre micro-bolhas e flocos. Entretanto, Lee e Kim (2003), não consideram a zona de clarificação como uma região secundária de contato uma vez que focam a modelação matemática proposta por eles nesta região do tanque, definindo um peso crítico a partir do qual a flotação não ocorre. É evidente que todos estes mecanismos de contato trabalham conjuntamente no tanque de FAD e que, por esta razão, as simplificações dos modelos devem ser consideradas na análise do processo.

Com relação aos ensaios de estímulo-resposta com NaCl para as condições investigadas na Etapa 1, onde foram variados os valores da $TAS_{z,r}$ e do $Td_{z,r}$ mantendo-se constante o valor de p , verifica-se que o incremento da $TAS_{z,r}$ incorreu em diminuição do número de Peclet (Pe) indicando menor grau de mistura. No entanto, nestas condições verificou-se um aumento da aglutinação. Esta aparente contradição pode ter origem no procedimento adotado durante o ensaio. Devido a impossibilidade de submergir a sonda utilizada para leitura da condutividade, o ponto de amostragem foi locado na porção superior da USMB. Ora, se as condições de mistura variam ao longo da altura da zona de reação, conforme discutido por Shawwa & Smith (1998), pode-se supor que a porção inferior sofreu alteração do grau de mistura de forma diferente a porção superior. Acredita-se que a porção inferior da USMB sofreu aumento do grau de mistura com o incremento da $TAS_{z,r}$, ao contrário do ocorrido na porção superior. No entanto, no computo geral do comportamento do escoamento na USMB o aumento da $TAS_{z,r}$ incorreu em diminuição no grau de mistura. Esta suposição encontra respaldo em ensaios visuais realizados com traçador onde pôde ser verificado uma maior dispersão de traçador na porção inferior da USMB quando houve incremento da $TAS_{z,r}$. Além disso, nos ensaios realizados por Shawwa & Smith (1998), a zona de reação investigada era constituída de uma coluna de 6cm de diâmetro enquanto que, na presente pesquisa, foi utilizada uma zona de reação piloto com escoamento

contínuo (USMB). Esta unidade possuía entrada horizontal, placa defletora e a porção inferior possuía volume bem maior que a porção superior, assimilando-se ao formato de um bocal.

Certamente o exemplo analisado não extrapola todas as possibilidades de alteração das condições de flotação mas ajuda a raciocinar sob a implicação da alteração da frequência volumétrica no número de micro-bolhas disponíveis, uma vez que a análise sob o ponto de vista do $D_{\text{médio}}$ ou D_{Sauter} não possibilita tal avaliação. Uma análise mais detalhada da variação das micro-bolhas e dos flocos será apresentada no capítulo seguinte com base nos efeitos da cinética de choques devido ao campo turbulento (a1 ou a2) e a velocidade relativa (a3), tomando por base o modelo apresentado por Reali (1991).

Figura 4.21 Efeito do tamanho das micro-bolhas no gradiente de velocidade e na velocidade ascensional. Cálculos realizados para T25°C utilizando a equação de Stokes segundo validação apresentada por Reali (1991) para micro-bolhas de até 140 μm .

5micra

15micra

25micra

35micra

45micra

55micra

65micra

75micra

85micra

95micra

105micra

115micra

4.5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste capítulo foi possível concluir:

- ✓ As condições de mistura na zona de reação (USMB) foram influenciadas pela geometria da unidade e pela razão de recirculação (p). No caso investigado, a mistura causada por maiores valores de p foi mais evidente para os menores valores de $TAS_{z,r}$ investigados;
- ✓ A alteração das condições de mistura, pH, Al^{+3} e p não alteraram significativamente o $D_{médio}$ (18 a 30 μ m). No entanto, verificou-se em alguns casos, um deslocamento acentuado da fração volumétrica de micro-bolhas podendo incorrer em alteração da eficiência do processo de FAD;
- ✓ A variação das condições de mistura proporcionou a maior alteração da distribuição volumétrica das micro-bolhas quando comparada as demais situações investigadas.

5. ZONA DE REAÇÃO: O EFEITO DO TAMANHO DE MICRO-BOLHAS (DTMB) E PARTÍCULAS (DTP), TEMPO DE DETENÇÃO NA ZONA DE REAÇÃO ($TD_{Z.R}$) E RAZÃO DE RECIRCULAÇÃO (p) NO DESEMPENHO DE UMA UNIDADE PILOTO DE FAD OPERANDO NO MODO CONVENCIONAL.

Resumo do capítulo

A sensibilidade do modelo matemático proposto por Reali (1991) para a zona de reação de unidades de FAD convencional foi verificada com base nos parâmetros de projeto: tempo de detenção e taxa de aplicação superficial na zona de reação ($td_{z,r}$ e $TAS_{z,r}$), taxa de aplicação superficial na zona de clarificação TAS_{ap} (downflow); e com base nos parâmetros operacionais: distribuição de tamanho de partículas (micro-bolhas e flocos) e razão de recirculação (p). Os parâmetros foram avaliados através da operação de uma unidade de FAD em escala piloto (capacidade máxima de 1500l/h) tratando água para abastecimento com 50uC e 05 uT. A determinação da distribuição de tamanho de flocos (DTP) e da distribuição de tamanho das micro-bolhas (DTMB) foi realizada por meio de técnica não-intrusiva que emprega análise de imagem (Capítulo 2). Com base na análise de imagem foram obtidos: diâmetros médios de bolhas e flocos, gradientes de velocidade no interior da zona de reação e densidade volumétrica de flocos. Os resultados demonstraram que o modelo proposto por Reali (1991) foi sensível a variação dos parâmetros e ao desempenho da unidade piloto investigada tendo potencial para ser utilizado para análise qualitativa e comparação entre parâmetros de projeto da zona de reação de unidades convencionais de FAD.

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Há cerca de oito décadas a Flotação por Ar Dissolvido (FAD) vem sendo aplicada no tratamento de água. No Brasil, a Estação de Tratamento de Água (ETA) de Meaípe-ES foi a primeira a empregar a FAD como unidade de clarificação (inaugurada em 1994 mas operada desde 1989), embora Richter e Gross (2000) apontem como pioneira a ETA Döhler, em Joinville-SC. O projeto das unidades de FAD foi, por muito tempo, baseado em resultados empíricos. Somente em 1993, a *Water Reseach Commission* da África do Sul produziu um documento com parâmetros de projeto para a FAD, baseado na larga experiência prática obtida naquele país.

O aumento das pesquisas e da experiência adquirida com as unidades em operação proporcionou muitos avanços. Entre eles podem ser citados: mudanças nas condições de coagulação e floculação que culminaram no menor consumo de produtos químicos e menor tempo de floculação; incremento da taxa de aplicação

superficial (TAS) nos tanques de FAD (de 4-10m/h nos anos 90 até propostas mais recentes de 40 m/h); e alterações no sistema de fornecimento de ar cuja adoção de recheio na câmara de saturação resultou em aumento considerável na eficiência desta unidade (SCHOFIELD, 2000). No entanto, muitas questões permanecem ainda obscuras.

Uma delas remete a região do tanque de FAD denominada zona de reação (z.r). Esta região é a primeira¹ e principal a promover condições para que as partículas colidam com as micro-bolhas liberadas. Neste sentido, Haarhoff e Edzwald (2001), afirmam que a interação entre as partículas e as bolhas de ar dispersos no meio líquido aliado às condições hidrodinâmicas do reator de FAD é um fenômeno complexo e pouco compreendido.

As condições de mistura e o tempo de detenção são parâmetros fundamentais para o dimensionamento da zona de reação e desempenham papel importante no desempenho do processo de FAD (KITCHENER; GOCHIN, 1981). No entanto, apesar da importância da zona de reação, os parâmetros de projeto para essa região do tanque de FAD são muito dispersos e imprecisos. Haarhoff e van Vuuren (1995), recomendam tempos de detenção entre 40 e 120 segundos e $TAS_{z,r}$ de 40 a 100m/h. Lundh, Jönsson e Dahlquist (2001) sugerem $TAS_{z,r}$ de 65m/h recomendando valores menores que 98m/h para propiciar melhor condição de mistura e tempo de detenção ($td_{z,r}$) maiores que 45 segundos. No entanto, essas recomendações foram baseadas através da análise de resultados empíricos, no caso de Haarhoff e van Vuuren (1995), ou somente baseado nas questões hidrodinâmicas da zona de reação, no caso de Lundh, Jönsson e Dahlquist (2001).

Acredita-se que o melhor entendimento dessas questões, aliada ao conhecimento das partículas presentes (bolhas e flocos), pode conduzir ao aprimoramento das unidades de FAD. Por isso, é necessária a continuidade de pesquisas visando obtenção de parâmetros de projeto confiáveis, capazes de reduzir os custos de implantação e operação e garantir uma melhor qualidade do efluente.

Entre os principais parâmetros de projeto de unidades de FAD podem ser citados: o tempo de detenção ($td_{z,r}$) e a taxa de aplicação superficial ($TAS_{z,r}$) na zona de reação (z.r), a $TAS_{z,c}$ na zona de clarificação (z.c), o fornecimento de ar expresso em termos da razão de recirculação (p) e as condições de floculação que determina a distribuição de tamanho de flocos (DTP). Em última análise, estes parâmetros estão atrelados às condições de mistura entre bolhas e flocos que depende, também, das características hidrodinâmicas e da distribuição de partículas no interior do reator de FAD. Nesse sentido, o conhecimento das características físicas das partículas é imprescindível.

Lawler (1997) argumenta que muitos dos poluentes em água ou esgoto são ou serão transformados em partículas antes da remoção final. Assim como, Tchobanoglous (1995) afirmando que:

¹ Primeira, pois acredita-se que a parte superior da zona de clarificação possa desempenhar um papel secundário no encontro entre bolhas e flocos.

A distribuição de tamanho de partículas dos contaminantes presentes em água ou água residuária é importante na avaliação da tratabilidade, seleção e projeto dos processos de tratamento, monitoramento, controle e avaliação da eficiência dos processos. (TCHOBANOGLIOUS, 1995, p. 2).

A abordagem puramente construtiva das unidades de tratamento deixou de ser único parâmetro para projeto onde aspectos microbiológicos e químicos passaram a ter igual importância. Atualmente, o conhecimento das características físicas dos sólidos presentes surge como ferramenta potencial para o aprimoramento na concepção e projeto de unidades de separação sólido/líquido empregadas no tratamento de água e esgoto (SANTOS et al., 2004).

Descrita por Tchobanoglous (1995) como a “próxima fronteira” do conhecimento, a caracterização das partículas apresenta-se como promissora ferramenta no campo do tratamento de água e esgoto sanitário.

O tamanho adequado dos flocos para a FAD é tema de grande discordância entre pesquisadores. Tal fato se deve, principalmente, as diferentes hipóteses adotadas nos modelos utilizados para descrever o choque entre as bolhas e flocos. A faixa de tamanho ideal para os flocos é de 10-30 μ m para Malley e Edzwald (1991b) e de 10-10³ μ m para Fukushi, Tambo e Matsui (1995). Estas divergências conduzem, numa última avaliação, a diferentes condições de floculação. Por exemplo, Malley e Edzwald (1991b) recomendam um curto tempo de floculação (T_f da ordem de 5 a 10 minutos) em elevados valores de gradientes médios de velocidade (G_f da ordem de 90s⁻¹). Já Fukushi, Tambo e Matsui (1995) recomendam flocos grandes (produzidos com valores de gradiente médio de velocidade em torno de 50 s⁻¹ e tempo de floculação maior que 15 minutos). Observa-se na prática uma tendência à adoção de valores maiores de gradientes médios de velocidade (G_f) e menores tempos de floculação (T_f) que conduziram a tamanhos menores de flocos. No entanto, esta postura deve ser considerada com critério uma vez que as características da água determinam as das partículas formadas e uma generalização pode induzir a erros grosseiros. Haarhoff e van Vuuren (1995) compilaram informações de mais de 26 estações que empregam a FAD e verificaram que as condições de floculação entre elas foram bastante variadas. Foram encontrados valores de G_f de 45 a 150 s⁻¹ para valores de T_f que variaram de 5 a 120 minutos. Os autores foram prudentes em recomendar G_f de 50 a 120 s⁻¹ e T_f de 4 a 15 minutos.

Haarhoff e van Vuuren (1995) comentam que o contato e o crescimento dos aglomerados formados por bolhas e flocos na zona de reação dependem do tempo e da intensidade da mistura. Neste trabalho, o tempo foi calculado com base no tempo médio de detenção ($td_{z,r}$) e o grau de mistura foi estimado com base na taxa de aplicação superficial ($TAS_{z,r}$). Os autores encontraram, nas unidades operando na África do Sul, valores de $td_{z,r}$ que variaram de 40 a 267 segundos para $TAS_{z,r}$ variando de 19 a 222 m/h. Os autores afirmaram que das 26 estações de FAD visitadas, quatro possuíam sérios problemas que culminaram em intervenções; em todos os casos as intervenções propostas centraram-se na zona de reação.

Assim, o aprimoramento de unidades de FAD é fortemente dependente das condições presentes na zona de reação ($z.r$) estabelecidas em projeto (geometria, $td_{z.r}$ e $TAS_{z.r}$ e Tf) e das condições operacionais (p e Gf). O foco deste trabalho consistiu em investigar a influência dos parâmetros de projeto e operacionais da zona de reação no desempenho de uma unidade piloto de FAD operando no modo convencional. O desempenho foi analisado, com base na eficiência de remoção de cor aparente e turbidez, frente às variações de distribuição de tamanho de flocos (DTP), bolhas (DTMB), razão de recirculação (p) e tempo de detenção na zona de reação ($td_{z.r}$). O modelo proposto por Reali (1991) foi utilizado como ferramenta para balizar as discussões realizadas e avaliar a influência no desempenho da unidade de FAD investigada frente a variação das condições de mistura, da distribuição de tamanho de partículas (micro-bolhas e flocos) e do tempo de detenção hidráulica na zona de reação.

Suposição levantada: O valor de β_{td} ou β do modelo proposto por Reali (1991), para a zona de reação de unidades de FAD convencionais, pode ser utilizado para avaliação do desempenho da FAD e para a adoção de parâmetros de projeto da zona de reação ($TAS_{z.r}$ e $td_{z.r}$).

Objetivo específico do capítulo: Avaliar a sensibilidade do modelo proposto por Reali (1991) para a zona de reação de FAD, com base nos resultados de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez, frente às alterações da distribuição de tamanho de micro-bolhas e flocos, da razão de recirculação (p) e do tempo de detenção na zona de reação ($td_{z.r}$) da unidade piloto de FAD investigada.

5.2 “BACKGROUND”

5.2.1 Considerações Iniciais a Respeito da Modelação Matemática para a Flotação

São muitos os modelos que buscam interpretar e relacionar os diversos parâmetros envolvidos no processo de FAD para reatores convencionais de 2ª geração (FLINT; HOWARTH, 1971; REAY; RATCLIFF, 1973; CORNET; MOISSE, 1982; REALI, 1991b; MALLEY; EDZWALD, 1991; FUKUSHI; TAMBO; MATSUI, 1995; LIERS; BAEYENS; MOCHTAR, 1996; MATSUI; FUKUSHI; TAMBO, 1998; LEPPINEN, 2000; AYMAN; SMITH, 2000; LEPPINEN; DALZIEL, LINDEN, 2001; HAN; KIM; DOCKKO, 2001; HAARHOFF; EDZWALD, 2001).

Em todos eles, as condições nas quais ocorre o encontro entre as partículas pré-tratadas e as micro-bolhas, assim como os tamanhos envolvidos, aparecem como parâmetros importantes do processo.

Nesta seção serão apresentados três modelos matemáticos, para a região denominada zona de reação dos tanques de FAD, propostos por diferentes autores. A razão principal para tal foi contrapor as diferenças conceituais entre os modelos e discuti-las de modo a aprofundar o conhecimento e criar bagagem crítica dos

mesmos. No entanto, o modelo proposto por Reali (1991) foi priorizado pois a avaliação da sensibilidade deste modelo constituiu o foco principal desta tese.

Assim, destacam-se os modelos matemáticos apresentados por Malley e Edzwald (1991b), Reali (1991) e Fukushi, Tambo e Matsui (1995). Nestes, os autores apresentam como fundamentais a distribuição de tamanhos de partículas e micro-bolhas na zona de reação da unidade de flotação. Embora discordem quanto ao tamanho ideal das partículas, o que realmente difere as modelações são as teorias utilizadas para descrever o encontro entre micro-bolhas e flocos.

Enquanto Malley e Edzwald (1991b) apresentam a teoria do coletor simples *Single Collector Efficiency* (SCE) em escoamento laminar onde o principal mecanismo de contato entre micro-bolhas/flocos é a interceptação, Fukushi, Tambo e Matsui (1995) utilizam um modelo baseado no encontro de partículas em campo turbulento. Já Reali (1991) apresenta um modelo baseado na teoria de encontro de partículas utilizada para floculação e introduz a velocidade relativa entre as partículas (bolhas e flocos) como importante componente na eficiência de colisão (Tabela 5.1).

O modelo proposto por Malley e Edzwald (1991b) descreve a remoção das partículas através da colisão e da velocidade ascensional do conjunto como função de dois mecanismos: o transporte da partícula até a superfície das bolhas; a aderência entre partículas e bolhas. A deposição da partícula na superfície da bolha é descrita através da teoria do coletor simples (Figura 5.1). Esta teoria foi utilizada também por Hint e Howarth (1971) e Reay e Ratcliff (1973) para descrever o processo de flotação. O mesmo conceito foi utilizado por Yao, Habibian e O'Melia (1971) para descrever a remoção de partículas na filtração rápida.

Figura 5.1 Mecanismos de transporte das partículas segundo a teoria do coletor simples (SCE) (A: gravidade; B: interceptação; C: movimento Browniano). Fonte: Malley e Edzwald (1991b)

Na modelação proposta por Malley e Edzwald (1991b), o mecanismo de transporte dominante na FAD é a interceptação. A difusão e a sedimentação são consideradas importantes embora menos relevantes. O impacto inercial não é considerado relevante para a FAD, uma vez que as bolhas e flocos formados são pequenos, no entanto, este mecanismo é relevante para a flotação por ar disperso onde as bolhas são maiores que as partículas (no caso da flotação de minérios, por exemplo). Quanto ao efeito da taxa de recirculação e a da pressão de saturação,

esta é expressa em termos de volume de ar fornecido por volume de água tratada ($\mathcal{O}_B$). Maiores valores de $\mathcal{O}_B$ indicam maior número de micro-bolhas aumentando a oportunidade de colisão entre bolhas e flocos.

Já para Fukushi, Tambo e Matsui (1995), a zona de contato é, na prática, uma região de turbulência na qual ocorre uma certa dissipação de energia (Figura 5.2). Com isso, quanto maior o tamanho dos flocos, maior a probabilidade de choque e menor a densidade das partículas, favorecendo a FAD. O mecanismo de interceptação, principal responsável pelo choque entre bolhas e partículas segundo modelação proposta por Malley e Edzwald (1991b), desempenha um papel secundário na modelação proposta por Fukushi, Tambo e Matsui (1995). Este, desempenharia uma pequena contribuição no estágio final da zona de mistura ou no tanque de flotação, onde a concentração de bolhas disponíveis é pequena.

Figura 5.2 Colisão entre bolhas e flocos com colisão em campo turbulento.
Fonte: Fukushi, Tambo e Matsui (1995).

Com relação ao tamanho ideal dos flocos formados na etapa de pré-tratamento existem grandes diferenças entre as modelações propostas por Malley e Edzwald (1991b), Reali (1991) e Fukushi, Tambo e Matsui (1995). Enquanto para Malley e Edzwald (1991b) flocos pequenos (da ordem de 10 a 100 micra) são recomendados, para Reali (1991) e Fukushi, Tambo e Matsui (1995) quanto maior o floco formado, maior a eficiência do processo, uma vez que a probabilidade de choque aumenta consideravelmente conforme aumenta o tamanho médio dos flocos (considerando a mesma quantidade de bolhas dispersas).

Tabela 5.1 - Principais diferenças e semelhanças entre os modelos apresentados por Reali (1991), Malley e Edzwald (1991b) e Fukushi, Tambo e Matsui (1995).

		REALI (1991)	FUKUSHI (1995)	MALLEY E EDZWALD (1991)
Micro-bolhas de ar				
Velocidade ascensional (cm/seg)		$V=gd^2/18?$	$V=gd^2/12?$	$V=gd^2/18?$
Flocos				
Faixa de tamanho recomendada (μm)		Nas modelações propostas favorecem a eficiência da FAD	maiores flocos	10^0 - 10^2 (recomendado 10-30 μm)
Colisão e aglomeração entre bolhas e flocos				
Modelo de colisão		Modelo de colisões em campo turbulento e da velocidade relativa	Modelo de balanço de população	Modelo do coletor simples
Regime de escoamento		Turbulento	Turbulento	Laminar
Mecanismo de aglomeração		Turbulência localizada, difusão viscosa e sedimentação relativa	Turbulência localizada, difusão viscosa	Difusão browniana, interceptação, gravidade

Dentre as várias dessemelhanças apresentadas na Tabela 5.1, percebe-se uma especial discrepância com relação ao tamanho ideal dos flocos produzidos e a densidade dos mesmos. A faixa de tamanho ideal para os flocos é de 10-30 μ m para Malley e Edzwald (1991b) e de 10-10³ μ m para Fukushi, Tambo e Matsui (1995). Para Malley e Edzwald (1991b) a densidade dos flocos é assumida constante 1,01 g/cm³, já para Fukushi, Tambo e Matsui (1995) a densidade dos flocos é apresentada como uma função onde flocos maiores possuem menores valores de densidade favorecendo a FAD.

Estas divergências nas modelações conduzem a diferentes posturas operacionais nas unidades de FAD. Como consequência dos flocos pequenos, Malley e Edzwald (1991b) recomenda um curto tempo de floculação (da ordem de 5 a 10 minutos) em elevados valores de gradientes médios de velocidade (da ordem de 90s⁻¹). Fukushi, Tambo e Matsui (1995) recomenda flocos grandes (produzidos com valores de gradiente médio de velocidade em torno de 50 s⁻¹ e tempo de floculação maior que 15 minutos) desde que a eficiência de colisão é função do tamanho das partículas elevado ao cubo.

5.2.2 Alguns Modelos Matemáticos para a Zona de Reação da Unidade de FAD

Com relação à modelação matemática de reatores convencionais de FAD, Reali (1991) desenvolveu uma modelação teórica correlacionando os parâmetros fundamentais do processo de flotação – tais como tamanho dos flocos e das bolhas, vazão de recirculação e concentração de saturação de ar – com a eficiência desse processo de separação sólido/líquido. A modelação contempla, também, o parâmetro de projeto TAS bem como o tempo de detenção na zona de reação.

A Equação (1) apresenta-se como a idéia central da modelação proposta no referido trabalho. Para sua dedução, como hipótese, foram consideradas como efetivas somente as colisões entre bolhas e flocos, supondo-se, desta forma, que não ocorra aglutinação das micro-bolhas devido aos choques entre as mesmas ao longo da zona de contato dos flotores. Sendo assim, a taxa de colisões efetivas entre bolhas e flocos (N_{BF}) nessa região torna-se numericamente igual à “taxa de consumo” de micro-bolhas (d_{NB}/dt) multiplicada pelo fator (-1) para indicar que a concentração de bolhas decresce ao longo do tempo.

Supondo-se também que o fluxo de sólidos (α) afluentes ao reator seja constante, após atingir o regime de equilíbrio, foi considerado que a concentração (N_F) de flocos ao longo da zona de contato seja constante e igual a N_{FO} . Foi admitido também que o aumento de volume dos flocos “porosos”, devido à incorporação das micro-bolhas que colidirem com o mesmo, seja desprezível. Dessa forma, pode-se supor que a “taxa de consumo” de micro-bolhas pelos flocos (d_{NB}/dt), a qual reflete a eficiência da flotação, é igual a:

$$\frac{d_{NB}}{dt} = -N_{BF} = -(N_{FO}\alpha)N_b \quad (1)$$

em que:

$$\begin{array}{ll} \mathbf{a} = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_3 & \text{para } \mathbf{h} > (d_B + d_F/2) \\ \mathbf{a} = \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3 & \text{para } \mathbf{h} < (d_B + d_F/2) \end{array}$$

Sendo que $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ e $\mathbf{a}_3$ são definidos como o fluxo de sólidos na sub-região viscosa e inercial (α_1 e α_2) e o fluxo de sólidos devido à velocidade relativa dos flocos em relação às micro-bolhas de ar (α_3).

Por outro lado, deve-se ressaltar que grande parte das colisões não resulta na aderência de micro-bolhas ao floco, ou seja, deve ser adicionado um fator de eficiência de colisão (β) multiplicando a Equação (1), cujo valor é sempre menor que a unidade e que será suposto sempre constante ao longo da zona de contato. Na verdade $\mathbf{b}$ leva em conta a efetividade das colisões, e está relacionado com as características dos flocos (por exemplo, hidrofobicidade e estrutura) e com o tamanho e características de superfície das micro-bolhas. Dessa forma a equação (1) fica:

$$\frac{d_{Nb}}{dt} = -(N_{FO}\mathbf{ab})N_b \quad (2)$$

De acordo com as hipóteses anteriormente descritas; o termo entre parênteses na Equação (2) é constante, então pode-se escrever:

$$\frac{d_{Nb}}{N_b} = -(N_F\mathbf{ab})dt \quad (3)$$

A Equação (3) pode então ser integrada:

$$\int_{N_{bo}}^{N_{bt}} \frac{d_{Nb}}{N_b} = - \int_0^t (N_{FO}\mathbf{ab})dt \quad (4)$$

em que: N_{bt} : concentração de micro-bolhas após o tempo t
 N_{bo} : concentração inicial de micro-bolhas de ar

Resultando:

$$\frac{N_{bt}}{N_{bo}} = e^{-(N_{bo}\mathbf{ab})t} \quad (5)$$

Assumiu-se que para atingir uma determinada eficiência de remoção de flocos no reator seja necessário que os aglomerados flocos + bolhas adquiram uma determinada velocidade ascensional no final da zona de contato, para que possam vencer a tendência de arraste provocada pelo fluxo descendente da água existente na zona de flotação (cujas intensidade varia conforme as linhas de fluxo na zona de flotação e dependem do valor da taxa de aplicação superficial existente no reator).

Dessa forma, supondo-se que todos os flocos sejam idênticos e uniformemente distribuídos na zona de contato, e que atinjam a velocidade ascensional desejada (associada a n), resulta:

$$(N_b)_{t-t_d} = N_{bo} - nN_{fo} \quad (6)$$

em que: $(N_b)_{t=td}$: concentração de bolhas no final da zona de contato, no tempo de detenção hidráulico igual a td
 n : número de bolhas a serem aderidas a cada floco para que os mesmos atinjam uma determinada velocidade ascensional.

Colocando-se (6) em (5), obtém-se:

$$\frac{N_{bo} - nN_{fo}}{N_{bo}} = e^{-(N_{bo}ab)td} \quad \frac{N_{bo}}{N_{fo}}, \text{ válida para } n < \frac{N_{bo}}{N_{fo}} \quad (7)$$

Aplicando-se o logaritmo neperiano, resulta:

$$btd = \left[\ln \left(1 - n \frac{N_{fo}}{N_{bo}} \right) \right] \frac{1}{N_{fo}a} \quad (8)$$

Desenvolvendo a Equação (8) e substituindo-se os valores de N_{fo} , resulta:

$$btd = - \left\{ \ln \left[1 - \frac{nF}{S_v \rho} \left(\frac{d_B}{d_F} \right)^3 \right] \right\} \frac{p(1+p)d_F^3}{6fa} \quad (9)$$

O valor de td na Equação (9), pode ser interpretado como sendo o tempo detenção teórico que se deve ter na zona de contato para que se atinja o número n de bolhas aderidas em cada floco. O fator b define a efetividade dos choques e depende de diversos fatores (tais como número de sítios hidrófobos nos flocos, “forma estrutural dos flocos”, tamanho das bolhas, etc) apresentando valor sempre menor ou igual à unidade. Assim, em uma situação ideal, onde todas as colisões fossem efetivas ($\beta = 1,0$), o valor td encontrado pela Equação (9) representaria o tempo teórico necessário para que todos os flocos atingissem a velocidade estipulada.

Por outro lado, se for assumido um certo valor de tempo de detenção na zona de contato e tendo-se calculado o valor de btd , é possível calcular o inverso de b ($1/\beta$), que representa o número teórico de choques por floco “disponíveis” no reator para fornecer pelo menos 1 choque efetivo (REALI, 1991). Em resumo, quanto maior o valor de btd encontrado, pior é a situação, pois para se atingir a eficiência desejada exigir-se-ia ou um tempo de detenção maior (fixando-se β) ou maiores valores de b (flocos com maior número de sítios hidrófobos, por exemplo), se o tempo de detenção for fixo.

Segundo Malley e Edzwald (1991b), a eficiência de remoção de partículas por uma única bolha pode ser expressa de acordo com a equação 10.

$$R = a_{pb} h_T (100\%) \quad (10)$$

onde:

$$a_{pb} = \text{eficiência de adesão entre partícula e bolhas}$$

h_r = eficiência total coletor simples

A eficiência total do coletor simples (h_r) é definida como a soma da eficiência de cada mecanismo de transporte (equação 11).

$$h_r = h_D + h_I + h_S + h_{IN} \quad (11)$$

em que:

h_D = eficiência de acordo com o mecanismo de difusão

h_I = eficiência de acordo com o mecanismo de interceptação

h_S = eficiência de acordo com o mecanismo de sedimentação

h_{IN} = eficiência de acordo com o mecanismo de impacto inercial

O efeito do mecanismo de impacto inercial não é considerado significativo para partículas e bolhas menores que 100 μ m. Os efeitos dos demais mecanismos são mostrados na Figura 3.7.

Figura 5.3 Eficiência da teoria do coletor simples vs tamanho de partícula segundo mecanismos de difusão browniana (h_D), interceptação (h_I) e sedimentação (h_S). Considerando densidade de partículas de 1,01 g/cm³ e diâmetro das micro-bolhas de 40 μ m. Fonte: Adaptado de Edzwald (1995).

A Figura 5.3 mostra que h_r tem valor mínimo para partículas em torno de 1 μ m. A eficiência é controlada pelo mecanismo de difusão browniana para partículas menores que 1 μ m e pelo mecanismo de interceptação para partículas maiores que 1 μ m. O mecanismo de sedimentação não é considerado efetivo para as considerações adotadas.

Para um sistema contendo um determinado número de bolhas (N_b) e partículas (N_p) a equação 12 é sugerida pelo autor.

$$dN_p/dt = -(\mathbf{a}_{pb} \mathbf{h}_T)(A_b U_b N_b) N_p \quad (12)$$

onde:

N_p = número de partículas

A_b = área projetada da bolha

O termo do lado direito da equação apresenta parâmetros chave para projeto e operação das unidades de FAD. $\mathbf{a}_{pb}$ e N_p são parâmetros controlados pela etapa de pré-tratamento (coagulação e floculação). A floculação reduz o número de partículas que, por sua vez, reduz a taxa de colisão. No entanto o diâmetro da partícula aumenta, aumentando a probabilidade de choques (função d_p^2).

Quanto ao diâmetro das micro-bolhas, observa-se que de maneira geral, a taxa de remoção de partículas é inversamente proporcional ao diâmetro das bolhas. Isto significa que bolhas menores aumentam a eficiência do processo.

Na prática, projetistas e operadores podem controlar a concentração de ar na zona de reação através do taxa de recirculação e da pressão de saturação. Quanto à concentração das partículas, a coagulação aumenta o número de partículas através da precipitação enquanto que a floculação diminui o número de partículas aumentando, porém, o diâmetro das mesmas.

O modelo proposto por Fukushi, Tambo e Matsui (1995) é formulado através da variação do número de flocos com uma determinada quantidade de bolhas conectadas. Foi assumido: i) diâmetro médio de bolhas de 60 μm , ii) não existe ruptura da ligação bolhas-floco e, iii) existe um número máximo de bolhas (m_F) conectadas em um floco de diâmetro d_f . A equação 13 apresenta a formulação final proposta pelos autores.

$$N_{F,i} = m_F C_i \exp\{-(1+F)^3 \Theta\} \cdot [\exp\{(1+F)^3 \Theta / m_F\} - 1]^i \quad (i=0 \text{ ate } m_F) \quad (13)$$

onde:

$N_{F,i}$ = concentração de flocos de tamanho F com i bolhas

m_F = número máximo de bolhas em um floco de tamanho F

F = tamanho do floco

Θ = tempo de mistura (reação)

O modelo considera que existe um número máximo de micro-bolhas (m_F) aderidas aos flocos de modo a promover a velocidade ascensional necessária para sobrepujar os efeitos das linhas de corrente na zona de separação do tanque. Para Fukushi, Tambo e Matsui (1995), flocos grandes necessitam de um menor tempo de contato na zona de reação para obter a mesma velocidade ascensional, uma vez que flocos grandes adquirem maiores velocidades em menores tempos de contato.

No caso de uma situação hipotética extrema, onde o número de micro-bolhas é insuficiente para promover a aderência entre todos os flocos presentes, somente os flocos maiores seriam removidos uma vez que a probabilidade de choque é muito maior.

Por outro lado, deve-se levar em conta que flocos maiores necessitam de um maior número de micro-bolhas aderidas o que, na prática, implicaria em maior tempo de detenção na zona de contato do reator.

Embora a maioria dos modelos seja focada na zona de reação da unidade piloto Lee e Kim (2003a, 2003b) apresentaram formulação cujo princípio baseia-se no efeito de filtro das bolhas na zona de clarificação. Os autores identificaram que existe um tamanho crítico (relacionado com o tamanho de vazios de um conjunto de micro-bolhas) a partir do qual o conjunto bolha-floco começa a sedimentar. O princípio é muito semelhante ao apresentado por Reali (1991), onde foi identificado o número mínimo de micro-bolhas aderidas a um floco para que este se torne flotável.

5.2.3 Hidrodinâmica dos Tanques de Flotação

As características hidrodinâmicas das unidades de FAD são pouco conhecidas. De modo geral, observa-se através dos trabalhos que a turbulência provocada na zona de reação da unidade se propaga para a zona de clarificação. Uma outra característica observada é que a zona de clarificação apresenta padrões de recirculação interna.

Alguns dos trabalhos (TA; BECKLEY; EADES, 2001; HAGUE, et al., 2001) apresentam resultados extraídos de modelos de dinâmica computacional dos fluidos (CFD). Outros, tais como: Ayman et al. (1998), Leppinen, Dalziel Linden (2000) e Lundh, Jönsson e Dahlquist (2001, 2002), apresentam resultados de investigações em unidades de laboratório e em escala piloto.

Ayman et al. (1998), desenvolveu um trabalho de investigação visando caracterizar as condições na zona de contato de uma coluna de FAD em escala de laboratório. Para tal, foram realizados ensaios com traçador (estímulo-resposta) visando caracterizar o grau de mistura e o tempo de contato na região de reação. O grau de mistura foi analisado em termos do adimensional número de Peclet (definido como o inverso do número de dispersão N_d) enquanto que o tempo de mistura foi analisado através da curva de Distribuição do Tempo de Residência (DTR). Foram analisadas diferentes taxas de aplicação superficial (30 a 90m/h) e diferentes valores de recirculação de água saturada (0,5% a 10%). Tais autores concluíram que o grau de mistura aumentou com o aumento da recirculação porém, verificou-se uma diminuição no grau de mistura proporcional ao aumento da taxa de aplicação superficial. Verificou-se também, que o aumento da taxa implica, como era de se esperar, numa diminuição do tempo de contato diminuindo a oportunidade de choque entre bolhas e flocos. No entanto, Tambo (1990) apud

AYMAN et al., 1998)², sugere que um tempo de contato de 15 a 20 segundos é suficiente para promover a agregação bolhas-flocos.

Hague et al. (2001), investigaram a hidrodinâmica da zona de clarificação de uma unidade de FAD em escala piloto operada com a taxa de 10,6 m/h. Para isso, utilizaram um equipamento de laser (LDV). Primeiramente foram conduzidos ensaios somente com água (uma fase) e, posteriormente, com recirculação de água saturada (duas fases). Os autores verificaram um evidente padrão de recirculação longitudinal no interior da unidade de clarificação quando foi estudada somente uma fase. No entanto, com a introdução da vazão de água saturada no sistema, verificou-se uma mudança nas condições de escoamento onde recirculações secundárias foram verificadas principalmente ao longo da largura do reator. Os pesquisadores afirmam que velocidades da ordem de $3 \times 10^{-2} \text{ms}^{-1}$ foram tipicamente encontradas no interior da unidade. Nestas condições, assumindo diâmetros de bolhas da ordem de $50 \mu\text{m}$, verificou-se que o escoamento possui $1,5 \times 10^3$ vezes a velocidade ascensional das micro-bolhas justificando o arraste das micro-bolhas juntamente com o efluente da unidade.

Lundh, Jönsson e Dahlquist (2002), apresenta o mais completo trabalho sobre as características hidrodinâmicas na zona de contato e clarificação de uma unidade piloto de FAD de 2º geração. Foram estudadas diferentes configurações para a zona de contato variando a taxa de aplicação superficial de 40 a 98 m/h. O perfil de velocidade foi determinado em pontos definidos da unidade empregando equipamento de ultra-som (microADV da SonTek). Os resultados demonstraram que, para as configurações investigadas, a zona de contato foi caracterizada como uma região turbulenta na parte inferior e como uma região com escoamento *plug-flow* na parte superior. A taxa de aplicação superficial na zona de contato influenciou na extensão da turbulência. Valores elevados de taxa de aplicação superficial ocasionaram num aumento do fluxo tendendo a pistão e vice-versa, sendo a taxa de 65 m/h recomendada por estes autores para projeto de unidades. O tamanho e a inclinação da placa defletora da zona de contato não demonstrou ter grande influência na região turbulenta, no entanto, alturas maiores que 0,80m foram recomendadas visando promover a mistura e o escoamento pistonado. Quanto à zona de clarificação, o autor a caracterizou como uma região de grande estratificação, muito influenciada pela *cross-flow*, que é função da distância entre o ponto mais alto da placa defletora da zona de contato e o nível d'água na zona de clarificação.

² TAMBO, N. Optimization of flocculation in connection with various solid-liquid separation processes. In: HAHN, H.H.; KLUTE, R. **Chemical water and wastewater treatment**. Springer-verlag Berlin Heidelberg, 1990. p. 17-32.

5.3 MATERIAL E MÉTODOS ESPECÍFICOS DO CAPÍTULO

5.3.1 Aparato Experimental

Todos os ensaios foram conduzidos em uma unidade piloto de FAD montada nas dependências do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SHS/EESC/USP). Os procedimentos operacionais da unidade encontram-se descritos em Patrizzi (2002) e os procedimentos para operação do programa de aquisição e controle utilizado encontra-se descrito no Capítulo 2, seção 1 desta tese.

Para aquisição, tratamento e obtenção de tamanhos de micro-bolhas e flocos foram efetuadas análises em amostras indeformadas, através da utilização de instalação em escoamento contínuo combinada com método não intrusivo de aquisição de imagem (Figura 5.4). As imagens das micro-bolhas foram adquiridas em instalação denominada Unidade Separadora de Micro-bolhas (USMB), com características idênticas a da zona de reação da unidade piloto, e os resultados foram apresentadas no capítulo anterior (Capítulo 4). Os flocos foram fotografados na saída do último tanque do conjunto de floculação, na entrada da unidade piloto de FAD e a estratégia adotada para tal encontra-se descrita no item a seguir (item 5.3.2).

Foi utilizada uma câmera digital Nikon 5400 de 5.1MPixel com ajuste de foco manual e programada para disparo simples a 1/250. O plano de foco foi calibrado com fio de 1mm e iluminado por plano de laser com 2mm de espessura. A análise das imagens adquiridas foi realizada com o *software Image Tool*® versão 3.0. Todos os procedimentos adotados para aquisição, tratamento e obtenção de tamanhos foram descritos detalhadamente no Capítulo 2, seção 2 desta tese.

A Figura 5.5 apresenta uma imagem típica dos flocos adquirida após binarização da imagem original. No total foram analisados 31551 flocos garantindo amostras com 95% de intervalo de confiança com erro amostral < 1% (Tabela 5.3).

5.3.2 Estratégia Adotada para a Aquisição das Imagens dos Flocos

Para minimizar os efeitos da variação do afluente, todos os resultados apresentados referem-se a ensaios realizados com a mesma água preparada e estocada durante o período de três dias em reservatório de 15m³. Soluções de caulinita e ácido húmico comerciais foram adicionadas para conferir cor e turbidez nos valores desejados (50uC e 05uT). Os flocos foram adquiridos, através de método não-intrusivo, no interior da última câmara de floculação, na entrada do flotador, visando obter amostras indeformadas. O tratamento e determinação de tamanho foi o mesmo adotado para as micro-bolhas e encontra-se descrito no Capítulo 2 desta tese, seção 2.

Os fundamentos da determinação de tamanho de partículas podem ser vistos em Santos et al. (2004) e não foram apresentados por se tratarem de tema extenso e específico. No entanto, os princípios utilizados para a determinação do tamanho dos flocos foram os mesmos descritos por Allen (1997):

Todos os métodos disponíveis para determinação de tamanho de partículas fornecem como resposta (em princípio) um único número, o qual representa o tamanho da partícula. A esfera é a única forma passível de ser representada por um único número em todas as direções do espaço tridimensional. O princípio da esfera equivalente consiste em relacionar alguma das propriedades físicas das partículas ao diâmetro de uma esfera equivalente (Allen, 1997).

O tamanho dos flocos foi obtido através do princípio da esfera equivalente de mesma área de projeção no plano (2D). Para minimizar as irregularidades morfológicas e a variação na distribuição de tamanho foi adotado um tempo de floculação longo. Apesar de não investigado nas etapas de laboratório, a adoção do tempo de floculação de 34 minutos permitiu uma distribuição de tamanho mais estreita e uma maior circularidade das partículas (ver resultado na legenda da Tabela 5.3), minimizando o erro decorrente da aproximação da forma e da amostragem.

Figura 5.4 Esquema ilustrativo do método utilizado para a aquisição das imagens utilizadas para determinação das partículas e para o estudo da condição hidrodinâmica durante a operação da unidade piloto de FAD.

Figura 5.5 Exemplo de imagem dos flocos adquirida digitalmente após binarização utilizando *freeware Image Tool 3.0*. Coagulação com $2,25 \text{ mgAl}^{+3}/\text{L}$. Condições floculação $G_f 90\text{s-1}$ e $T_f 34$ minutos. Água bruta contendo $50 \mu\text{C}$ e $05 \mu\text{T}$, $T 22^\circ\text{C}$. . Circularidade $0,62$ ($\text{perímetro}^2/4 \cdot \text{p. área projetada}$) cálculos com 11035 flocos.

5.3.3 Condições Investigadas

Os ensaios foram realizados variando-se o tempo de detenção na zona de reação ($td_{z,r}$), a razão de recirculação (p), as condições de floculação (dois valores de G_f para um mesmo valor de T_f , de modo a se obter duas distribuições de tamanho de flocos distintas) e a taxa de aplicação superficial na zona de clarificação ($TAS_{z,c}$), de acordo com a Tabela 5.2. Foram apresentados somente os ensaios com o modo de operação convencional da unidade piloto (sem lamelas) pois esta foi o foco da modelação matemática proposta por Reali (1991) e, a partir da qual, foi embasada a discussão dos resultados.

É importante esclarecer que as condições investigadas na zona de reação foram as mesmas apresentadas no Capítulo 4 desta tese. Assim, os resultados de Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB) bem como o tempo de detenção obtido nos ensaios de estímulo e resposta foram utilizados neste capítulo.

O Capítulo 2 contemplou o erro referente ao método de análise de imagem utilizado. O erro referente à amostragem dos flocos encontra-se apresentado na Tabela 5.3. Conforme comentado, o erro na amostragem depende do número de amostras analisadas frente à população total. A estratégia utilizada para amostragem de flocos, apresentada no item 5.3.2 deste capítulo, teve como objetivo minimizar o erro referente à amostragem através da aquisição das imagens no interior da câmara de floculação bem como através da adoção de um longo tempo de floculação (34 minutos), visando a obtenção de uma distribuição de tamanho e forma o mais uniforme possível (circularidade $0,62$).

A população total de flocos não era conhecida, assim para o cálculo do número de flocos foi considerada uma população infinita. Foi coletada o máximo de imagens possível e o erro amostral, embora muito pequeno, foi diferente para cada condição de floculação investigada (Tabela 5.3).

Tabela 5.2 - Parâmetros e variáveis investigadas para avaliação da eficiência da unidade piloto de FAD na remoção de cor e turbidez frente às variações de $td_{z,r}$; $TAS_{z,c}$ e DTP*.

Fixos: P_{sat} 450±10KPa, T 22±1°C, D_{dp} registros de agulha 1/8", η não medida porém mantida inalterada através da utilização da mesma água.

Modo de operação da piloto	$TAS_{z,c}^a$ (m^3/m^2dia) [m/h]	$TAS_{z,r}$ (m/h) ; $td_{z,r} teóricox10^{-2}$ (h) ^b	p (--) ^c	$D_{médio}$ flocos ^d
FAD Convencional (sem lamelas)	200 [8,33]	25 ; 2,50	0,10	f_1
				f_2
			0,05	f_1
				f_2
	125 [5,21]	60 ; 1,10	0,10	f_1
				f_2
			0,05	f_1
				f_2
		60 ; 1,10	0,10	f_2

* variação na DTP foi obtida através da adoção de duas condições de mistura distintas ($G_{f1}50s^{-1}$ e $G_{f2}90s^{-1}$)

^a Taxa de Aplicação Superficial na zona de clarificação.

^b Taxa de Aplicação Superficial na zona de reação ; Tempo de detenção na zona de reação (cálculos com base na seção média e no volume útil da zona de reação).

^c razão de recirculação (volume/volume).

^d os valores do $D_{médio}$ dos flocos serão convenientemente apresentados na seção que trata dos resultados

+ excepcionalmente nestes casos não foi efetuada análise de DTP.

Tabela 5.3 - Erro amostral para 95% de intervalo de confiança para as duas condições de floculação investigadas. Tempo de floculação (T_f) mantido constante em 34 minutos. Circularidade 0,62⁺

Condição de floculação *	Tamanho da amostra	Erro (%)
$Gf_1(s^{-1})$	50	10295
$Gf_2(s^{-1})$	90	21256

* correspondentes a f_1 e f_2 , vide Tabela 5.2 em Condições Investigadas

+ definida de acordo com Allen (1997) como: $\text{perímetro partícula}^2/4.p.\text{área projetada partícula}$. Para estes cálculos foram analisados 11035 flocos a partir das imagens digitais adquiridas

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.4.1 Ensaios Estimulo-Resposta

Estes ensaios foram conduzidos na unidade piloto de FAD seguindo os mesmo procedimentos apresentados no Capítulo 4 desta tese (item 4.4.1). Utilizou-se de um volume definido (20ml) de solução concentrada com NaCl, na forma de injeção tipo pulso, para a realização dos ensaios de estímulo e resposta. O mesmo eletrodo submerso foi utilizado para a coleta de amostras. No entanto, foi adotado intervalo de registro de 30 segundos para que o número de pontos não excedesse a capacidade máxima de armazenamento de dados do equipamento utilizado (TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89).

Os dados foram tratados seguindo os procedimentos apresentados em Levenspiel (1999). Foram construídas as curvas normalizadas do traçador ($E?$) e o tempo adimensional (?) e os dados experimentais foram ajustados utilizando-se dos modelos de grande dispersão (DGI), de pequena dispersão (DPI) e tanques em série (N-CSTR).

As condições investigadas estão apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Condições investigadas para os ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD investigada.

$TAS_{z,c}$ (m/h) ^a	$TAS_{z,r}$ (m/h) ^b	$td_{z,r}$ teórico $\times 10^{-2}$ (h) ^b	P (-)
200	25	2,50	0
	60	1,10	0,10
	60	1,10	0,10
125	60	1,10	0,10

^a calculada com base na área útil da zona de clarificação "down-flow"

^b calculada com base no volume útil da zona de reação

A Figura 5.6 apresenta os resultados dos ensaios de estímulo e resposta para o conjunto de câmaras que compõe o sistema de floculação da unidade piloto de FAD investigada. Os resultados referem-se a média de três ensaios e a principal informação requerida foi o tempo de floculação real na unidade piloto. O tempo real obtido desses ensaios foi de 34 minutos. A Tabela contida na Figura 5.6-b mostra que o conjunto possuiu uma dispersão moderada tendendo a baixa dispersão pois o número de dispersão foi de 0,09 com grande extensão do escoamento tendendo ao pistonado pois o tempo de residência modal foi de 0,85 e o valor de s^2 foi de 0,19. A Figura 5.6-b mostra um bom ajuste da reta de regressão aos pontos experimentais no entanto, o modelo de pequena dispersão (Figura 5.6-c) mostrou-se mais adequado para descrever o comportamento do fluxo da unidade de floculação.

Figura 5.6 Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta nos tanques de floculação da piloto de FAD. a) curvas experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTR); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI); d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Resultado da média de 3 ensaios com G_f de $50s^{-1}$ e tempo de detenção experimental de 34 minutos. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.

A Figura 5.7 apresenta os resultados dos ensaios de estímulo e resposta para o tanque de flotação da unidade piloto de FAD investigada, contemplando a zona de reação e a zona de clarificação. Nesses ensaios a unidade foi operada com $TAS_{z,c}$ de 125m/dia, $td_{z,r}$ teórico de 40 segundos e razão de recirculação (p) de 0,10. Os resultados não indicaram a presença de zona morta pois o valor de θ foi sempre <1 (Figura 5.7-a). A Tabela contida na Figura 5.7-b mostra que o conjunto possuiu uma dispersão moderada tendendo a baixa dispersão pois o número de dispersão foi de 0,10 com grande extensão do escoamento tendendo ao pistonado pois o tempo de residência modal foi de 0,75 e o valor de s^2 foi de 0,21. A Figura 5.7-b, referente ao modelo de tanques em série, mostra um bom ajuste da reta de regressão aos pontos experimentais no entanto, o modelo de pequena dispersão (Figura 5.7-c) mostrou-se mais adequado para descrever o comportamento do fluxo da unidade de flotação como um todo (zona de reação + zona de clarificação).

Figura 5.7 Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD operando no modo convencional para TAS_{z.c} de 125m³/m²dia; p 0,10; t_{dteórico} na zona de reação de 40seg. a) curvas experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTR); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI); d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Tempo de detenção experimental de 14 minutos. Ensaio realizado com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.

A Figura 5.8 apresenta os resultados dos ensaios de estímulo e resposta para o tanque de flotação da unidade piloto de FAD investigada, operando com TAS_{z.c} de 200m³/dia, t_{d,z,r} teórico de 90 segundos e razão de recirculação (p) de 0,05. Da mesma forma que os resultados apresentados na Figura 5.7, os resultados apresentados na Figura 5.8 não indicaram a presença de zona morta pois o valor de θ foi sempre <1 (Figura 5.8-a). No entanto, a Tabela contida na Figura 5.8-b mostra um aumento da dispersão no tanque de FAD quando comparada com os resultados da Figura 5.7. O valor obtido foi de 0,16 tendendo a uma dispersão moderada. O escoamento apresentou maior tendência ao mistura completa, quando comparado aos demais ensaios, pois foi menor a extensão do escoamento tendendo ao pistonado (tempo de residência modal foi de 0,70) e o valor de s^2 foi de 0,33. A Figura 5.8-b, referente ao modelo de tanques em série, mostra um bom ajuste da

reta de regressão aos pontos experimentais e mostrou-se mais adequado para descrever o comportamento do fluxo da unidade de flotação como um todo.

Figura 5.8 Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD operando no modo convencional para TAS_{z.c} de 200m³/m²dia; p 0,05; t_d teórico na zona de reação de 90seg. a) curvas experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTR); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI) ; d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Tempo de detenção experimental de 11,8 minutos. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.

A Figura 5.9 apresenta os resultados dos ensaios de estímulo e resposta para o tanque de flotação da unidade piloto de FAD investigada, operando com TAS_{z.c} de 200m³/dia, t_{d,z.r} teórico de 90 segundos e razão de recirculação (p) de 0,10. Os resultados apresentados na Figura 5.9 não indicaram a presença de zona morta pois o valor de θ foi sempre <1 (Figura 5.9-a). No entanto, a Tabela contida na Figura 5.9-b mostra um aumento da dispersão no tanque de FAD quando comparada com os resultados da Figura 5.7 e 5.8. O valor obtido foi de 0,18 tendendo a uma dispersão moderada. O escoamento apresentou maior tendência ao mistura completa, quando comparado aos demais ensaios, pois foi menor a extensão do escoamento tendendo ao pistonado (tempo de residência modal foi de 0,65) e o valor de s^2 foi de 0,37. A Figura 5.9-b, referente ao modelo de tanques em série, mostra um bom ajuste da reta de regressão aos pontos experimentais e

mostrou-se mais adequado para descrever o comportamento do fluxo da unidade de flotação como um todo.

Figura 5.9 Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD operando no modo convencional para TAS_{z.c} de 200m³/m²dia; p 0,10; t_{dteórico} na zona de reação de 90seg. a) curvas experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTR); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI) ; d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Tempo de detenção experimental de 12,32 minutos. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.

A Figura 5.10 apresenta os resultados dos ensaios de estímulo e resposta para o tanque de flotação da unidade piloto de FAD investigada, operando com TAS_{z.c} de 200m³/dia, t_{d,z.r} teórico de 40 segundos e razão de recirculação (p) de 0,10. Assim como em todos os ensaios realizados com o tanque de FAD, verificou-se através dos resultados apresentados na Figura 5.10 que o escoamento não indicou a presença de zona morta pois o valor de θ foi sempre <1 (Figura 5.10-a). A Tabela contida na Figura 5.10-b mostra uma pequena diminuição da dispersão no tanque de FAD quando comparada com os resultados da Figura 5.8 e 5.9. O valor obtido foi de 0,16 tendendo a uma dispersão moderada. O escoamento apresentou maior tendência ao pistonado (tempo de residência modal foi de 0,70) quando comparado ao resultado da Figura 5.9 e o valor de s^2 foi de 0,32. Mais uma vez, o modelo de tanques em série, mostrou um bom ajuste da reta de regressão aos pontos experimentais e

mostrou-se mais adequado para descrever o comportamento do fluxo da unidade de flotação como um todo (Figura 5.10-b).

Comparando-se os resultados dos ensaios estímulo e resposta realizados no tanque de flotação da unidade piloto investigada, nota-se que o aumento da recirculação ocasionou aumento da dispersão do escoamento. Verificou-se também que, para as mesmas condições operacionais o incremento de p ocasionou em aumento do tempo de residência do tanque de FAD. Os resultados indicaram um bom funcionamento da unidade.

Figura 5.10 Curvas normalizadas referentes aos ensaios estímulo-resposta na unidade piloto de FAD operando no modo convencional para TASz.c de 200m³/m²dia; p 0,10; t_d teórico na zona de reação de 40seg. a) curvas experimentais e teóricas; b) ajuste para o modelo de tanques em série (N-CSTR); c) ajuste para modelo de pequena dispersão (DPI); d) ajuste para o modelo de grande dispersão (DGI). Tempo de detenção experimental de 11,73 minutos. Ensaios realizados com solução concentrada de NaCl de 300g/l aplicada no volume de 20ml no modo pulso. Equipamento utilizado: TI-89 Texas Instruments conjugado a CBL2 e software TI-Graph Link 89.

5.4.2 Ensaios de Tratabilidade e de Obtenção da Distribuição de Tamanho de Flocos (DTP)

Estes ensaios foram realizados utilizando-se a mesma água preparada por um período de três dias. Para a consecução dos ensaios em escala piloto alterou-se os parâmetros operacionais da FAD ($TAS_{z,c}$ e p) bem como o par de valores correspondentes a $TAS_{z,r}$ e $td_{z,r}$ na zona de reação.

Nesse ponto, é oportuno que se faça uma breve consideração a respeito da área adotada para a obtenção dos valores referentes às TAS para a zona de reação e zona de clarificação. De acordo com a definição, a TAS é a razão entre a vazão afluyente e a área em planta da unidade de flotação. Alguns autores consideram a área total do flotador (zona de reação somada a zona de clarificação) no cálculo da TAS, argumentando que a zona de reação contribui para a flotação dos sólidos na medida em que encaminha o fluxo para a parte superior do tanque. Outros, acreditam que somente a área da zona de clarificação deve ser considerada no cálculo da TAS “*downflow*”. Na presente tese, julgou-se conveniente determinar as TAS separadamente pela simples razão de que estas regiões do tanque de FAD foram analisadas separadamente. No Capítulo 4, as condições de mistura avaliadas em termos de TAS e td na zona de reação foi uma das condições investigadas visando verificar a variação da Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB). Neste capítulo, a TAS na zona de clarificação foi determinante para o cálculo do número teórico de micro-bolhas aderidas ao floco formado para que este se torne flotável (n), de acordo com a modelação matemática proposta por Reali (1991).

Uma outra questão importante, agora relacionada com os resultados experimentais na unidade piloto, esteve na adoção de condições operacionais que produzissem eficiências de remoção bastante diferentes. No início dos trabalhos desta tese ainda não se tinha uma idéia precisa a respeito do valor exato de $TAS_{z,c}$, p e $td_{z,r}$ que se deveria adotar para a consecução dos ensaios. Todavia, uma condição que parecia bastante óbvia é que era necessária a adoção de uma $TAS_{z,c}$ sensível às variações na zona de reação ($td_{z,r}$) e ao valor da razão de recirculação (p). A partir da análise de resultados preliminares percebeu-se que era necessário “forçar” a $TAS_{z,c}$ para ganhar sensibilidade frente às variações dos parâmetros de interesse. Assim, mais importante que a obtenção de valores residuais extremamente baixos, como é comum em unidades de FAD operando em condições adequadas, foi verificar as diferenças de desempenho da unidade quando os parâmetros de interesse foram variados. Desta forma, a $TAS_{z,c}$ de 200m/dia foi adotada, pois se sabe, através de ensaios preliminares e de resultados de pesquisas anteriores, que este valor é ligeiramente superior ao máximo empregado em unidades de FAD operando no modo convencional (~180m/dia) e que, por esta razão, a eficiência não seria alta para todas as condições investigadas na zona de reação. Adicionalmente, foram conduzidos ensaios com a $TAS_{z,c}$ de 125m/dia e os resultados comparados àqueles obtidos com a $TAS_{z,c}$ de 200m/dia.

Da mesma forma, é conveniente que se reafirme que a estratégia adotada para a escolha do tempo de floculação visou à obtenção de uma distribuição de tamanho de flocos mais estreita e de flocos com características morfológicas mais próximas a da forma esférica. Por esta razão, o tempo de floculação adotado para os ensaios em escala piloto não foi o melhor, sob o ponto de vista da eficiência de remoção de cor aparente e turbidez, obtido em escala de batelada.

Os resultados de cada conjunto de ensaios de tratabilidade foram agrupados em gráficos e comparados nas diferentes condições operacionais e diferentes valores de tempo de detenção na zona de reação (Figuras 5.11; 5.12 e 5.13).

Resultados dos ensaios de tratabilidade da FAD convencional

Figura 5.11 Resultados dos ensaios de tratabilidade com a instalação piloto de FAD operando no modo convencional na TAS_{z.c} de 200m³/m²dia para diferentes valores de recirculação (p) e tempos de detenção na zona de reação. a) valores absolutos e fração remanescente de cor aparente. b) valores absolutos e fração remanescente de turbidez. Fixos: Condições de mistura rápida 'in-line'; G_f 50s⁻¹ e T_f 34 min.; P_{sat} 470±20KPa; 2,25 mgAl³⁺/l, ? 22±1°C, D_{ap} registros de agulha 1/8". Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg CaCO₃ L⁻¹) 24; Dureza (mg CaCO₃ L⁻¹) 15; Condutividade (μS/cm) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78; Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060.

Figura 5.12 Resultados dos ensaios de tratabilidade com a instalação piloto de FAD operando no modo convencional na TASz.c de 200m³/m²dia para diferentes valores de recirculação (p) e tempos de detenção na zona de reação. a) valores absolutos e fração remanescente de cor aparente. b) valores absolutos e fração remanescente de turbidez. Fixos: Condições de mistura rápida 'in-line'; Gf 90s⁻¹ e Tf 34 min.; P_{sat} 470±20KPa; 2,25 mgAl⁺³/l, ? 22±1°C, D_{ap} registros de agulha 1/8". Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg CaCO₃ L⁻¹) 24; Dureza (mg CaCO₃ L⁻¹) 15; Condutividade (μS/cm) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78; Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060.

Figura 5.13 Resultados dos ensaios de tratabilidade com a instalação piloto de FAD operando no modo convencional na TASz.c de 125m³/m²dia para diferentes valores de recirculação (p) e tempos de detenção na zona de reação. a) valores absolutos e fração remanescente de cor aparente. b) valores absolutos e fração remanescente de turbidez. Fixos: Condições de mistura rápida 'in-line'; Gf 90s⁻¹ e Tf 34 min.; P_{sat} 470±20KPa; 2,25 mgAl⁺³/l, ? 22±1°C, D_{ap} registros de agulha 1/8". Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg CaCO₃ L⁻¹) 24; Dureza (mg CaCO₃ L⁻¹) 15; Condutividade (μS/cm) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78; Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060.

Conforme exposto no item 5.2.2, o modelo proposto por Reali (1991) preconiza que as condições na zona de reação das unidades de FAD são decisivas na eficiência do processo. Mantendo-se as mesmas características de flocos - tais como hidrofobicidade e estrutura - as mesmas características de superfície de microbolhas, e as mesmas condições operacionais da unidade ($TAS_{z,c}$ e p), tempos de detenção mais elevados ($t_{d,z,r}$) conduziram a maiores eficiências de remoção. Da mesma forma, mantendo-se fixos todos os parâmetros anteriormente citados e variando-se somente o valor da razão de recirculação (p) também obter-se-ia, até um determinado limite, maior eficiência de remoção. As figuras 5.11 e 5.12 indicam que existe uma concordância entre essas colocações e os resultados práticos obtidos na instalação piloto de FAD.

Os resultados apresentados na Figura 5.11 mostraram uma variação bastante clara na eficiência da FAD, expresso em valores absolutos e fração residual remanescente, quando o tempo de detenção na zona de reação e a razão de recirculação (p) foram alterados para uma mesma condição de floculação ($Gf 50s^{-1}$ e Tf de 34min). Verificou-se que os piores resultados foram obtidos para os menores tempos de detenção e razão de recirculação investigados ($t_{d,teórico,z,r}$ de 40seg. equivalente a $t_{d,medido}$ de 100seg. e p de 0,05). Mantendo-se fixo o valor de p (por exemplo p 0,05) verificou-se que a adoção de maior tempo de detenção ($t_{d,teórico,z,r}$ de 90 seg. equivalente a $t_{d,medido}$ de 225seg.) produziu menores valores residuais (maior eficiência) quando comparado ao $t_{d,teórico,z,r}$ de 40seg e p de 0,05. Similarmente, uma avaliação dos extremos entre o tempo de detenção na zona de reação ($t_{d,z,r}$) e a razão de recirculação (p) permite uma constatação clara de que estes parâmetros foram decisivos na eficiência da FAD. Para a Figura 5.14-a, observa-se um residual crescente na medida em que o $t_{d,z,r}$ e o valor de p foram diminuídos (de 5uC, correspondente à fração residual de aproximadamente 10% quando o $t_{d,teórico,z,r}$ e p foram de 90segundos e 0,10, respectivamente para 20uC, correspondente a fração residual de aproximadamente 40% quando o $t_{d,teórico,z,r}$ e p foram de 40segundos e 0,05, respectivamente).

Analogamente à Figura 5.11, a Figura 5.12, agora para floculação com Gf de $90s^{-1}$ para mesmo valor de Tf de 34 minutos, apresenta uma variação de eficiência bastante coerente com a condição assumida para β_{td} na modelação proposta por Reali (1991). Ou seja, menores valores de β_{td} conduziram a maiores eficiências de remoção mantendo-se fixas todas as demais condições. Analisando-se os extremos investigados verifica-se que a pior condição (maiores valores residuais) foi obtida para $t_{d,teórico,z,r}$ de 40 segundos e valor de p de 0,05 e que a melhor condição foi obtida para $t_{d,teórico,z,r}$ de 90 segundos e valor de p de 0,10. No entanto, verificou-se na Figura 5.12-a que a alteração das condições de floculação e, portanto das características da distribuição de tamanho de flocos, permitiram que o valor de $t_{d,teórico,z,r}$ de 40 segundos com p de 0,10 apresentasse resultados bastante próximos aos obtidos com $t_{d,teórico,z,r}$ de 90 segundos e p de 0,10. Certamente a distribuição de

tamanho de flocos obtida com esta variação de G_f foi decisiva na obtenção destes resultados.

Comparando-se os resultados apresentados nas Figuras 5.12 e 5.13, onde foi alterado somente o valor de $TAS_{z,c}$ para a condição na zona de reação de $td_{teórico,z,r}$ de 40 segundos e valor de p de 0,10, verifica-se que a turbidez residual foi ligeiramente menor para o valor de $TAS_{z,c}$ de 125/dia (Figura 5.13-b). Tal fato pode encontrar explicação analisando-se o número teórico de micro-bolhas necessárias para um determinado floco se torne flotável (n). De acordo com o modelo proposto por Reali (1991), o valor de n depende da $TAS_{z,c}$ e é menor na medida em que $TAS_{z,c}$ é menor. Para que o floco se torne flotável é necessário que o conjunto bolhas+floco atinja uma determinada velocidade no final da zona de reação da unidade de FAD de modo que a velocidade ascensional do conjunto vença as forças de arraste provocadas pelo fluxo descendente na zona de clarificação (cuja média pode ser expressa em termos de $TAS_{z,c}$). Assim, mantendo-se fixos todos os demais parâmetros inclusive os valores de $td_{z,r}$ e o número de micro-bolhas (expressos em termos de p , para uma mesma P_{sat}), pode-se supor que um menor valor de n (menor $TAS_{z,c}$) é mais facilmente atingido mantendo-se o mesmo valor de $td_{z,r}$.

Como consideração final dos resultados dos ensaios de tratabilidade, é importante reforçar que eficiências maiores poderiam ser obtidas mas, conforme colocado inicialmente, esta não foi a finalidade maior destes ensaios. Acredita-se que o longo tempo de floculação, adotado visando diminuir o efeito da grande heterodispersidade e aproximar o máximo possível a forma dos flocos à forma esférica, tenha sido um dos principais intervenientes na eficiência do processo. Quanto mais próximos a forma esférica estiverem os flocos, mais próximo a hipótese adotada no modelo de Reali (1991). No entanto, sabe-se através dos resultados obtidos por Gochin e Solari (1983) e comentados por Reali (1991) que as características dos flocos influenciam nos mecanismos de união. Devido a maior área interfacial e baixa densidade, flocos grandes e abertos, provavelmente, requerem apenas alguns pontos de hidrofobicidade para induzir a união das micro-bolhas necessárias, enquanto que flocos pequenos e compactos não apresentam esta característica (GOCHIN; SOLARI, 1983).

Quanto à adoção de parâmetros para projeto da zona de reação de unidades de FAD convencionais, os resultados experimentais demonstraram que existe uma forte relação entre o valor de $td_{z,r}$ e o valor de p no desempenho do processo, mantendo-se fixas as demais condições (P_{sat} , G_f e T_f , características da água etc). Verificou-se que maiores tempos de detenção podem requerer menores valores de p pois, o valor de $td_{teórico,z,r}$ de 90 segundos permitiu a adoção de valor de p de 0,05 produzindo melhor desempenho quando comparado ao valor de $td_{teórico,z,r}$ de 40 segundos e p de 0,05. Isso pode implicar em considerável economia de energia haja vista que a produção de micro-bolhas é decisiva nos custos operacionais de unidade

de FAD. No entanto, caso se deseje um tempo de detenção menor na zona de reação maiores valores de razão de recirculação (p) devem ser fornecidos para manter o desempenho desejado. Caso contrário o desempenho da unidade de FAD será prejudicado com menor valor de $td_{z.r.}$. Baseado nesta assertiva pode-se supor que o projeto de unidades de FAD convencionais devem contemplar um tempo de detenção maior ou igual a 90 segundos para o caso da água investigada, visando diminuição dos custos operacionais. Os resultados contrapõem as recomendações feitas por Lundh, Jönsson e Dahlquist (2002) que recomendam valores de tempo de detenção maiores que 33 segundos no entanto, deve-se levar em conta que os referidos autores analisaram o comportamento da zona de reação estritamente sob o ponto de vista da estrutura do escoamento, desconsiderando aspectos relativos ao desempenho da unidade investigada.

A Figura 5.14 apresenta o resultado da determinação de tamanho de partículas com o afluente (água preparada) utilizando contador de partículas marca Hiac/Royco modelo 8000-A conjugado a amostrador de mesma marca modelo 3000-A e sensor líquido Micro-count-05. As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam os resultados da distribuição de tamanho de flocos (DTP) obtida através do método não-intrusivo que emprega análise de imagem desenvolvido e descrito detalhadamente no Capítulo 2 desta tese.

Figura 5.14 Resultados dos ensaios de obtenção de distribuição de tamanho de flocos (DTP) expressos em termos de frequência relativa em número e volume para o afluente.

Resultados dos ensaios de DTP obtidos através do contador de partículas marcam Hiac/Royco modelo 8000A conjugado a amostrador de mesma marca modelo 3000A e sensor líquido Micro-count-05. Características da água sintética analisada: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) 24; Dureza (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) 15; Condutividade ($\mu\text{S/cm}$) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78; Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060.

É importante que se enfatize que somente o afluyente foi analisado em termos de distribuição de tamanho de partículas utilizando-se um contador. Tal fato se deve ao método de amostragem utilizado por este equipamento. A necessidade de coleta de volume diminuto de amostra e a posterior sucção deste volume pelo amostrador do equipamento interfere sobremaneira na característica das partículas floculentas e, por esta razão, o equipamento não foi utilizado para as análises dos flocos formados na etapa de floculação.

Sabe-se também que resultados utilizando diferentes métodos de determinação de partículas não podem ser comparados indiscriminadamente pois, segundo Santos et al. (2004):

Cada técnica de determinação da distribuição de tamanho de partículas relaciona uma das propriedades destas a um valor de diâmetro (esfera equivalente). Como cada técnica fornece resultados distintos, embora corretos, comparações entre elas não devem ser realizadas indiscriminadamente (Santos et al., 2004).

No entanto, a análise da distribuição de partículas do afluyente foi necessária para verificar qual a faixa onde as partículas predominantemente se encontram tanto em termos de número quanto em termos de volume. Isto só foi possível pois o equipamento utilizado é um contador e não um granulômetro.

Como era de se esperar em águas contendo mais cor que turbidez, a maior parte das partículas primárias (97%) concentram-se em tamanhos menores que $10\mu\text{m}$ e 55% do volume está situado entre 0 e $25\mu\text{m}$ correspondendo a mais de 99% do número de partículas.

a)

b)

Figura 5.15 Resultados dos ensaios de obtenção de distribuição de tamanho de flocos (DTP) expressos em termos de: a) frequência relativa e acumulada em relação ao número de flocos para 21256 flocos analisados. b) frequência relativa em número e volume.

Resultados dos ensaios de DTP obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na última câmara de floculação da unidade piloto de FAD. Fixos: Condições de mistura rápida 'in-line'; Gf 90s⁻¹ e Tf 34 min.; 2,25 mgAl³⁺/l, ? 22±1°C. Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg CaCO₃ L⁻¹) 24; Dureza (mg CaCO₃ L⁻¹) 15; Condutividade (µS/cm) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78; Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060.

a)

b)

Figura 5.16 Resultados dos ensaios de obtenção de distribuição de tamanho de flocos (DTP) expressos em termos de: a) frequência relativa e acumulada em relação ao número de flocos para 10295 flocos analisados. b) frequência relativa em número e volume.

Resultados dos ensaios de DTP obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na última câmara de floculação da unidade piloto de FAD. Fixos: Condições de mistura rápida 'in-line'; Gf 50s⁻¹ e Tf 34 min.; 2,25 mgAl³⁺/l, ? 22±1°C. Características da água sintética: pH 6,50; Turbidez (uT) 5; Cor Aparente (uC) 52; Cor Verdadeira (uC) 10; Alcalinidade (mg CaCO₃ L⁻¹) 24; Dureza (mg CaCO₃ L⁻¹) 15; Condutividade (µS/cm) 28; Sólidos Totais (ST) (mg/L) 150; Sólidos Fixos (SF) (mg/L) 72; Sólidos Voláteis (SV) (mg/L) 78; Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L) 2,22; Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L) 0,96; Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L) 1,26; Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L) 147,78; Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L) 71,04; Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L) 76,74; Absorbância a 254nm 0,060.

Conforme comentado, a adoção de duas condições distintas de floculação visou à obtenção de distribuições de tamanhos de flocos (DTP) diferentes. Assim, o comportamento da FAD pôde ser avaliado combinando os demais parâmetros com duas condições de sólidos presentes.

A análise dos resultados apresentados nas Figuras 5.15-a e 5.16-a permite verificar que houve um deslocamento da distribuição relativa, em número de

partículas, para as faixas de maior tamanho (até $800\mu\text{m}$) quando o gradiente foi alterado de 90s^{-1} para 50s^{-1} . As faixas compreendidas entre 80 e $110\mu\text{m}$ e entre 360 e $800\mu\text{m}$ sofreram a maior interferência (de 4% para 11% e de 40% para 51%, em número, respectivamente) quando o gradiente médio de velocidade de floculação foi alterado de 90s^{-1} para 50s^{-1} . No entanto, verifica-se através da análise da curva de distribuição acumulada que cerca de 85% dos flocos presentes foram menores que $800\mu\text{m}$ para os dois valores de gradientes médios de velocidade investigados para a floculação. As Figuras 5.15-b e 5.16-b permitem avaliar a relação entre a frequência relativa em número e em volume para as duas situações investigadas.

Neste momento, é conveniente que se faça duas considerações críticas a respeito dos ensaios realizados para determinação da distribuição de flocos. A primeira é que a faixa compreendida entre 360 e $800\mu\text{m}$ foi demasiadamente longa para que as mudanças decorrentes da variação do gradiente fossem percebidas mais sensivelmente. A segunda, foi consequência da estratégia adotada para aquisição dos flocos, descrita no item 5.3.2, e que teve como intensão minimizar o erro de amostragem (através do estreitamento da curva de distribuição) e de aproximar a forma dos flocos à forma esférica. Por consequência, o longo tempo de floculação adotado somado as características dos flocos, provavelmente frágeis ao cisalhamento, podem ter contribuído para a homogeneização da distribuição de tamanho nas duas condições de floculação investigadas.

A Figura 5.18 apresenta os dados referentes à análise estatística dos dados de distribuição de tamanho de flocos (o erro amostral foi apresentado na Tabela 5.3). Antes, no entanto, é importante que se faça uma breve consideração a respeito da leitura de tais gráficos. O gráfico denominado Box-Plot (Figura 5.18-b) foi apresentado de acordo com sua definição (Figura 5.17).

Figura 5.17 Apresentação dos dados no gráfico Box-Plot.

O Box Plot é um gráfico muito útil para a descrição dos dados, visualização da variabilidade e comparação entre diferentes grupos. Interpretando o Box Plot:

1- a caixa central inclui os 50% dos dados centrais

2- a simetria é indicada quando:

a distância de Q1 à mediana for igual à distância da mediana até Q3.

a distância do valor mínimo até Q1 for igual à distância do valor máximo até Q3.

a mediana for igual à média.

Este gráfico revela grande parte da estrutura dos dados e dele podemos extrair as seguintes características: dispersão, assimetria, comprimento das caudas e observar valores discrepantes.

Um dos critérios que se pode utilizar para minimizar possíveis problemas na análise é retirar os pontos extremos (máx. e mín.) ou pontos discrepantes (outliers), que podem influenciar no resultado. Entretanto, antes de fazer estes cortes, deve-se analisar e avaliar as possíveis causas de tais ocorrências, visto que podem ser decorrentes de valores inerentes ao processo.

Figura 5.18 Diâmetro médio dos flocos analisados. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos. Análise estatística efetuada com os 31551 flocos analisados.

Resultados dos ensaios de DTP obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na última câmara de floculação frente às variações do gradiente médio de velocidade de floculação. Fixos: Al^{+3} 2,25mg/l e Tf de 34 minutos.

Nos gráficos apresentados na Figura 5.18 observa-se a clara diferenciação entre os valores médios (com os respectivos intervalos para 95% de confiança) obtidos nos dois valores de gradientes médios investigados ($Gf50s^{-1}$ e $Gf90s^{-1}$) apesar das médias apresentarem valores bem próximos (Figura 5.18-a). A Figura 5.18-b mostra valores muito próximos aos valores médios, razão pela qual ficou difícil visualizar a caixa contendo 50% dos dados centrais. Nota-se, no entanto, que os dados correspondentes aos ensaios com o $Gf50s^{-1}$ possuiu valores extremos mais acentuados em relação aos observados com o $Gf90s^{-1}$.

5.4.3 Análise da Sensibilidade do Modelo Matemático Proposto por Reali (1991) Frente às Variações dos Parâmetros na Instalação Piloto

Conforme apresentado no item 5.2.2 dessa tese, o modelo matemático proposto por Reali (1991) foi desenvolvido para a zona de reação de unidades convencionais de FAD e relaciona parâmetros fundamentais do processo tais como: tamanho médio dos flocos e micro-bolhas, razão de recirculação (p), taxa de aplicação na zona de clarificação ($TAS_{z.c}$) e tempo de detenção na zona de reação ($td_{z.r}$). A condição de choque entre bolhas e flocos foi definida através da análise do fluxo no cilindro de colisão e depende dos tamanhos das partículas (bolhas e flocos) e do gradiente de velocidade no interior da zona de reação. Com base na $TAS_{z.c}$ foi determinado o valor de n que é definido como o número de micro-bolhas que devem ser aderidas ao floco no final da zona de reação para que este se torne flutuável. Por fim, calculou-se o parâmetro β_{td} que depende dos parâmetros acima citados e cujo resultado está relacionado à eficiência do processo de FAD. A dedução completa da modelação pode ser encontrada no referido trabalho. A Figura 5.19 apresenta a planilha eletrônica utilizada para os cálculos dos parâmetros do modelo frente às variações operacionais na instalação piloto de FAD.

Portanto, neste item da tese será apresentada uma análise da sensibilidade do modelo matemático proposto por Reali (1991) frente às variações dos parâmetros operacionais da FAD ($TAS_{z.c}$, p , $td_{z.r}$, DTP e DTMB). Os resultados de Distribuição de Tamanhos de Partículas e de Micro-bolhas (DTP e DTMB, respectivamente) foram analisados, no modelo matemático proposto por Reali (1991), com base nos valores dos diâmetros médios obtidos nos ensaios para as diferentes situações investigadas. Para a verificação da influência do tempo de detenção na zona de reação ($td_{z.r}$) foram adotados dois valores extremos ($td_{teórico,z.r}$ de 40 e 90 segundos, correspondentes $td_{medido,z.r}$ de 100 e 225 segundos, obtidos através dos ensaios de estímulo e resposta). A adoção destes valores foi norteadada por trabalhos tais como Lundh (2001) e Haarhoff e van Vuuren (1995), no entanto os valores foram também limitados às demais variáveis investigadas tais como: T_f e $TAS_{z.c}$.

Parâmetros para cálculo do choque entre bolhas e flocos (fluxo cilindro colisão)			
	1,007E-06	?(μ m)	354,7886695
dF (m)	7,50E-04	(dF+dB)/2	400
densidade floco	1,014		
dB (m)	5,00E-05	a1	2,09E-10
Gm (s-1)	8	a2	1,02E-09
f	9789	a3	5,82E-10
e	6,445E-05		
?	0,998	a1/a3	3,59E-01
TAS (m/s)	0,002315424	a2/a3	1,75E+00
Cálculo de TAS de acordo com o valor de n			
n	80,15		
TAS	0,002322088	8,359515822	200,6283797
?	0,0012		
Cálculo de βT_d do modelo de Reali(1991)			
F	0,00213		
βT_d	4,76E-01		71,33995641
Td real			9,93E-01
β	1		-0,006677979
Td modelo	0,476406741		
a	1,59905E-09		
p	0,1		
Sv	0,076		

Figura 5.19 Planilha eletrônica utilizada para os cálculos dos parâmetros do modelo frente as variações operacionais na instalação piloto de FAD Diâmetro médio dos flocos analisados. a) desvio padrão b) incluindo toda a distribuição encontrada separada por faixas de 25% e valores extremos. Análise estatística efetuada com os 31551 flocos analisados.

Resultados dos ensaios de DTP obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na última câmara de floculação frente às variações do gradiente médio de velocidade de floculação. Fixos: Al^{+3} 2,25mg/l e T_f de 34 minutos.

A Tabela 5.5 apresenta as principais hipóteses simplificadoras adotadas no modelo proposto por Reali (1991).

Tabela 5.5 – Principais hipóteses simplificadoras assumidas na modelação matemática para a zona de reação de unidades de flotação por ar dissolvido (FAD) operando no modo convencional proposta por Reali (1991).

Hipótese	Consequências
A colisão entre bolhas e flocos são induzidas pelo campo turbulento e pela velocidade relativa dentro do cilindro limitado pela soma dos diâmetros envolvidos	Não são considerados os efeitos hidrodinâmicos nas proximidades das partículas
A concentração volumétrica de bolhas e de flocos por unidade de volume é constante	Não são considerados a variação da concentração dos flocos
A forma das bolhas e flocos foi considerada perfeitamente esférica	O consumo de bolhas é consequência somente da aderência destas aos flocos
Não existe aglutinação entre as bolhas	O parâmetro β (efeitos eletroestáticos, hidrofobicidade, etc) foi introduzido no modelo
Os efeitos eletroestáticos foram considerados apenas indiretamente	Não são considerados os efeitos de choque secundários que ocorrem na parte superior da zona de clarificação
O número n deve ser atingido até o final da zona de reação para que o floco se torne flotável	

Para viabilizar a análise da sensibilidade do modelo matemático frente às variações na instalação piloto de FAD foi necessário: i) o desenvolvimento dos métodos descritos no Capítulo 2; ii) a validação do uso equipamento microADV para a FAD descrita no Capítulo 3 iii) e a avaliação da Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB), apresentados no Capítulo 4 desta tese. Além disso, foi necessário o cumprimento de alguns requisitos durante a operação da unidade piloto, tais como:

- 1- Os ensaios foram realizados com a mesma água armazenada por curto período de tempo;
- 2- Os flocos foram gerados de modo a possuir maior esfericidade possível (longo tempo de floculação);
- 3- As condições de coagulação bem como a vazão afluenta foram mantidas constantes para conservar as características da mistura rápida “in-line”;
- 4- Os valores de rotação dos agitadores, responsáveis pelo fornecimento de energia à massa líquida (Gf), foram recalculados e conferidos a cada ensaio;
- 5- Foram mantidas a mesma pressão de saturação (P_{sat} 450±20KPa) e os mesmos dispositivos de despressurização (registros de agulha de 1/8”) utilizados no momento da determinação da Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB), apresentados no Capítulo 4 desta tese;
- 6- A determinação da distribuição de tamanho de flocos (DTP) foi obtida no interior da última câmara de floculação para que a amostra não sofresse deformação decorrente das mudanças de condições de escoamento;
- 7- A determinação do gradiente de mistura no interior da zona de reação levou em conta a distribuição das micro-bolhas existentes.

Os requisitos 1, 2, 3 e 5 não foram difíceis de serem atingidos mas existiram restrições. O sistema que compõe a unidade piloto de FAD é dependente dos equipamentos, tubulações e dos volumes das unidades de floculação e flotação. Assim, a variação de um parâmetro acarreta a alteração dos demais. Isso implicou em um rigoroso estudo preliminar visando verificar as possibilidades de alteração das variáveis de interesse e acabou por limitar a variação de alguns parâmetros.

O requisito 4 é uma questão estrutural. Se o tanque de floculação dispusesse de sistema mais acurado para registro das rotações dos agitadores, os ensaios poderiam abranger uma faixa mais estreita de gradiente médio de velocidade de floculação (Gf). Todavia, mesmo com tal recurso, a precisão na determinação do valor do Gf em unidades de experimentação em escala piloto é restrita aos cálculos disponíveis. Verificaram-se valores de Gf máximos e mínimos bastante diferentes para uma mesma rotação fornecida. Por exemplo, para a rotação de 30rpm os valores máximos e mínimos de Gf obtidos, para as condições geométricas dos tanques e das pás dos agitadores da instalação piloto de FAD, variaram entre 80 e

90s⁻¹. Assim, o estudo da distribuição de tamanho de flocos (DTP) para uma faixa estreita de Gf não teria nenhum sentido prático. Nesse trabalho, investigaram-se dois valores de gradientes médios de velocidade em condições extremas (Gf de 50 e 90 s⁻¹) para que os resultados não sofressem interferência da imprecisão na determinação do Gf. Para estudos mais rigorosos a respeito da alteração da DTP frente às condições de floculação, unidades em escala de laboratório com rigoroso controle de gradiente e temperatura são aconselháveis. Contudo, não se pode minimizar a grande contribuição que ensaios em grande escala trazem na compreensão do processo tal como ele ocorre em unidades plenas.

O requisito 6 foi condição necessária para a aquisição de amostra indeformada e o método utilizado para aquisição, tratamento e obtenção de tamanho encontra-se detalhadamente descrito no Capítulo 2 desta tese.

O requisito 7 dependeu dos resultados de Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB), obtidos no Capítulo 4 e das condições de escoamento no interior da zona de reação. Por se tratar de assunto relativamente extenso estes resultados se encontram apresentados no item 5.4.3.1, a seguir.

5.4.3.1 Estimativa do gradiente médio de velocidade na zona de reação

O gradiente médio de velocidade no interior da zona de reação da unidade piloto depende das características da distribuição de tamanho de micro-bolhas e do escoamento, influenciado pelas características geométricas e pelas vazões envolvidas.

Reali (1991) apresenta uma estimativa da energia dissipada por unidade de massa (ϵ) pelas micro-bolhas de gás no interior da zona de reação de unidades de FAD. Através do cálculo da potência dissipada por uma bolha de gás (P_{1B}), o autor chega na expressão final, válida para micro-bolhas com diâmetro inferior a 140 μ m e sistema com distribuição uniforme de tamanho.

$$G = [g^2 d_b^2 S_v p / 18 \nu (1+p)] \quad (14)$$

onde:

G = gradiente médio de velocidade imposto pelas micro-bolhas (s⁻¹)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

S_v = concentração volumétrica de micro-bolhas (m³ ar/m³ água)

p = razão de recirculação (-)

ν = viscosidade cinemática da água (m²/s)

Utilizando-se da equação 14 foi construído o gráfico apresentado na Figura 5.20 para temperatura (θ) de 25°C, $Re_y < 2$ e diferentes valores de razão de recirculação (p de 0,05, 0,10 e 0,20) para as faixas de diâmetros uniforme de micro-bolhas de 5 a 120 μm , baseando-se nas faixas obtidas nos ensaios apresentados no Capítulo 4 desta tese.

Figura 5.20 Valores de gradiente médio de velocidade devido às micro-bolhas de ar para diferentes valores de razão de recirculação (p). Cálculos efetuados de acordo com equação (14) apresentada nesta tese e proposta por Reali (1991) para diâmetro de micro-bolha de até 140 μm . Adotados diâmetros de micro-bolhas uniformes (5-120 μm) nas diferentes faixas obtidas nos ensaios apresentados no Capítulo 4 desta tese.

Analisando os resultados obtidos através da equação 14 proposta por Reali (1991), considerando distribuição uniforme de micro-bolhas (Figura 5.20), nota-se uma ampla faixa de variação de gradiente médio de velocidade (G_m) para as diferentes faixas de diâmetros de micro-bolhas. Os valores de G_m variaram de 1 a 35 s^{-1} para as diferentes faixas de diâmetros de micro-bolhas e recirculações calculadas. Para o diâmetro médio ($D_{\text{médio}}$ 25 μm), obtido nos ensaios e analisados estatisticamente no Capítulo 4, o G_m devido somente a ação das micro-bolhas variou de 3,5 a 7,5 s^{-1} , quando o valor de p variou de 0,05 a 0,20. Já, para o diâmetro de Sauter (D_{Sauter} 50 μm), também obtido nos ensaios e analisados estatisticamente no Capítulo 4, o G_m devido somente a ação das micro-bolhas variou de 8 a 14,5 s^{-1} , quando o valor de p variou de 0,05 a 0,20.

Considerando-se a zona de reação como um canal retangular de seção plena, a energia máxima dissipada por unidade de massa considerando-se somente a água (sem considerar as micro-bolhas) é de $9,7 \times 10^{-6} \text{ J/sKg}$, calculada com base na seção transversal média e desprezando as perdas decorrentes do atrito. Assim, o gradiente médio de velocidade com o sistema operando somente com água é de, no máximo, 3 s^{-1} .

Assim, conclui-se que ação das micro-bolhas é parâmetro decisivo na dispersão de energia no interior da zona de reação.

No entanto, a aproximação feita ao se considerar a distribuição uniforme de micro-bolhas pode acarretar em imprecisão no cálculo dos valores dos gradientes médios no interior da zona de reação (G_m). Assim, julgou-se conveniente efetuar os cálculos da energia dissipada por unidade de massa (ϵ) relacionando os valores de distribuição de tamanho de micro-bolhas (DTMB) obtidos experimentalmente no Capítulo 4 desta tese. Para tal, foram consideradas as situações de variação de recirculação (p) e de taxa de aplicação superficial na zona de reação ($TAS_{z,r}$) versus tempo de detenção na zona de reação ($td_{z,r}$), reapresentados na Figura 5.21.

O valor de ϵ obtido para cada faixa de tamanho foi somado e, ao valor resultante, somou-se a energia dissipada devido somente a água. Os gráficos apresentados na Figura 5.22 apresentam os resultados obtidos para as condições investigadas experimentalmente.

Figura 5.21 Frequência relativa em volume. Resultados dos ensaios de DTMB obtidos através método não intrusivo que emprega análise de imagem na USMB frente a variações de: a) das condições de mistura (expressas em termos de $TAS_{zona\ reação}$ e td); b) da razão de recirculação (p). Fixos: $TAS_{zona\ reação}$ e td , P_{sat} 450±10KPa, T 22±1°C, D_{ap} registros de agulha 1/8", pH, ? não medida porém mantida inalterada.

Figura 5.22 Valores de gradientes médios de velocidade na zona de reação considerando-se a Distribuição de Tamanho de Micro-bolhas (DTMB) e o efeito da água sem micro-bolhas, de acordo com: a) as condições de mistura (expressas em termos de $TAS_{\text{zona reação}}$ e td); b) da razão de recirculação (p). Fixos: $TAS_{\text{zona reação}}$ e td , $P_{\text{sat}} 450 \pm 10 \text{ KPa}$, $T 22 \pm 1^\circ \text{C}$, D_{dp} registros de agulha 1/8", pH.

Nota-se, pela Figura 5.22, que os valores de G_m calculados considerando-se as faixas de tamanho obtidas nos ensaios, somadas ao efeito da água, variaram entre 5 e 9 s^{-1} . Em geral, estes valores foram menores que àqueles obtidos nos cálculos quando foi considerado a distribuição uniforme de tamanho (Figura 5.19) quando o D_{Sauter} ($\sim 50 \mu\text{m}$) foi considerado nos cálculos, mesmo levando-se em conta que foram somados os efeitos da dissipação de energia decorrente somente da água.

A média do valor do gradiente médio de velocidade ($G_m \sim 8 \text{ s}^{-1}$), obtida através dos cálculos efetuados por faixa de tamanho e apresentados na Figura 5.22, foi utilizada nas etapas subseqüentes desta tese (item 5.4.3.2 e 5.4.3.3) para determinação das condições de choque (fluxo através do cilindro de colisão) representados, de acordo com o modelo proposto por Reali (1991), pelos parâmetros a_1 , a_2 e a_3 (onde: a_1 e a_2 são os choques devido a turbulência para as regiões viscosas e inerciais, respectivamente e a_3 é devido a velocidade relativa entre micro-bolhas e flocos) e para o cálculo do parâmetro β_{td} .

5.4.3.2 Análise do efeito da turbulência e da velocidade ascensional das bolhas na colisão entre bolhas e flocos com base nos resultados obtidos experimentalmente.

Tomando por base o modelo matemático proposto por Reali (1991), a seguir serão apresentadas as relações entre os efeitos da turbulência e os efeitos da velocidade relativa na colisão entre micro-bolhas e flocos frente as variação dos parâmetros obtidos experimentalmente.

A Figura 5.23 mostra as relações entre os efeitos da turbulência e os efeitos da velocidade relativa quando foram variados os diâmetros das micro-bolhas e dos flocos, obtidos experimentalmente através do método descrito no Capítulo 2 desta tese.

Figura 5.23 Relação entre os efeitos da turbulência (a_1 e a_2) e os efeitos da velocidade relativa (a_3) na colisão entre micro-bolhas e flocos frente as variação do diâmetro das micro-bolhas. Cálculos efetuados com base no modelo de choques proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente. Fixos: gradiente médio de velocidade na zona de reação $Gm8s^{-1}$; taxa de aplicação superficial na zona de clarificação $TAS_{z.c}$ 200m/dia; diâmetros médios dos flocos DF de 274 e 306μm.

Conforme comentado por Reali (1991), a análise conjunta dos modelos de colisão (devido ao campo turbulento e devido à velocidade relativa das bolhas) tem como finalidade fornecer uma visão geral da magnitude da frequência de colisão entre bolhas e flocos e da inter-relação entre os parâmetros envolvidos.

Para todas as condições apresentadas na Figura 5.23 o choque devido aos efeitos da turbulência ocorreram na sub-região viscosa, ou seja, para valores da micro-escala de Kolmogoroff (?) maiores que a média dos diâmetros de bolha e floco $(D_F + D_B/2)$.

Nota-se, no gráfico apresentado na Figura 5.23, a clara predominância dos efeitos da velocidade relativa das bolhas (a_3) em relação aos efeitos da turbulência (a_1 , sub-região viscosa) no choque entre as micro-bolhas e flocos, mantendo-se fixos o Gm e a $TAS_{z.c}$. O valor de a_3 foi de 5 a 8 vezes maior que o valor de a_1 , significando que o efeito da turbulência foi significativamente menor que o efeito da velocidade relativa na taxa de colisão entre bolhas e flocos, para as faixas de tamanho de bolhas e flocos obtidos experimentalmente, no valor de Gm de $8s^{-1}$ e para o valor de $TAS_{z.c}$ de 200m/dia, utilizada durante os ensaios de clarificação na

instalação piloto. Para os menores tamanhos de flocos e bolhas, o efeito da velocidade relativa sobre o efeito da turbulência é mais acentuado. Em uma análise preliminar isso parece contraditório pois, é intuitivo que as velocidades relativas são mais acentuadas para maiores valores de bolhas e flocos. No entanto, enquanto os efeitos da taxa de colisão devido à velocidade relativa são influenciados pelo quadrado da soma dos diâmetros das bolhas e flocos, os efeitos da taxa de colisão devido ao campo turbulento variam ao cubo. Assim, os efeitos da taxa de colisão devido ao campo turbulento aumentam na medida em que os valores da média dos diâmetros de bolha e floco ($D_F + D_B/2$) se aproximam do valor da micro-escala de Kolmogoroff (?).

É claro que estes resultados foram fortemente dependentes do grau de mistura no interior da zona de reação da unidade piloto (calculada no item anterior, 5.4.3.1). Para visualizar quais seriam os efeitos do G_m na taxa de colisão entre bolhas e flocos, foi construído o gráfico apresentado na Figura 5.24. Esta figura apresenta o efeito da variação do gradiente médio de velocidade (G_m) na razão entre os efeitos de turbulência e o efeito da velocidade relativa ($a_{1,2}/a_3$) mantendo-se fixos os valores dos diâmetros médios de bolhas e flocos (D_B e D_F), a $TAS_{z,c}$ e o valor de p . Verifica-se que a colisão devido ao campo turbulento passa a ser predominante somente para valores mais altos de G_m , mantendo-se fixas as demais condições. Para valores de G_m acima de $31s^{-1}$, existe uma acentuada descontinuidade no gráfico marcada pela mudança entre a sub-região viscosa e a sub-região inercial. Neste ponto, o efeito da turbulência passa a ser fortemente predominante ao efeito da velocidade relativa na taxa de colisões entre bolhas e flocos pois, a partir desse valor de G_m , a micro-escala de Kolmogoroff (?) passa a ser menor que o valor da média dos diâmetros de bolha e floco ($D_F + D_B/2$), indicando uma diferença no mecanismo de transporte das partículas (bolhas e flocos).

Figura 5.24 Relação entre os efeitos da turbulência (a_1 e a_2) e os efeitos da velocidade relativa (a_3) na colisão entre micro-bolhas e flocos frente as variações do gradiente médio de velocidade (g_m). Cálculos efetuados com base no modelo de choques proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente. Fixos: diâmetro médio de floco (DF) de 306 μ m; diâmetro médio das micro-bolhas (DB) de 50 μ m; taxa de aplicação superficial na zona de clarificação $TAS_{z,c}$ 200m/dia.

A Figura 5.25 mostra os efeitos da variação de tamanho de floco na razão entre os efeitos de turbulência e o efeito da velocidade relativa ($a_{1,2}/a_3$) mantendo-se fixos o diâmetro médio de bolhas (D_B), a $TAS_{z.c}$ e os valores de p e G_m . A faixa investigada de tamanho de floco baseou-se nos resultados obtidos experimentalmente (apresentados no item 5.4.2), cujo método encontra-se descrito no Capítulo 2 desta tese.

Figura 5.25 Relação entre os efeitos da turbulência (a_1 e a_2) e os efeitos da velocidade relativa (a_3) na colisão entre micro-bolhas e flocos frente as variação do diâmetro dos flocos (D_F). Cálculos efetuados com base no modelo de choques proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente. Fixos: $G_m 8s^{-1}$; diâmetro médio das micro-bolhas (D_B) de $50\mu m$; taxa de aplicação superficial na zona de clarificação $TAS_{z.c} 200m/dia$.

A Figura 5.25 apresenta o efeito da variação do diâmetro dos flocos na razão entre os efeitos de turbulência e o efeito da velocidade relativa ($a_{1,2}/a_3$) mantendo-se fixos os valor do diâmetro médio de bolha (D_B), a $TAS_{z.c}$ e os valores de p e G_m . Assim como no gráfico apresentado na Figura 5.24, verifica-se na Figura 5.25 uma acentuada descontinuidade da curva, marcada pela transição entre a sub-região viscosa e a sub-região inercial, quando os flocos foram maiores que $650\mu m$. Neste ponto, o efeito da turbulência passa a ser fortemente predominante ao efeito da velocidade relativa na taxa de colisões entre bolhas e flocos pois, a partir desse valor de D_F , a micro-escala de Kolmogoroff (?) passa a ser menor que o valor da média dos diâmetros de bolha e floco ($D_F + D_B/2$).

5.4.3.3 Número e área de micro-bolhas e flocos: relação de N_{bo}/N_{fo} no tempo $t=0$ e da área de superfície do floco com o valor de n calculado.

Conforme definido por Reali (1991), a velocidade ascensional do conjunto (bolhas+floco), dada por V_{BF} , que se deseja obter no reator de FAD está diretamente relacionada à taxa de aplicação superficial na zona de clarificação ($TAS_{z.c}$). Assim, a condição para que os flocos sejam removidos é que o valor de V_{BF} seja maior que o valor de $TAS_{z.c}$ ($V_{BF} = TAS_{z.c}$). Para que um determinado floco atinja V_{BF} é necessário que a ele esteja aderido um número mínimo de micro-bolhas (n).

No entanto, para um mesmo valor de $TAS_{z.c}$, ou seja mesmo valor de V_{BF} , o valor de n varia de acordo com o tamanho das micro-bolhas e dos flocos. Além disso,

alterando-se os diâmetros de bolhas (D_B) e flocos (D_F) e o valor da razão de recirculação (p), alteram-se também o número de bolhas e flocos disponíveis no tempo $t=0$ (N_{bo} e N_{fo}). Para que o modelo proposto por Reali (1991) opere de acordo com as condições impostas, o valor de n deve ser sempre menor que a razão dada pelo número de bolhas e flocos disponíveis no tempo $t=0$ ($n < N_{bo}/N_{fo}$).

A Figura 5.26 apresenta a análise das condições acima expostas baseando-se nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto de FAD. No gráfico desta figura, mostram-se as relações entre os valores de N_{bo} , N_{fo} e n para diferentes valores de D_F , de D_b e de p , mantendo-se fixo o valor de $TAS_{z,c}$, a concentração volumétrica de flocos e de bolhas.

Verifica-se que, para nenhuma das situações investigadas, o valor correspondente a razão entre N_{bo}/N_{fo} e n foi menor que a unidade. Assim, para todas as condições, havia mais bolhas disponíveis por floco no tempo $t=0$ do que o valor necessário para que aqueles flocos se tornassem flotáveis, indicando que sempre houve um excesso no número de micro-bolhas em relação ao número de flocos, satisfazendo a condição imposta pelo modelo.

Entretanto, é interessante que se observe que esta razão chega próxima da unidade para menores valores de D_F e tendem a um valor máximo para D_F maiores que $1500\mu m$. Nesse ponto é interessante ressaltar, a título de informação, de que o modelo proposto por Malley e Edzwald (1991b) preconiza que flocos muito pequenos da ordem de $20\mu m$ seriam mais adequados a flotação, razão pela qual menores tempos de floculação em maiores valores de gradiente médio de velocidade são defendidos pelos autores. Nesse sentido, para os valores de razão de recirculação (p) normalmente adotados (de 0,08 a 0,12, no caso de águas destinadas ao abastecimento) o número de micro-bolhas disponíveis no tempo $t=0$ poderia ser inferior ao requerido para a flotação. Na Figura 5.26 nota-se que essa situação crítica para a FAD ocorreria para valores de diâmetros de flocos menores ou iguais a $60\mu m$, quando foi analisada a razão de recirculação (p) de 0,05, e para valores de diâmetros de flocos menores ou iguais a $50\mu m$, quando foi analisada a razão de recirculação (p) de 0,10 mantendo-se fixo o diâmetro médio das bolhas de $25\mu m$. Diante desse quadro haveria duas possibilidades: i) aumentar o valor de p , mantendo-se fixa a P_{sat} , para que o valor de N_{bo} aumentasse ou, ii) aumentar o valor de D_F até um valor de $N_{bo}/N_{fo}.n$ próximo à unidade.

Por outro lado, sabe-se que flocos muito grandes (da ordem de $1500\mu m$) são prejudiciais ao processo de FAD, razão pela qual não é recomendada a extrapolação de resultados obtidos em jarreste para os estudos que envolvem a flotação. Baseado nesta análise, pode-se supor que existe um tamanho ideal de flocos para o processo de FAD e que, para as condições específicas investigadas nesta tese e analisando somente o ponto de vista do número de bolhas e flocos presentes em relação ao valor teórico de n , este valor situar-se-ia até $1000\mu m$ pois, a partir deste valor de D_F observa-se, na Figura 5.26, que o valor de $N_{bo}/N_{fo}.n$ tem aumento insignificante.

Uma outra constatação interessante, ainda baseada na análise da Figura 5.26, é que o valor de $N_{bo}/N_{fo}.n$ não foi alterado com a variação de D_b . O número de

micro-bolhas disponíveis no tempo $t=0$ varia com o volume da bolha na mesma proporção em que varia a velocidade ascensional da bolha. Portanto, para um mesmo valor de D_F , a razão dada por $N_{bo}/N_{fo}.n$ é alterada somente com a razão de recirculação (p), mantendo-se P_{sat} constante.

Uma outra questão a ser verificada é a possibilidade do número n de micro-bolhas aderir aos flocos em função da área superficial dos mesmos (AS_{flocos}). Ou seja, cada floco deve possuir área superficial suficiente para que o número n de micro-bolhas possa aderir a sua superfície, formando uma monocamada de micro-bolhas. Assumindo que cada micro-bolha com um determinado diâmetro d necessite de uma área equivalente ao quadrado circunscrito de lado igual a d e que os flocos sejam esféricos (conforme preconiza Reali (1991)), pode-se supor que a condição de área seja satisfeita quando a razão $AS_{flocos}/n.d^2$ for maior que a unidade.

A Figura 5.27 apresenta a relação entre $AS_{flocos}/n.d^2$ e o diâmetro dos flocos, para diferentes diâmetros de micro-bolhas e valores de razão de recirculação.

Figura 5.26 Relações entre os valores de N_{bo} , N_{fo} e n para diferentes valores de diâmetros de flocos (D_F), de micro-bolhas (D_b) e de razão de recirculação (p). Fixos: $TASz.c$ 200m/dia, concentração volumétrica de flocos $0,00213 \text{ n}^3/\text{m}^3$ água. Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente.

Figura 5.27 Relação entre $AS_{\text{flocos}}/n.d^2$ e o diâmetro dos flocos para diferentes valores de (D_F), de micro-bolhas (D_B) e de razão de recirculação (p). Fixos: TASz.c 200m/dia, concentração volumétrica de flocos $0,00213 \text{ m}^3/\text{m}^3$ água, pressão líquida de saturação de 450KPa. Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente.

Nota-se na Figura 5.27 que a condição crítica ($AS_{\text{flocos}}/n.d^2 < 1$) ocorre para os menores tamanhos de micro-bolhas ($D_B 25\mu\text{m}$ para $D_F < 100\mu\text{m}$ ou $D_F > 2000\mu\text{m}$), pois apesar de ocuparem menor área na superfície do floco, o valor de n é mais elevado, mantendo-se fixo o diâmetro do floco (D_F). Mantendo-se fixo o tamanho da micro-bolha (D_B), verifica-se que a razão $AS_{\text{flocos}}/n.d^2$ obteve valor menor que a unidade para as condições extremas de diâmetros de flocos. Analisando os resultados somente sob a óptica da razão entre áreas, pode-se supor que bolhas maiores são mais favoráveis para o processo de FAD quando comparada as bolhas menores. Entretanto, não se pode esquecer que a hidrofobicidade é condição necessária para que a flotação ocorra e, em última análise, esta determina o tamanho máximo de micro-bolha que pode ser aderida a um determinado floco para que a ligação bolha-floco seja efetiva (ou seja, para que as forças cizalhantes decorrentes da variação da velocidade ascensional não superem as forças de ligação). Finalmente, é interessante observar que o valor da razão de recirculação (p) não altera o comportamento da razão entre áreas.

Como consideração final deste item, salienta-se que as Figuras 5.26 e 5.27 foram construídas visando verificar o efeito do número e da área das micro-bolhas e flocos no processo de FAD. Sob este ponto de vista, verificou-se que a relação entre os valores de p , D_B e D_F são fundamentais para a FAD. A complexidade do processo envolve, sem dúvida, um número muito maior de variáveis e as considerações feitas podem não traduzir fielmente o que ocorre na realidade. Além disso, a relação entre áreas expressa em termos de $AS_{\text{flocos}}/n.d^2$ deve ser analisada com certo cuidado tendo em vista a hipótese da monocamada de micro-bolhas assumida para os cálculos efetuados. Sabe-se, através das imagens adquiridas nos ensaios desta tese, que as micro-bolhas podem estar presentes na forma de cachos (ver Figura 5.27.1 como exemplo ilustrativo). Assim, desde que a velocidade terminal destes

cachos não seja suficiente para romper a ligação bolha-floco pode-se assumir que os flocos cuja relação $AS_{\text{flocos}}/n.d^2$ seja menor que 1 podem atender ao valor de n requerido. No entanto, com base nas considerações feitas, verifica-se que as condições extremas de tamanhos de bolhas e flocos ($D_B < 25\mu\text{m}$ para $D_F < 100\mu\text{m}$ ou $D_F > 2000\mu\text{m}$) conduzem às situações limite do processo de FAD e podem alterar negativamente a eficiência da FAD.

Figura 5.27.1 Exemplo ilustrativo de micro-bolhas presentes na forma de cachos. Imagens adquiridas visando análise preliminar dos procedimentos apresentados no método do Capítulo 2 desta tese.

5.4.3.4 Análise do valor de β_{td} e $1/\beta$: a relação com o diâmetro das micro-bolhas e dos flocos com a eficiência de remoção de cor aparente e turbidez nos ensaios realizados com a instalação piloto de FAD.

Até este ponto, discutiu-se separadamente os mecanismos que interferem no processo de FAD, com base nos conceitos introduzidos para a proposição da modelação matemática apresentada por Reali (1991) e com base nos dados obtidos experimentalmente na instalação piloto de FAD. As principais hipóteses do modelo foram investigadas e discutidas tais como: aglutinação das micro-bolhas no interior da zona de reação (Capítulo 4); a estratégia adotada para a questão da forma dos flocos (item 5.3.3); o valor de G_m baseado na distribuição de micro-bolhas (item 5.4.3.1); a relação entre os choques ($a_{1,2}/a_3$), o valor de n em relação a N_{bo}/N_{fo} e, adicionalmente, a razão de área.

Desse ponto em diante, apresenta-se a análise da sensibilidade do modelo matemático proposto por Reali (1991) com base nos parâmetros de projeto: tempo de detenção da zona de reação ($t_{d,z,r}$) e taxa de aplicação superficial na zona de clarificação $TAS_{z,c}$ (downflow); e com base nos parâmetros operacionais: distribuição de tamanho de partículas (micro-bolhas e flocos) e razão de recirculação (p). Portanto, julgou-se conveniente reapresentar e discutir a equação proposta pelo referido autor.

$$btd = -\left\{ \ln \left[1 - \frac{nf}{S_v p} \left(\frac{d_B}{d_F} \right)^3 \right] \right\} \frac{p(1+p)d_F^3}{6fa}$$

Na equação, os parâmetros de projeto são traduzidos através das variáveis td e do valor de n . O valor de n depende da $TAS_{z,c}$ adotada e o valor de td é interpretado como sendo o tempo de detenção necessário na zona de reação ($td_{z,r}$) para que os flocos atinjam a velocidade mínima requerida para que ocorra a flotação, ou seja, para que o valor de n seja atingido.

Os parâmetros operacionais são traduzidos através do valor da razão de recirculação (p) e do valor de d_F . O valor de S_v e de d_B dependem, à priori, somente da pressão da câmara de saturação (P_{sat}) e do dispositivo de depressurização utilizado.

As características das bolhas e flocos formados determinam as condições de choque traduzidas pela variável a e a característica do afluente determina o valor da concentração volumétrica de flocos F . Já o valor de β , leva em consideração a efetividade das colisões e esta diretamente relacionado com as características de forma e de superfície dos flocos e das bolhas (REALI, 1991).

Conforme comentado por Reali (1991):

...numa situação ideal, onde todas as colisões fossem efetivas ($\beta=1$), o valor de t_d encontrado pela equação representaria o tempo teórico necessário para que todos os flocos atinssem a velocidade estipulada. Por outro lado, se for assumido um certo valor de tempo de detenção na zona de contato (reação) e tendo-se calculado o valor de βt_d , é possível calcular o inverso de β ($1/\beta$), que representa o número teórico de choques por floco “disponíveis” no reator para fornecer pelo menos 1 choque efetivo. Em resumo, quanto maior o valor de βt_d encontrado, pior é a situação, pois para se atingir a eficiência desejada exigir-se-ia ou um tempo de detenção maior (fixando-se β) ou maiores valores de β (flocos com maior número de sítios hidrofóbicos, por exemplo), se o tempo de detenção for fixo.

Assim, a sensibilidade do modelo foi verificado tendo por base a análise do parâmetro βt_d , frente as variações de eficiência de remoção de cor aparente e de turbidez quando os parâmetros de projeto (t_d e $TASz.c$) e os operacionais (d_F , p) foram alterados na unidade piloto de FAD.

Primeiramente foram analisados os efeitos de tamanho de bolhas e flocos no valor de βt_d . As Figuras 5.28 e 5.29 apresentam esta análise baseando-se nos resultados obtidos experimentalmente.

Figura 5.28 Relação entre o valor de βt_d e o diâmetro médio das micro-bolhas para diferentes valores de razão de recirculação (p). a) para d_F de 274 μm e b) para d_F de 306 μm . Fixos: $TASz.c$ 200m/dia, concentração volumétrica de flocos 0,00213 m^3/m^3 água, S_v 0,076 m^3 de ar/ m^3 de água e G_m 8s $^{-1}$. Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto de FAD.

a)

b)

Figura 5.29 Relação entre o valor de β_{td} e o diâmetro médio dos flocos para diferentes valores de razão de recirculação (p). a) para δB de 25 μm e b) para δB de 50 μm . Fixos: TASz.c 200m/dia, concentração volumétrica de flocos 0,00213 m^3/m^3 água, Sv 0,076 m^3 de ar/ m^3 de água e Gm 8 s^{-1} . Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto de FAD.

Na Figura 5.28, observa-se a clara distinção entre as curvas para os valores de razão de recirculação (p) de 0,05 e 0,10. Para um mesmo diâmetro de bolha, o valor β_{td} foi significativamente mais baixo para o maior valor de p , mantendo-se fixos os demais parâmetros. Para cada valor de p , observa-se que o valor de β_{td} cai expressivamente para maiores valores de δB . Isto indica maior eficiência do processo de FAD. No entanto, não se pode negligenciar que o modelo proposto por Reali (1991) considera sobretudo os aspectos cinéticos da flotação e não considera diretamente os efeitos relativos a hidrofobicidade dos flocos. Conforme observado pelo referido autor, o tamanho ideal das micro-bolhas de ar esta associado, antes de tudo, ao grau de hidrofobicidade dos flocos presentes.

De maneira similar à Figura 5.28, a Figura 5.29 apresenta os valores de β_{td} para diferentes tamanhos de flocos. Os resultados apresentados mostram claramente que os valores de β_{td} foram menores para o maior valor de p (0,10). A descontinuidade das curvas apresentadas nas Figuras 5.24 e 5.25 aparecem novamente e foram ocasionadas pela mudança na relação entre o diâmetro médio do conjunto bolha+floco e a microescala de turbulência (λ) que define a região em que ocorre o choque entre as partículas (sub-região viscosa e sub-região inercial). Nesse ponto, o valor de β_{td} cai bruscamente pois os mecanismos de transporte ocorrem mais efetivamente quando há uma maior dissipação de energia na massa líquida (maior energia fornecida). Verifica-se também que existe um limite máximo de tamanho de flocos ($\sim 1000\mu\text{m}$) a partir do qual a eficiência (representada por β_{td}) começaria a ser prejudicada, considerando a água investigada e mantendo-se fixos os demais parâmetros conforme especificado no quadro contido nas figuras. Comparando-se os resultados dos gráficos referentes a Figura 5.29-a e b, nota-se que, para a mesma faixa de flocos investigada, os valores de β_{td} foram menores para o maior diâmetro de bolha ($50\mu\text{m}$) referente ao D_{Sauter} obtido experimentalmente (Figura 5.29-b). Novamente, cabem as observações feitas para a Figura 5.28 onde o tamanho máximo de bolha é determinado em função do grau de hidrofobicidade dos flocos.

Para a análise do comportamento de β_{td} com os resultados experimentais de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez na instalação piloto de FAD, adotou-se a média do valor residual de cada parâmetro monitorado durante o período onde as condições de operação foram mantidas constantes. Estes resultados são apresentados na Tabela 5.6

Enfatiza-se, novamente, que o foco do trabalho não foi a obtenção de valores residuais baixos e sim verificar as diferenças de desempenho da unidade quando os parâmetros de interesse foram variados para que os resultados pudessem ser comparados.

Tabela 5.6 – Média dos resultados de cor aparente e turbidez residuais referentes aos ensaios na instalação piloto de FAD variando-se as condições de operação e de projeto. t_d teórico de 90 e 40 segundos referem-se a t_d reais de 225 e 100 segundos, respectivamente de acordo com os resultados experimentais dos ensaios de estímulo e resposta. Os valores indicados por R10% e R5% referem-se a razão de recirculação (p) de 0,10 e 0,05, respectivamente. Os resultados referentes $D_{médio}$ e D_{Sauter} das micro-bolhas foram investigadas na etapa de ensaios apresentada no Capítulo 4 desta tese. Os diâmetros dos flocos referentes aos valores de G_f de 50 e 90 s⁻¹ são de 306 e 274 μ m, respectivamente e estão apresentados no item 5.4.2 deste capítulo. Os valores de $TAS_{z.c}$ foram calculados com base na área em planta da zona de clarificação (downflow rate).

Resultados médios dos ensaios de tratabilidade para TAS200m3/m2dia com G_f de 50s-1 DF306micra					
Cor Ap. (uPtCo) afluente	Cor Ap. (uPtCo) Td teórico 90 seg. R10%	Cor Ap. (uPtCo) Td teórico 40 seg. R10%	Cor Ap. (uPtCo) Td teórico 40 seg. R5%	Cor Ap. (uPtCo) Td teórico 90 seg. R5%	
50,33	5,00	7,67	19,67	14,17	
Ci/Co	0,10	0,15	0,39	0,28	
5,35	0,52	0,78	1,84	1,39	
Ti/To	0,10	0,15	0,34	0,26	
Resultados médios dos ensaios de tratabilidade para TAS200m3/m2dia com G_f de 90s-1 DF274micra					
Cor Ap. (uPtCo) afluente	Cor Ap. (uPtCo) Gf2 90s-1 Td teórico 90 seg. R10%	Cor Ap. (uPtCo) Gf2 90s-1 Td teórico 40 seg. R10%	Cor Ap. (uPtCo) Gf2 90s-1 Td teórico 40 seg. R5%	Cor Ap. (uPtCo) Gf2 90s-1 Td teórico 90 seg. R5%	
48,83	6,83	7,17	22,67	13,50	
Ci/Co	0,14	0,15	0,46	0,28	
5,10	1,37	1,43	2,26	1,21	
Ti/To	0,21	0,28	0,44	0,24	
Td teórico 90 seg. R10%		Td teórico 40 seg. R10%	Td teórico 40 seg. R5%	Td teórico 90 seg. R5%	
$D_{médio}$		36	28	16	21
D_{Sauter}		48	49	39	38
Resultados médios dos ensaios de tratabilidade para TAS125m3/m2dia com G_f de 90s-1					
TD40r10					
afluente	efluente	afluente	efluente		
	50,33	10,50	5,35		1,13
Ci/Co		0,21	Ti/To		0,21
Td teórico 40 seg. R10%					
$D_{médio}$		28			
D_{Sauter}		49			

O gráfico apresentado na Figura 5.30 foi construído com base nos resultados de eficiência obtidos experimentalmente na instalação piloto, apresentados na Tabela 5.6, e com base nos resultados médios de diâmetros de bolhas e flocos obtidos através da metodologia apresentada no Capítulo 2, cujos resultados encontram-se no Capítulo 4 e 5 desta tese.

Figura 5.30 Relação entre o valor de β_{td} e a porcentagem residual remanescente de cor aparente e turbidez adotando valor de $\beta=1$. Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto de FAD.

Para a obtenção dos valores de β_{td} apresentados na Figura 5.30, foi adotado o valor de β igual a 1. Esta situação é puramente hipotética pois indicaria que todos os choques entre bolhas e flocos foram efetivos. Nesse caso, verifica-se que o valor de t_d necessário na zona de reação para que todos flocos atingissem a velocidade V_{BF} , estipulada em função da $TAS_{z,c}$ desejada, poderia ser muito baixo, entre 1 a 2,6 segundos, aproximadamente. Assim, os resultados devem ser analisados comparativamente. No entanto, admitindo um valor de β igual a 0,05, por exemplo, o comportamento da curva seria exatamente o mesmo pois, alterar-se-ia somente o valor de t_d correspondente a essa adoção. Assim, o valor de t_d necessário na zona de reação para que todos os flocos atingissem a velocidade V_{BF} , estipulada em função da $TAS_{z,c}$ desejada, estaria entre os valores de 20 a 52 segundos, aproximadamente, para este novo valor de β adotado.

Os resultados apresentados na Figura 5.30 comprovaram que existe uma forte influência dos residuais remanescentes de cor aparente e turbidez com a variação do valor de β_{td} . Esta influência demonstrou-se mais direta quando foi considerado o valor residual de cor aparente. A nuvem de pontos ao redor da curva de aproximação exponencial se demonstrou bastante coerente com a suposição de que o valor de β_{td} pode refletir a eficiência do tratamento por FAD analisando somente os aspectos relativos a zona de reação.

É claro que os resultados sofreram influência das diversas aproximações consideradas tanto na proposição do modelo quanto nos valores obtidos experimentalmente. Porém, não se pode desconsiderar a tendência existente entre o comportamento da FAD e o valor de β_{td} , afinal trata-se de um modelo fundamentado nos mecanismos do processo e não um modelo empírico. Além disso, deve-se ter em mente que os resultados apresentados referem-se a investigação em unidade piloto e que, por esta razão, o controle de algumas variáveis do processo não pôde ser tão rigoroso como se desejaria. Soma-se, a questão das partículas presentes, principalmente os flocos, que apesar da grande heterodispersidade e diversidade de formas, foram assumidos em termos do diâmetro médio e da forma esférica (baseado no princípio da esfera equivalente de mesma área projetada).

No entanto, com a unidade piloto foi possível investigar parâmetros operacionais e de projeto. Desta forma, os resultados apresentados nesta tese refletem mais fielmente as condições relativas ao projeto e a operação de uma unidade plena de FAD e, por esta razão, são extremamente fortes. Com base nesses resultados, acredita-se que os valores de t_d do modelo podem orientar a adoção da $TAS_{z,r}$ no projeto de unidades plenas.

Conforme apresentado, alternativamente ao valor de t_d , pode-se extrair do valor de β_{td} o número teórico de choques disponíveis por floco na zona de reação. Assim, a Figura 5.31 apresenta os gráficos referentes a cor aparente e turbidez residuais em função do inverso de β ($1/\beta$).

Figura 5.31 Relação entre o valor de $1/\beta$ e a porcentagem residual remanescente de cor aparente e turbidez utilizando os valores de t_d obtidos nos ensaios estímulo resposta. Cálculos efetuados com base no modelo proposto por Reali (1991) e nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto de FAD.

Os resultados apresentados na Figura 5.31 foram obtidos a partir dos valores calculados de βt_d (baseado nos resultados obtidos experimentalmente e apresentados na Figura 5.30) e dos valores de t_d obtidos dos ensaios de estímulo e resposta apresentados no Capítulo 4 desta tese.

De acordo com a definição de Reali (1991), o valor correspondente ao inverso de β ($1/\beta$) representa o número teórico de choques disponíveis por floco no reator. Assim, quanto maior o número de choques disponíveis maior a possibilidade daquele floco ser removido. Analisando os resultados da Figura 5.31 verificou-se que existe uma relação coerente entre o número de choques disponíveis e a eficiência do processo de FAD. Verificou-se que maiores valores de choques disponíveis por floco ($1/\beta$) acarretam em maior desempenho da unidade de FAD.

A luz dos resultados obtidos acredita-se que o modelo pode constituir importante ferramenta de auxílio na avaliação e na adoção de $TAS_{z,r}$ para projeto de unidades, baseado na análise do parâmetro t_d da modelação proposta por Reali (1991).

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conhecer a fundo o processo de FAD significa entender a relação existente entre as três fases presentes (sólida, líquida e gasosa). Existem diversos modelos que buscam interpretar os mecanismos que envolvem o processo de FAD, nos quais destacaram-se três para a discussão desta tese (Malley e Edzwald (1991b), Reali (1991) e Fukushi, Tambo e Matsui (1995)). No entanto, dada a complexidade na determinação dos parâmetros envolvidos, somente a sensibilidade do modelo proposto por Reali (1991) foi verificado, frente ao desempenho da unidade piloto de FAD utilizada, visando investigar a influência da DTP e do $td_{z,r}$ no desempenho do processo. Os demais contribuíram para enriquecer a discussão da questão do tamanho dos flocos adequados para o processo de FAD, já que são discordantes entre si.

Através dos resultados experimentais e com base no modelo proposto por Reali (1991), verificou-se que tamanhos de flocos muito pequenos ($<100\mu\text{m}$), conforme preconizado por Malley e Edzwald (1991b), são mais sensíveis ao número de bolhas disponíveis (N_{bo}). Isto pode significar a necessidade de adoção de maiores valores de razão de recirculação (p) na operação de unidades de FAD, mantendo-se fixa a pressão de saturação (P_{sat}). Além disso, conforme observado por Haarhoff e Edzwald (2001), menores flocos demandam menores bolhas o que, em última análise pode limitar a $TAS_{z,c}$ adotada. Por outro lado, flocos muito grandes, conforme preconizado por Fukushi, Tambo e Matsui (1995), podem não atender ao requisito de área superficial. Ou seja, considerando a hipótese de monocamada de micro-bolhas, os flocos podem não possuir área suficiente para que o número de micro-bolhas necessárias para a flotação seja aderido a sua superfície, mesmo havendo excesso de micro-bolhas em relação aos flocos ($N_{bo} >> N_{fo}$).

Com relação ao projeto de unidades de FAD verificou-se, através da literatura concernente, que os parâmetros de projeto para a zona de reação das unidades de FAD são muito dispersos e imprecisos, constituindo grande lacuna na tecnologia. No entanto, a própria literatura é enfática em admitir a importância desta região do tanque no desempenho do processo de FAD.

Conforme comentado nas considerações iniciais do presente capítulo, o modelo proposto por Reali (1991) foi utilizado como ferramenta para balizar as discussões realizadas e avaliar a influência no desempenho da unidade de FAD investigada frente a variação das condições de mistura, da distribuição de tamanho de partículas (micro-bolhas e flocos) e do tempo de detenção hidráulica na zona de reação.

O modelo proposto por Reali (1991) centra-se na zona de reação das unidades de FAD convencionais, relacionando os parâmetros de projeto ($TAS_{z,c}$; $TAS_{z,r}$; $td_{z,r}$ e Tf) e os parâmetros operacionais (p , Gf). A análise da sensibilidade do modelo é condição necessária para aprimoramento do mesmo. Nesse sentido verificou-se, através dos resultados obtidos nesta tese, que os valores de β_{td} do modelo proposto por Reali (1991) foram sensíveis as diferentes condições de desempenho verificadas na

unidade piloto de FAD. Evidentemente que, para incremento do modelo recomenda-se a realização de uma bateria mais ampla de ensaios.

Ainda com relação ao modelo proposto por Reali (1991), o caráter heterodisperso e a questão da forma dos flocos são pontos importantes para aprimoramento do mesmo. Acredita-se que a incorporação de uma função de distribuição de tamanho (ao invés da adoção de valores médios) e de parâmetros, tais como o diâmetro de fractal, que levem em conta o caráter desuniforme dos flocos presentes, podem refinar o modelo e propiciar a adoção de valores de projeto mais seguros. Da mesma maneira que os flocos, as bolhas também apresentam caráter heterodisperso e a adoção de uma função de distribuição pode contribuir para refinamento do modelo proposto por Reali (1991).

Entretanto, os resultados apresentados permitem asserir que o valor de β_{td} apresenta-se como potencial ferramenta na análise qualitativa e comparativa entre os parâmetros de projeto da zona de reação de unidades de FAD.

Quanto à adoção de parâmetros para projeto da zona de reação de unidades de FAD convencionais, os resultados e análises apresentados nesta tese demonstraram que existe uma forte relação entre o valor de $td_{z,r}$ e o valor de p no desempenho do processo, mantendo-se fixas as demais condições (P_{sat} , G_f e T_f , G_m , características da água etc). Verificou-se que maiores tempos de detenção podem requerer menores concentrações de micro-bolhas entretanto aconselha-se a realização de um maior número de ensaios visando confirmar esta hipótese. Isso poderia implicar em considerável economia de energia na operação da unidade de FAD haja vista que a produção de micro-bolhas é decisiva nos custos operacionais de unidade de FAD. Uma vez confirmada esta hipótese, com a realização de maior número de ensaios, poderia-se especular que, caso se deseje um tempo de detenção menor na zona de reação maiores valores de razão de recirculação (p) deveriam ser fornecidos para manter o desempenho desejado. Caso contrário o desempenho da unidade de FAD poderia ser prejudicado. Alternativamente, o valor do gradiente de mistura no interior da zona de reação poderia ser incrementado, dependendo da geometria adotada no projeto da zona de reação e da vazão afluente, entretanto verificou-se através dos ensaios apresentados no Capítulo 4 que o aumento da $TAS_{z,r}$ pode incorrer em alterações na DTMB e alterar negativamente o desempenho do processo.

Evidentemente a questão do tempo de detenção hidráulica na zona de reação esta relacionado também, com as características do pré-tratamento realizado na etapa de coagulação/floculação pois, mantendo-se fixa a mesma água, uma variação de G_f e T_f ocasionaria uma variação de D_f o que, em última análise, altera a concentração de flocos presentes. Assim, os mecanismos e a probabilidade de choque entre bolhas e flocos são alterados e o desempenho da unidade poderá ser diferenciado, caso o valor da concentração de micro-bolhas expressa em termos da recirculação (p) não seja modificado. No entanto, partindo dos resultados obtidos nesta tese pode-se supor que a adoção de maiores tempos de detenção hidráulica

na zona de reação pode minimizar o valor de p e diminuir o custo operacional do processo.

Baseado nestas assertivas pode-se supor que, para o projeto de unidades de FAD convencionais, é preferível que se adote um tempo de detenção maior ou igual a 90 segundos (correspondente a $T_{d_{medidoz.r}}$ de 225 segundos), visando maior eficiência de flotação. Os resultados contradizem as afirmações feitas por Lundh, Jönsson e Dahlquist (2002) que recomendam valores de tempo de detenção maiores que 33 segundos bem como as afirmações feitas por Tambo (1990 apud AYMAN et al., 1998), que sugere que um tempo de contato de 15 a 20 segundos é suficiente para promover a agregação bolhas-flocos. No entanto, deve-se levar em conta que os referidos autores analisaram o comportamento da zona de reação estritamente sob o ponto de vista da estrutura do escoamento, desconsiderando aspectos relativos ao desempenho da unidade investigada. Diferentemente, os resultados apresentados nesta tese analisaram a influência da DTP (micro-bolhas e flocos), da velocidade e do tempo de detenção na zona de reação no desempenho da FAD.

5.6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- ✓ O tamanho dos flocos adequados para o processo dependem de diversos fatores e devem ser determinados caso a caso através de ensaios de laboratório, no entanto verificou-se que flocos muito pequenos sofrem grande interferência do número de bolhas (N_{bo}) ao passo que flocos muito grandes podem não atender ao requisito de área superficial mínima para agregação das micro-bolhas;
- ✓ O valor de β_{td} , do modelo matemático proposto por Reali (1991), foi sensível a condição de desempenho verificada na unidade piloto de FAD apresentando potencial para utilização na concepção de projetos da zona de reação de unidades de FAD convencional;
- ✓ Conforme esperado, a zona de reação desempenha um papel fundamental no desempenho da FAD operando no modo convencional, verificado através dos resultados de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez;
- ✓ Tendo em vista os resultados experimentais obtidos nesta, recomendam-se valores de $td_{z.r}$ de 225 segundos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA TESE

Os artigos concernentes aos fundamentos que envolvem o processo de FAD são enfáticos em admitir a importância da relação entre as partículas presentes no meio líquido e as condições hidrodinâmicas no desempenho do processo. Observou-se, no entanto, que a dificuldade de obtenção dos parâmetros em escala piloto restringiu a abordagem sistêmica do processo. Os principais artigos referentes ao tema centraram-se ou na análise da teoria, com o desenvolvimento de modelos matemáticos; ou na obtenção de tamanho de partículas em escala de laboratório; ou ainda, na obtenção das características hidrodinâmicas de unidade piloto sem relacionar tal aspecto com o desempenho do processo.

Assim, o caráter original deste trabalho esteve na obtenção da distribuição de tamanho de micro-bolhas e flocos, sua relação com o binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação com o desempenho de uma unidade piloto de FAD. O foco da análise foi dado na zona de reação da unidade de FAD região essa na qual se encontra baseado o modelo matemático proposto por Reali (1991), utilizado para a análise da influência da distribuição de tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho do processo. A partir daí foram traçados os objetivos específicos da tese.

Analisando os objetivos inicialmente traçados (Capítulo 1, seção 1.6), verifica-se que todo o desenvolvimento da tese centrou-se na execução de cada um desses objetivos de forma gradual, de acordo com as necessidades que se impunham ao cumprimento da proposta principal.

Inicialmente os trabalhos desenvolvidos centraram-se no desenvolvimento de dois métodos (Capítulo 2). Um (seção 2.2) para aquisição, tratamento e obtenção da distribuição de tamanho de micro-bolhas e flocos em sistema com escoamento contínuo, sem a necessidade de se efetuar a coleta de amostras, característica não comum em métodos de análise de partículas. Outro (seção 2.3), para tratamento dos dados da sonda de ultra-som, utilizada para mapeamento dos vetores velocidade no interior da zona de reação da unidade piloto. Este último contou com desenvolvimento de um programa pois, não havia no mercado qualquer outro software que pudesse ser adaptado para interpretação dos resultados obtidos com a sonda. A incursão nesses dois temas exigiu grande esforço adicional na elaboração da tese e contemplou um percurso de risco, mas esteve sempre embasada numa visão clara do objetivo principal do trabalho.

O desenvolvimento do método para determinação da distribuição de tamanho de partículas centrou-se na análise de imagem pois, acredita-se que este foi o único procedimento viável, sob o ponto de vista econômico e metodológico, para obtenção de amostras indeformadas no interior do reator. No entanto, o tempo exigido para tratamento e a análise dos resultados utilizando imagem é muito superior quando

comparado com os demais métodos disponíveis no mercado. Isso acabaria por limitar o número de objetos analisados incorrendo em maior erro amostral. Assim, no desenvolvimento do método houve uma preocupação constante com a característica das imagens adquiridas de modo que elas pudessem ser tratadas através de procedimentos semi-automáticos. Com isso foi possível realizar a análise de um grande número de partículas (micro-bolhas e flocos), diminuindo o erro decorrente do número de amostras. Os resultados obtidos com o método desenvolvido foram comparados com os apresentados na literatura e mostraram-se bastante coerentes. Acredita-se que o método possa ser aplicado em unidades em escala real desde que sejam feitas adaptações adequadas nas instalações.

Já o desenvolvimento do programa *VelDigital3D* foi centrado na visualização dos resultados obtidos com a sonda micro-ADV. O programa proporcionou agilidade no tratamento dos resultados obtidos com a sonda e foi possível analisar a distribuição espacial dos vetores velocidade e gerar diferentes tipos de gráficos. Acredita-se que a utilização do programa não deve ser considerada apenas para a obtenção de resultados no sistema para o qual este foi desenvolvido. A idealização do programa partiu do ponto de que era viável utilizá-lo nas mais diferentes áreas de pesquisa onde o emprego da sonda microADV fosse possível. Sua concepção foi baseada na busca de uma ferramenta simples que fornecesse um resultado visual possível de ser analisado espacialmente.

Numa fase intermediária do trabalho (Capítulo 3), porém paralela ao desenvolvimento do programa *VelDigital3D*, foi verificada a interferência das micro-bolhas de ar na obtenção dos vetores velocidade na unidade piloto de FAD, utilizando o micro-ADV. Esta investigação fez-se necessária pois, testes realizados por Lundh, Jönsson e Dahlquist (2000) indicaram uma alteração no valor da velocidade medida em água contendo grande concentração de micro-bolhas quando comparada a água sem a presença de micro-bolhas. Evidentemente as condições de escoamento são alteradas com a introdução de micro-bolhas de ar no entanto, a questão analisada foi a alteração na medida da velocidade em si e não a alteração do comportamento do escoamento com a introdução de micro-bolhas. Através da metodologia proposta, verificou-se que o micro-ADV poderia ser utilizado para as medidas de velocidade nas diferentes concentrações de ar investigadas. Assim, foram realizados os ensaios subseqüentes que visaram a avaliação tridimensional do escoamento utilizando o micro-ADV conjugado ao programa desenvolvido (*VelDigital3D*). Os resultados obtidos demonstraram que o escoamento no interior da zona de reação possuía um padrão de recirculação bastante definido. Especulou-se que esta característica pode ser positiva, nos casos onde o choque entre as partículas e bolhas seja o fator limitante, e negativa nos casos onde a baixa hidrofobicidade dos flocos produzidos exija uma menor mistura para que não haja ruptura da ligação bolhas-floco. Aconselhou-se o estudo criterioso de cada caso em particular e recomendou-se a investigação de duas conformações distintas na zona de reação: uma com escoamento tendendo a mistura completa e outra com escoamento tendendo ao pistonado visando avaliar o desempenho da FAD. Foi sugerido o desenvolvimento de um método para a realização de ensaios visando a

obtenção do gradiente médio de velocidade utilizando o ferramental desenvolvido. O conhecimento do valor do gradiente médio de velocidade no interior da zona de reação de unidades de FAD ajudaria a compreender melhor as questões que envolvem o processo de FAD e daria a possibilidade de refinamento de tal variável para aplicação no modelo matemático proposto por Reali (1991).

Posteriormente, no Capítulo 4 foi investigada a Distribuição de Tamanho de Micro-Bolhas (DTMB) na zona de reação da unidade piloto de FAD analisando alguns possíveis agentes na aglutinação das micro-bolhas após a despressurização tais como: i) as condições de mistura expressas em termos da Taxa de Aplicação Superficial (TAS) e tempo de detenção na zona de reação ($T_{d,z,r}$), ii) razão de recirculação (p), iii) a variação de pH e, iv) a dosagem de coagulante (Al^{+3}). Esta verificação foi necessária sob dois aspectos: i) a modelação proposta por Reali (1991) considera como efetiva somente a colisão entre micro-bolhas e flocos desconsiderando, portanto, a possível aglutinação das micro-bolhas e, ii) sob o ponto de vista prático, a alteração das condições de mistura na zona de reação pode propiciar o aumento da taxa de colisão entre micro-bolhas, favorecer a aglutinação e diminuir o desempenho de unidades de FAD.

Embora os valores dos diâmetros médios ($D_{médio}$) de micro-bolhas obtidos não apresentaram alteração significativa em nenhuma das condições investigadas (18 a $32\mu m$), ou entre 40 e $50\mu m$ quando utilizado o diâmetro estatístico D_{Sauter} , os resultados apresentados indicaram uma variação, algumas vezes expressivas da frequência volumétrica relativa das micro-bolhas. Discutiu-se as possíveis alterações na eficiência do processo decorrente da variação da distribuição de tamanho das micro-bolhas (DTMB).

Verificou-se a alteração das condições de choque e na velocidade ascensional do conjunto bolhas-floco decorrentes da variação da DTMB, balizado no modelo desenvolvido por Reali (1991). Tomando como exemplo os resultados obtidos experimentalmente em uma das situações investigadas e com base no modelo proposto por Reali (1991), foi possível verificar que pode haver uma diminuição expressiva do número de micro-bolhas com um determinado tamanho, decorrente da variação da DTMB, podendo alterar a cinética da FAD já que esta é dependente do número de bolhas. Especulou-se que a alteração da velocidade ascensional do conjunto bolha-floco pode implicar em duas conseqüências: i) o rompimento da ligação bolha/floco se o ângulo de contato não possuir valor suficiente para resistir ao aumento das tensões cisalhantes (viscosidade do líquido) devido ao aumento do empuxo atuante e ii) em uma situação extrema pode haver um número menor de bolhas que o mínimo necessário para que a flotação ocorra ($n.N_f$, onde: n =número mínimo de micro-bolhas aderidas a um floco para que este se torne flutuável e, N_f = número de flocos presentes. Estas situações acarretariam, em uma condição extrema, no colapso do sistema de FAD.

Outro fator a ser considerado refere-se as distâncias entre micro-bolhas. Assumindo que uma micro-bolha ocupa o centro de um volume determinado por um cubo de lado D , calculou-se a variação da distância entre micro-bolhas decorrente da variação da DTMB obtida experimentalmente. Verificou-se um aumento das distâncias entre micro-

bolhas alterando a probabilidade de choque entre bolhas e flocos, considerando a hipótese assumida por Reali (1991) de que a colisão se dá quando bolha e floco se encontram dentro da área determinada pelo cilindro de colisão.

Além disso, verificou-se que a alteração da velocidade altera a dissipação de energia no interior da zona de reação. Discutiu-se que tal fato pode ser benéfico sob o ponto de vista da mistura pelo incremento da turbulência. Todavia, dependendo das características dos flocos formados na etapa de floculação, pode haver prejuízo na eficiência da FAD devido ao desequilíbrio entre a força de ligação bolha-floco (expressas em termos do ângulo de contato) e a força resultante da velocidade ascensional do conjunto, ou mesmo devido à quebra de ligações já formadas entre bolhas e flocos.

Um outro ponto importante, observado por Amato et al. (2001), refere-se ao ar residual que é impelido para fora do sistema de FAD, no efluente do tanque. Este ar é composto por micro-bolhas de ar livres, ou seja, que não se agregaram aos flocos, formando um conjunto de micro-bolhas residuais passíveis de serem arrastadas. Assim, conforme comentado pelo referido autor, qualquer bolha livre que entra na zona de clarificação do tanque de FAD pode potencialmente sair com o efluente. Na prática, dentro dos típicos valores de TAS adotados para unidades de FAD convencional (6-12m/h) as bolhas livres com diâmetro de até 80 μ m seriam potenciais candidatas ao arraste juntamente com o efluente. A consequência direta deste fato é que os filtros subseqüentes ao sistema de tratamento teriam menores carreiras de filtração devido a colmatação do meio filtrante, decorrente do acúmulo de ar no mesmo. Nesse sentido, deve-se considerar que grande parte do número de micro-bolhas determinadas nos ensaios desta tese possuía diâmetro menor que 30 μ m (~50%). Sob o ponto de vista específico da cinética e hidrofobicidade, bolhas menores são preferíveis, conforme observado pela maioria dos pesquisadores. No entanto, considerando-se os pontos de vista de projeto e operacional de uma unidade de FAD integrada a um sistema de tratamento e projetada para operar com uma determinada TAS, pode-se supor que as micro-bolhas com velocidades menores que a TAS estipulada e que, porventura, não tenham sido agregadas aos flocos, irão escapar do tanque de FAD e alcançar as unidades de filtração subseqüentes, caso não haja nenhum dispositivo para remoção destas micro-bolhas residuais o projeto do leito dos filtros subseqüentes deve levar em conta tal fato. No entanto, considerou-se que o arraste de micro-bolhas livres é potencialmente diminuído devido à agregação e aglutinação secundária que ocorre na parte superior da zona de clarificação do tanque de FAD. O chamado *white water* ou *white water cushion*, que nada mais é do que a região de acúmulo de micro-bolhas na porção superior da zona de clarificação do tanque de FAD, promove um contato secundário das micro-bolhas com os flocos, ou mesmo com as demais micro-bolhas, favorecendo a permanência destas no tanque de FAD. É importante enfatizar que, entende-se por secundário o contato que ocorre fora da zona de reação da unidade de FAD uma vez que esta é vista, pela maioria dos autores, como a principal região de contato entre micro-bolhas e flocos. É recomendada a realização de estudos específicos visando verificar tal consideração.

Finalmente avaliou-se no Capítulo 5 a influência da distribuição de tamanho de partículas (micro-bolhas e flocos) e do binômio velocidade/tempo de detenção hidráulico no desempenho do processo de FAD. Verificou-se que tamanhos de flocos muito pequenos ($<100\mu\text{m}$), conforme preconizado por Malley e Edzwald (1991b), são mais sensíveis ao número de bolhas disponíveis (N_{bo}). Isto pode significar a necessidade de adoção de maiores valores de razão de recirculação (p) na operação de unidades de FAD, mantendo-se fixa a pressão de saturação (P_{sat}). Além disso, verificou-se que menores flocos demandam menores bolhas o que, em última análise pode limitar a $TAS_{z,c}$ adotada. Por outro lado, discutiu-se que flocos muito grandes, conforme preconizado por Fukushi, Tambo e Matsui (1995), podem não atender ao requisito de área superficial. Ou seja, os flocos podem não possuir área suficiente para que o número de micro-bolhas necessárias para a flotação seja aderido a sua superfície, mesmo havendo excesso de micro-bolhas em relação aos flocos ($N_{bo} \gg N_{fo}$).

Com relação as características dos flocos, recomendou-se estudos envolvendo o caráter heterodisperso e a questão da forma visando refinamento do modelo proposto por Reali (1991). Acredita-se que a incorporação de uma função de distribuição de tamanho (ao invés da adoção de valores médios) e de parâmetros, tais como o diâmetro de fractal, que levem em conta o caráter desuniforme dos flocos presentes, podem aprimorar o modelo matemático.

Da mesma maneira recomendou-se a adoção de uma função de distribuição de tamanho de micro-bolhas para refinamento desta variável para entrada no modelo proposto por Reali (1991).

Por fim, avaliou-se a sensibilidade do modelo proposto por Reali (1991) centrando-se na zona de reação das unidades de FAD convencionais. Partiu-se do pressuposto que o modelo poderia ser utilizado como ferramenta na avaliação e comparação dos parâmetros de projeto da zona de reação de unidades de FAD convencionais. Além disso, a análise da sensibilidade do modelo é condição necessária para aprimoramento do mesmo. Nesse sentido verificou-se, através dos resultados obtidos nesta tese, que os valores de β_{td} do modelo proposto por Reali (1991) foram sensíveis as diferentes condições de desempenho verificadas na unidade piloto de FAD. Recomendou-se uma bateria mais ampla de ensaios para a etapa posterior de validação e incremento do modelo.

Evidentemente as diversas aproximações consideradas tanto na proposição do modelo quanto nos valores obtidos experimentalmente em unidade em escala piloto influenciaram na análise de sensibilidade do modelo. No entanto, com a unidade piloto foi possível investigar parâmetros operacionais e de projeto. Desta forma, os resultados apresentados nesta tese refletem mais fielmente, quando comparados a ensaios de bancada, as condições relativas ao projeto e a operação de uma unidade plena de FAD. Assim, com os resultados apresentados foi possível afirmar que o valor de β_{td} , proposto no modelo de Reali (1991), foi sensível as variações de desempenho da unidade piloto investigada e apresentou-se como potencial ferramenta na análise qualitativa e comparativa entre os parâmetros de projeto da zona de reação de unidades de FAD.

Com esse ferramental e baseado nos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto investigada foi possível discorrer sobre a adoção de parâmetros para projeto da zona de reação de unidades de FAD convencionais.

Assim, partindo dos resultados obtidos experimentalmente na unidade piloto investigada nesta tese e utilizando a modelação proposta por Reali (1991) como balizamento na análise, pode-se supor que a adoção de maiores tempos de detenção hidráulica na zona de reação pode minimizar o valor da razão de recirculação (p) e diminuir o custo operacional do processo. Baseado nestas assertivas pode-se supor que, para o projeto de unidades de FAD convencionais, é preferível que se adote um tempo de detenção maior ou igual a 90 segundos (correspondente a $T_{d_{medidoz.r}}$ de 225 segundos) para uma boa relação entre desempenho e gasto de energia na operação de unidades de FAD.

As pesquisas na área de engenharia são consequências das novas demandas que se impõem de acordo com as necessidades das atividades humanas e devem sempre contemplar a sua aplicação prática. Nesse sentido, espera-se que esta tese tenha introduzido, ao menos, uma parcela de contribuição na área tecnológica referente ao conhecimento dos fundamentos e aprimoramento de projeto de unidades de flotação. Da mesma forma, é do desejo do autor da presente tese que os ferramentais desenvolvidos sejam aperfeiçoados e aplicados em outras pesquisas, até mesmo em outras áreas do conhecimento, e que resultados e as discussões apresentadas possam servir de inspiração para novas propostas de investigação na medida em que os novos desafios surjam.

A seguir serão retomadas as principais conclusões apresentadas nos capítulos desta tese.

6.1 CONCLUSÕES DA TESE

- ✓ a frequência de amostragem de 50 Hz pode ser utilizada, com grande segurança, nos ensaios com o microADV visando determinar as condições de escoamento da zona de reação da unidade piloto de FAD.
- ✓ o microADV pode ser utilizado para as determinações quantitativas dos vetores velocidade nas regiões de interesse do tanque de FAD sem que haja interferência na medida causada pela concentração de micro-bolhas nas faixas investigadas na presente pesquisa.
- ✓ O escoamento no interior da zona de reação (USMB) apresentou um padrão bem definido de recirculação ao longo da altura, confirmando a suposição levantada nos através dos resultados obtidos com os ensaios estímulo e resposta e verificou-se, também, uma recirculação do fluxo no sentido transversal;

- ✓ O equipamento microADV conjugado ao programa desenvolvido *VelDigital3D* mostrou-se como uma ferramenta poderosa para a avaliação tridimensional do escoamento;
- ✓ As condições de mistura na zona de reação (USMB) foram influenciadas pela geometria da unidade e pela razão de recirculação (p). No caso investigado, a mistura causada por maiores valores de p foi mais evidente para os menores valores de $TAS_{z,r}$ investigados;
- ✓ A alteração das condições de mistura, pH, Al^{+3} e p não alteraram significativamente o $D_{médio}$ (18 a 30 μ m). No entanto, verificou-se em alguns casos, um deslocamento acentuado da fração volumétrica de micro-bolhas podendo incorrer em alteração da eficiência do processo de FAD;
- ✓ A variação das condições de mistura ocasionada pelo aumento da velocidade no interior da zona de reação investigada proporcionou a maior alteração da distribuição volumétrica das micro-bolhas quando comparada as demais situações investigadas;
- ✓ O tamanho dos flocos adequados para o processo dependem de diversos fatores e devem ser determinados caso a caso através de ensaios de laboratório, no entanto verificou-se que flocos muito pequenos sofrem grande interferência do número de bolhas (N_{bo}) traduzidos pelo parâmetro operacional razão de recirculação (p), ao passo que flocos muito grandes podem não atender ao requisito de área superficial mínima para agregação das micro-bolhas;
- ✓ A zona de reação desempenha um papel fundamental no desempenho da FAD operando no modo convencional, verificado através do desempenho da unidade piloto investigada;
- ✓ O valor de β_{td} , do modelo matemático proposto por Reali (1991), foi sensível a condição de desempenho verificada na unidade piloto de FAD apresentando potencial para utilização na concepção de projetos da zona de reação de unidades de FAD convencional;

6.2 RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista considerações feitas nesta tese recomenda-se:

- ✓ Adequar o programa *VelDigital3D* para interpretar arquivos de desenho com extensão DWG;
- ✓ Realizar ensaios visando determinação do gradiente médio de velocidade de mistura no interior da zona de reação, através da utilização do ferramental desenvolvido (sonda microADV conjugada ao programa *VelDigital3D*), visando refinar o valor do parâmetro de entrada no modelo proposto por Reali (1991);

- ✓ Ensaios preliminares identificaram a importância da velocidade “*crossflow*” no desempenho da FAD assim recomenda-se a investigação deste parâmetro utilizando a sonda microADV conjugada ao programa *VelDigital3D*;
- ✓ Realizar estudos visando determinar a distribuição de tamanho de micro-bolhas impelidas para fora do tanque de FAD;
- ✓ Realizar uma bateria maior de ensaios visando seguir com a validação e o aprimoramento do modelo proposto por Reali (1991);
- ✓ Realizar ensaios de análise de sensibilidade do modelo utilizando unidades de flotação por ar dissolvido de alta taxa de aplicação superficial;
- ✓ Recomenda-se a adoção de uma função de distribuição de tamanho de micro-bolhas e flocos para refinamento das variáveis de entrada do modelo proposto por Reali (1991);
- ✓ Realizar ensaios visando investigar os efeitos decorrentes da desuniformidade das partículas no desempenho do processo e, nesse sentido, aconselha-se a utilização do diâmetro de Fractal;
- ✓ Realizar ensaios em escala de laboratório para determinação mais precisa do parâmetro referente a efetividade de choques (β) proposto no modelo desenvolvido por Reali (1991);
- ✓ Com o ferramental desenvolvido para determinação da distribuição de tamanho de partículas (DTP), recomenda-se a realização de ensaios em escala de laboratório visando verificar a influência das condições de floculação (G_f e T_f) no desempenho de processos de separação sólido/líquido através da análise da DTP;
- ✓ Verificar a relação existente entre adoção de maiores valores de tempo de detenção na zona de reação ($td_{z,r}$) e a economia de energia na operação de unidades de FAD, uma vez que os resultados apresentados nesta tese deram um indicativo de que maiores valores de $td_{z,r}$ demandariam menores concentrações de micro-bolhas expressas em termos de p , no entanto o número de ensaios realizados impossibilitou a afirmação segura de tal fato.

REFERÊNCIAS¹

AMATO, T.; EDZWALD, J.K.; TOBIASON, J.E.; DAHLQUIST, J.; HEDBERG, T. DAFRapid®: the integrated approach to dissolved air flotation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE. Flotation in Water and Eastewater Treatment, 4., 2000, Helsinki, Finland. **Proceedings...** Helsinki, Finland: IWA, 2000.

CAMPOS, J.R.; DI BERNARDO, L. **Uso de polimeros naturales en el tratamiento de aguas para abastecimiento**. Cali: Cinara, 1991.

CAMPOS, J.R.; REALI, M.A.P. **Emprego da Flotacao por Ar Dissolvido no tratamento de águas para abastecimento**. REVISTA DAE, São Paulo-SP, v. 45, n. 142, p. 290-297, 1985.

CAMPOS, J.R.; REALI, M.A.P.; DOMBROSKI, S. A. G.; MARCHETTO, M.; LIMA, M. R.A. Tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAU96, 25., Cidade do México. **Anais digitais do XXV congresso AIDIS/96**. Cidade do México: AIDIS, 1996. 1 CD-ROM.

CASELL, E.A.; KAUFMAN, K.M.; MATIJEVIC, E. The effects of bubble size on microflotation. **Wat. Res.**, v.9, p. 1017-1024, 1975.

CHAHINE, G.L.; KALUMUCK, K.M.; CHENG, J-Y.; FREDERICK, G.S. **Validation of bubble distribution measurements of the ABS Acoustic Bubble Spectrometer^â with high Speed Video Photography**. Disponível em: <http://www.dynaflow-inc.com/Publication_DW/pdf_documents/sessionA7.004.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2001.

COELHO, E.R.C.; REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. Emprego da flotação por ar dissolvido na clarificação de águas para abastecimento: influência da taxa de aplicação superficial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 16., 1991, Goiânia, GO. **Anais...** Goiânia, GO: ABES, 1991. v. 2, p. 215-231.

CORNET, J.C.; MOISSE, R. Contribution à l'établissement d'un modèle mathématique décrivant le fonctionnement d'un flottateur en traitement des eaux. **La Technique de Léau et de L'assainissement**, n. 428-429, p. 23-30, 1982.

DOMBROSKI, S.A.G. **Influência das condições de floculação na eficiência da flotação por ar dissolvido de alta taxa aplicada ao tratamento de água de abastecimento**. 1996. 199 f. Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

¹ As referências foram normalizadas de acordo com: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

DOMBROSKI, S.A.G.; REALI, M.A.P.; MARCHETTO, M. Método eficiente para o tratamento de água com cor elevada e baixa turbidez: flotação por ar dissolvido. In SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 3., 1996, Gramado, RS. **Anais...** Gramado, RS: ABES/ANDIS, 1996. v.1.

EDZWALD, J.K. Integrating high-rate DAF technology into plant design. **J. AWWA.**, v. 91, n. 12, Dec. 1999.

EDZWALD, J.K. Principles and applications of dissolved air flotation. In: IVES, K.J.; BERNHARDT, H.J. (Eds.). Flotation processes in water and sludge treatment. **Wat. Sci. Tech.**, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 1-23, 1995.

EDZWALD, J.K.; MALLEY, J.P. Laboratory comparison of DAF with convencional treatment. **J. AWWA Res. Tech.**, p. 56-61, Set. 1991a.

EDZWALD, J.K.; WALSH, J.P.; KAMINSKY, G.S.; DUNN, H.J. Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. **J. AWWA Res. Tech.**, p. 92-100, Mar. 1992.

EDZWALD, J.K.; WINGLER, B.J. Chemical and physical aspects of dissolved-air flotation for the removal of algae. **Aqua**, v. 39, p. 24-35, 1990.

EMETS, B.G. Determination of the average size and concentration of air bubbles in water by nuclear magnetic resonance. **Tech. Phys. Lett.**, v. 23, n. 7, p. 513-514, Jul. 1997.

FERGUSON, C.; LOGSDON, G.S.; CURLEY, D. Comparison of dissolved air flotation and direct filtration. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 3-4, p. 113-124, 1995.

FLINT, L.R.; HOWARTH, W.J. The collision efficiency of small particles with spherical air bubbles. **Chem. Eng. Sci.**, v. 26, p. 1155-1168, 1971.

FUKUSHI, K.; TAMBO, N.; MATSUI, Y. A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 3-4, p. 37-47, 1995.

GARCÍA, C.M.; CANTERO, M.I.; NIÑO, Y.; GARCÍA, M.H. **Acoustic Doppler Velocimeters (ADV) Performance Curves (APCs) sampling the flow turbulence**. 2004. Artigo recebido em mensagem eletrônica por <rmoruzzi@sc.usp.br> em 24 mar. 2004.

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J.K. Modelling of floc-bubble aggregate rise rates in dissolved air flotation. **Wat. Sci. Tech.**, v. 43, n. 8, p.175-184, 2001. IWA Publishing.

HAARHOFF, J.; VAN VUUREN, L. **A South Africa design guide for dissolved air flotation**. South Africa: Water Research Commission, 1993. Project. n. 332.

HAARHOFF, J.; VAN VUUREN, L.R.J. Design parameters for dissolved air flotation in South Africa. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 3-4, p. 203-212, 1995.

HAGUE, J.; TA, C.T.; BIGGS, M.J.; SATTARY, J.A. Small scale model for CFD validation in DAF application. **Wat. Sci. Tech.**, v.43, n. 8, p. 167-173, 2001. IWA Publishing.

HAN, M.; KIM, W.; DOCKKO, S. Collision efficiency factor of bubble and particle (η_{bp}) in DAF: theory and experimental verification. **Wat. Sci. Tech.**, v. 43, n. 8, p. 139-144, 2001. IWA Publishing.

HAN, M.Y.; PARK, Y.H.; YU, T.J. Development of a new method of measuring bubble size. **Wat. Suppl.**, v. 2, n. 2, p.77-83, 2002.

HEDBERG, T.; DAHLQUIST, J.; KARLSON, D.; SORMAN, L.O. Development of an air removal system for dissolved air flotation. **Wat. Sci. Tech.**, v. 37, n. 9, p. 81-88, 1998.

HEINANEN, J.; JOKELA, P.; ALA-PEIJARI, T. Use of dissolved air flotation in potable water treatment in Finland. In: IVES, K.J.; BERNHARDT, H.J. (Eds.). Flotation processes in water and sludge treatment. **Wat. Sci. Tech.**, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 225-238, 1995.

KITCHENER, J.A.; GOCHIN, R.J. The mechanism of dissolved air flotation for potable water: basic analysis and a proposal. **Wat. Res.**, v. 15, p. 585-590, 1981.

KIURU, H.J. (2000). Development of dissolved air flotation technology from the 1st generation to the newest or 3rd one (very thick micro-bubble bed) with high flow-rates (DAF in turbulent flow conditions). In: INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND EASTEWATER TREATMENT, 4., 2000, Helsinki, Finland. **Proceedings...** Helsinki, Finland: IWA, 2000. p. 11-14.

KROFTA, M.; WANG, L.K. Potable water treatment by dissolved air flotation and filtration. **J. AWWA Res. Tech.**, v. 74, n. 6, p. 305-310, Jun. 1982.

LAWLER, D. F. Particle size distribution in treatment processes: theory and practice. **Wat. Sci. Tech.**, v. 36, n. 4, p. 15-23, 1997.

LEPPINEN, D.M. A kinetic model on dissolved air flotation including the effects of interparticle forces. **J. Wat. Suppl. Res. Tech. – AQUA**, p.258-268, 2000.

LEPPINEN, D.M.; DALZIEL, S.B. A light attenuation technique for void fraction measurement of microbubbles. **Experiments in Fluids**, v.30, p. 214-220, 2001.

LEPPINEN, D.M.; DALZIEL, S.B.; LINDEN, P.F. Modelling the global efficiency of dissolved air flotation. **Wat. Sci. Tech.**, v. 43, n. 8, p.159-166, 2001. IWA Publishing.

LEPPINEN, D.M.; DALZIEL, S.B.; LINDEN, P.F. The hydraulics of a dissolved air flotation tank. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND EASTEWATER TREATMENT, 4., 2000, Helsinki, Finland. **Proceedings...** Helsinki, Finland: IWA, 2000. p. 11-14.

LIERS, S.; BAEYENS, J.; MOCHTAR, J. Modeling dissolved air flotation. **Wat. Environ. Res.**, v. 68, n. 6, Sep./Oct. 1996.

LOBATO, S.J.M.; REALI, M.A.P.; FAITANIN, L. O sucesso do emprego da flotação por ar dissolvido no pré-tratamento da água bruta da ETA Meaípe-ES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18., 1995, Salvador. **Anais...** Salvador: ABES, 1995. Disco 5-9.

LONGHURST, S. J., GRAHAM, N. J. D. Dissolved air flotation for potable water treatment: a survey of operational units in Great Britain. **Publ. Health Eng.**, v. 14, n. 6, p. 71-76, Apr. 1987.

LUNDEGREN, H. Recent advances in air flotation technology. **Tappi**, v. 53, n. 2, p. 287, 1970.

LUNDH, M.; JÖNSSON, L.; DAHLQUIST, J. Experimental studies of the fluid dynamics in the separation zone in dissolved air flotation. **Wat. Res.**, v. 34, n. 1, p. 21-30, 2000.

LUNDH, M.; JÖNSSON, L.; DAHLQUIST, J. The influence of contact zone configuration on the flow structure in a dissolved air flotation pilot plant. **Wat. Res.**, v. 36, p. 1585-1595, 2002.

MALLEY, J.P.; EDZWALD, J.K. Concepts for dissolved-air flotation treatment of drinking waters. **J. Wat. SRT-Aqua**, v. 40, n. 1, p. 7-17, 1991.

MALLEY, J.P.; EDZWALD, J.K. Concepts of dissolved-air flotation treatment of drinking waters. **J. Wat. SRT-Aqua**, v. 40, n. 1, p. 7-17, 1991b.

MANLEY, D.M.J.P. Change of size of air bubbles in water containing a small dissolved air content. **Brit. J. Appl. Phys.**, v. 11, p. 38-42, Jan. 1960.

MARCHETTO, M. **Estudo de uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de água de abastecimento**. 1996. 179 f. Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MARCHETTO, M.; REALI, M.A.P. Unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de água. **Eng. Arquitetura Cad. Eng. San. Amb.**, São Carlos, v. 2, n. 1, p. 24-31, 2000.

MARCHETTO, M.; REALI, M.A.P. Concepção moderna de unidades de flotação aplicada ao tratamento de água. In: SIMPOSIO INTERNAZIONALE DI INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE, 1997, Ravello, Villa Rufolo. **Proceedings...** Ravello, Villa Rufolo: ABES/ANDIS/AIDIS/ATTI, 1997a. p.758-765.

MARCHETTO, M.; REALI, M.A.P. Influência do ângulo de inclinação das placas no desempenho de uma unidade original de flotação de alta taxa. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Fóz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: ABES, 1997b. v.1.

MARCHIORETTO, M. M.; REALI, M.A.P. Estudo das condições ótimas de coagulação/floculação com sulfato de alumínio visando a flotação de água para abastecimento contendo turbidez elevada e cor moderada. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA - SBPC, 1997, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte, MG: SBPC, 1997. 1 CD-ROM.

MARCHIORETTO, M.M.; REALI, M.A.P. Estudo das condições ótimas de coagulação/floculação com sulfato de alumínio visando a flotação de água para Abastecimento Contendo Turbidez Elevada e Cor Moderada. **Rev. Inic. Cient. USP**, v. 1, n. 1, p. 63-70, 1999.

MARCHIORETTO, M.M.; REALI, M.A.P. Ozonation followed by coagulation/flocculation and flotation as post-treatment of the effluent from an anaerobic baffled reactor treating domestic sewage. In: INTERNATIONAL CONFERENCE. FLOTATION IN WATER AND WASTE WATER TREATMENT, 4., 2000, Helsinki. **Proceedings...** Helsinki: IWA, 2000. v. 1, p. 1-9.

MARCHIORETTO, M.M.; REALI, M.A.P. Ozonation followed by coagulation/flocculation and flotation as post-treatment of the effluent from an anaerobic baffled reactor treating domestic sewage. **Wat. Sci. Tech.**, London,UK, v. 43, n. 8, p. 99-106, 2001.

MATSUI, Y.; FUKUSHI, K.; TAMBO, N. Modeling, simulation and operational parameters of dissolved air flotation. **J. Wat. SRT-Aqua**, v. 47, n. 1, p. 9-20, 1998.

MELO, M.V.; PEREIRA JR; MASSARANI, G. Tratamento de águas oleosas por flotação. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (ENEMP), 28., 2000, Teresópolis. **Anais...** Teresópolis, RJ: UFRJ, 2000.

MIYAHARA, T.; KASENO, S.; TAKAHASHI, T. Studies on chains of bubbles rising through quiescent liquid. **Can. J. Chem. Eng.**, v. 62, p.186-193, Apr. 1984.

MORETTI, R.C. **Processo de Flotação por Ar Dissolvido aplicado à clarificação final do efluente de sistema seqüencial de tratamento biológico de esgoto sanitário constituído de reator anaeróbio (UASB) seguido de lagoa aerada.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MORUZZI, R.; REALI, M.A.P.R.; PATRIZZI, L.J. A different view of removing iron and manganese complexes by using dissolved air flotation. In: STUETZ, R.; LENS, P. (Eds.). **Young reearchs 2004**. London: IWA, 2004a. p. 259-266.

MORUZZI, R.; REALI, M.A.P.R.; PATRIZZI, L.J. Organic iron compounds removal in natural water by using coagulation with ferric chloride and dissolved air flotation associated with chemical oxidation. In: IWA LEADING-EDGE CONFERENCE ON

WATER AND WASTEWATER TREATMENT, 2., 2004, Prague, Czech Republic. **Abstracts...** London, United Kingdom: IWA, 2004b. p. 71-72.

MORUZZI, R.B.; PATRIZZI, L.J.; REALI, M.A.P. Remoção de ferro e manganês complexados com ácido húmico presentes em águas para abastecimento utilizando a flotação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa, Paraíba. **Anais digitais do XXI congresso ABES**. João Pessoa, PB: ABES, 2001. p.1-10, 1CD-ROM.

NICKOLS, D.; SCHNEIDER, O.D.; LEGGIERO, S. Pilot-testing of high rate DAF for New York City. In: INTERNATIONAL CONFERENCE. FLOTATION IN WATER AND EASTEWATER TREATMENT, 4., 2000, Helsinki, Finland. **Proceedings...** Helsinki, Finland: IWA, 2000.

OFFRINGA, G. Dissolved air flotation in Southern Africa. In: IVES, K. J.; BERNHARDT, H.J. (Eds.). Flotation processes in water and sludge treatment. **Wat. Sci. Tech.**, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 159-172, 1995.

PATRIZZI, L.J. **Remoção de ferro, manganês e substâncias húmicas de água para abastecimento, com uso de flotação por ar dissolvido de alta taxa e oxidação química**. 2002. 220 f. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PATRIZZI, L.J.; REALI, M.A.P.; CORDEIRO, J.S. Redução de Volume de Lodo Gerado em Decantadores de ETAs utilizando Espessamento por Flotação e Por Gravidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL, 19., 1999, Rio de Janeiro. **ABES Rio 99: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

PENETRA, R.G.; REALI, M.A.P.; FORESTI, E.; CAMPOS, J.R. Post- Treatment of Effluents From Anaerobic Reactor Treating Domestic Sewage By Dissolved Air Flotation. **Wat. Sci. and Tech.**, Great Britain, v. 40, n. 8, p. 137-143, 1999.

PENETRA, R.G.; REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. Influência da Quantidade de Ar Fornecida no Pós- Tratamento por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios UASB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. **ABES Rio 99: XX Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

PENETRA, R.G.; REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R.; FORESTI, E. Post-treatment of Effluents From Anaerobic Reactor Treating Domestic Sewage by Dissolved Air Flotation. In: TALLER Y SEMINARIO LATINOAMERICANO: TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES, 5., 1998, Vilia Dei Mar, Chile. **Anais eletronicos** : Fifth Latin-american Workshop-Seminar-IAWQ. Vilia Dei Mar: IAWQ, 1998.

PORTO, T.G. **Tratamento avançado de esgoto sanitário em sistema sequencial - composto por processo biológico anaeróbio, flotação, filtração em areia e em membranas**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PRABHUKUMAR, S.; DURAISWAMI, R.; CHAHINE, G.L. Acoustic measurement of bubble size distributions: theory & experiments. In: ASME. **Proceedings of the fluids engineering division summer meeting**. [S.l.: s.n.], 1996. v. 1, p. 509- 514 .

Pratt, W.K. **Digital Image Processing**. 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1991.

REALI, M. A. P. **Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento**. São Carlos. 1984. 186 F., Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

REALI, M. A. P. **Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante**. 1991. 373 f. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991. 2 v.

REALI, M.A.P. PATRIZZI, L.J.; CORDEIRO, J.S. Comparison of thickening os sludges from two water treatment plants using DAF and gravity. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER TREATMENT, 4., 2000, Helsink. **Proceedings...** Helsink: IWA, 2000. v.1, p.1-9.

REALI, M.A.P. Proposição de um modelo teórico para o processo de flotação por ar dissolvido. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 24., 1994. Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires, Argentina: AIDIS.

REALI, M.A.P. Proposição de uma equacao teorica para o processo de flotacao por ar dissolvido. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y L. AMBIENT AL-AIDIS, 24.,1994, Buenos Aires. **Anais magnéticos...** BUENOS AIRES, ARGENTINA: AIDIS, 1994. v. 1.

REALI, M.A.P. **Proposição e Avaliação de uma Unidade de Flotação por Ar Dissolvido com Escoamento Laminar Aplicada ao Tratamento de Água de Abatecimento**. Processo FAPESP nº 93/2707-9. Auxílio à realização da pesquisa concedido pela FAPESP.

REALI, M.A.P.; BRAGA, G.A. Emprego da Flotação Por Ar Dissolvido No Tratamento de Efluentes da Indústria Cítrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18., 1995, Salvador. **Anais Eletrônicos...** Salvador,BA: ABES, 1995. CD-ROM.

REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. Emprego de flotacao por ar dissolvido na clarificacao de águas para abastecimento - parte 11. **Bol. Hidr. San.**, São Carlos, v. 1, n. 5, p. 1-51, 1985.

REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. Optimization of color removal using a batch flotation test. In: WORLDWIDE SYMPOSIUM. POLLUTION IN LARGE CITIES: science and technology for planning environmental quality, 2., 1995, Venice. **Proceedings...** Venice: OMS/OPS/SIBESA/ABES/ANDIS, 1995. p. 199-210.

REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. Optimization of colour removal using a batch flotation test. In: WORLD WIDE SYMPOSIUM: POLLUTION IN LARGE CITIES-SCIENCE AND TECHN. FOR PLANNING ENVIRONMENTAL QUALITY, 1995, Pádua. **Proceedings...** Venice, Itália: ABES/ANDES, 1995. v. 1, p. 199-210.

REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. Projeto de câmaras de saturacao de sistemas de flotacao por ar dissolvido com recheios de anéis de PVC. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL-AIDIS, 17., 1992, La Habana. **Anais...** Havana, Cuba: AIDIS, 1992. v. 11, p. 283-296.

REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. Projeto de câmaras de saturação de sistemas de flotação por ar dissolvido, com recheio de pvc.. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 23., 1992, La Habana, Cuba. **Anais...** La Habana, Cuba: AIDIS, 1992. v. 2, parte 1, p. 283-296.

REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R. Proposição e avaliação de um sistema compacto para tratamento de água utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 1993, Natal, RN. **Anais...** Natal, RN: ABES, 1993. v. 2, p. 243-264.

REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R.; PENETRA, R. G. Sewage treatment by anaerobic biological process associated with dissolved air flotation. **Wat. Sci. Tech.**, London, v. 43, n. 8, p. 91-98, 2001.

REALI, M.A.P.; CAMPOS, J.R.; PENETRA, R.G. Sewage treatment by anaerobic biological process associated with dissolved air flotation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE : FLOTATION IN WATER AND WASTE WATER TREATMENT, 4., 2000, Helsinki. **Proceedings...** Helsinki: IWA, 2000. v. 1, p. 1-9.

REALI, M.A.P.; CORDEIRO, J.S.; PATRIZZI, L. J. Proposição de método para ensaios de remoção de água de lodos por centrifugação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: ABES, 1999.

REALI, M.A.P.; DOMBROSKI, S. A. G. Influência da floculação na flotação por ar dissolvido. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, 25., 1996, Cidade do México. **Anais...** Cidade do México: AIDIS, 1996. CD-ROM.

REALI, M.A.P.; GIANOTTI, E.P. Remocao de algas por flotacao: testes de laboratorio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL, 17., 1993, Natal,RN. **Anais...** Natal, RN: ABES, 1993. v. 2, p. 229-242.

REALI, M.A.P.; LIMA, M. R. A. Empleo de la flotacion con aire dissuelto en el tratamiento de las águas residuales de una industria de papel con proposito de recuperacion de fibras. In: CONFERENCE ON BENEFICIAL REUSE OF WA TER AND BIOSOLIDS, 1997, Marbella. **Proceedings...** Marbella, Spain: WEF, 1997. v. 1, p. 7-59.

REALI, M.A.P.; MARCHETTO, M. High-rate dissolved air flotation for water treatment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND WASTEWATER TREATMENT, 4., 2000, Helsinki, Finland. **Proceedings...** Helsinki, Finland: IWA, 2000. v.1, p. 1-9.

REALI, M.A.P.; MARCHETTO, M. High-rate dissolved air flotation for water treatment. **Wat. Sci. Tech.**, London, v. 43, n. 8, p. 43-50, 2001.

REALI, M.A.P.; MARCHETTO, M. Unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de água. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 25., México. **Anais...** México: AIDIS, 1996.

REALI, M.A.P.; MARCHETTO, M. Unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de água. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 25., 1996, Cidade do México. **Anais magnéticos...** Cidade do México: AIDIS, 1996. v. 1.

REALI, M.A.P.; MORUZZI, R.B.; PATRIZZI, L.J. Flotação por ar dissolvido aplicada na clarificação de águas que apresentam picos de turbidez. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville, SC. **Anais...** Joinville, SC: ABES, 2003.

REALI, M.A.P.; PENETRA, R.G.; CAMPOS, J.R. Influência da floculação na flotação de efluentes de reatores anaeróbios. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 26., 1998, Lima, Peru. **Anais digitais...** Lima- Peru: Asociación Peruana de Ingenieria Sanitaria, 1998.

REALI, M.A.P.; PENETRA, R.G.; CARVALHO, M. E. Flotation technique with coagulant and polymer application applied to the post treatment of effluents from anaerobic reactor treating sewage. In: LATIN-AMERICAN WORKSHOP AND SEMINAR ON ANAEROBIC DIGESTION, 6., 2000, Recife. **Proceedings...** Recife, PE: Ed. Univ. UFPE, 2000. v. 1, p. 306-313. .

REALI, M.A.P.; PENETRA, R.G.; CARVALHO, M.E. Flotation technique with coagulant and polymer application applied to the post-treatment of effluents from anaerobic reactor treating domestic sewage. **Wat. Sci. Tech.**, London, v. 44, n. 4, 2001.

REALI, M.A.P.; SANTOS, S.P. dos. Flotação por ar dissolvido em escala piloto com escoamento vertical entre placas para remoção de algas em águas de abastecimento. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 25., 1996, Cidade do México. **Anais digitais...** Cidade do México: AIDIS, 1996. v. 1.

REALI, M.A.P.; SANTOS, S.P. Emprego de uma unidade de flotação de alta taxa com escoamento vertical para remoção de algas de águas para abastecimento. **Cad. Eng. San. Amb.**, v.1, n.1, jan./mar. 1999.

REALI, M.A.P.; SANTOS, S.P. Emprego de uma unidade de flotação de alta taxa com escoamento vertical para remoção de algas de águas para abastecimento. **Cad. Eng. San. Amb.**, São Carlos, v. 1, n. 1, p. 37-45, 1999.

REALI, M.A.P.; SARTORI, L. The use of polymer as flotation aid in water treatment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND WASTE WATER TREATMENT, 4., 2000, Helsinki. **Proceedings...** Helsinki: IWA, 2000. v. 1, p. 1-9.

REALI, M.A.P.; SARTORI, L. Utilização de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação na flotação. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 26., 1998, Lima, Peru. **Anais digitais...** Lima, Peru: Asociación Peruana de Ingeniería Sanitaria, 1998.

REALI, M.A.P.; SARTORI, L. Utilização de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação na flotação. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26., 1998. Lima, Peru. **Anais...** Lima, Peru: ABES, 1998.

REAY, D.; RATCLIFF, G.A. Removal of fine particles from water by dispersed air flotation: effects of bubble size and particle size on collection efficiency. **Can. J. Chem. Eng.**, v.51, p. 178-185, April 1973.

REES, A.J.; RODMAN, D.J.; ZABEL, T.F. **Water clarification by flotation - 5.** Medmenham, UK: Water Research Centre, 1979. TR 114.

RICHTER, C.A.; GROSS, F. Dissolved air flotation in Latin America. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND EASTSEWATER TREATMENT, 4., 2000, Helsinki, Finland. **Proceedings...**Helsinki, Finland: IWA, 2000. v.1, p. 1-9.

RIJK, S.E.; VAN DEER GRAAF, J.H.J.M.; BLANKEM, J.G. Bubble size in flotation thickening. **Wat. Res.**, v.28, n. 2, p. 465-473, 1994.

RODRIGUES, R.T.; RUBIO, J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. **Minerals Eng.**, v. 16, p. 757-765, 2003.

RYKAART, E.M.; HAARHOFF, J. Behaviour of air injection nozzels in dissolved air flotation. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 3-4, p. 25-35, 1995.

SANTOS, H.R.; PRADO, G.S.do; VIDAL, C.M.S.; MORUZZI, R.B.; CAMPOS, J.R. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.9, n.4, p. 291-300 – out/dez 2004.

SANTOS, S.P. **Estudo de uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento vertical entre placas, aplicada à remoção de algas em águas de abastecimento.** 1997. 111 f. Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

SANTOS, S.P.; REALI, M.A.P. Emprego de uma unidade de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório para remoção de algas em águas de abastecimento. In: SIMPOSIO ITALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL, 3., 1996, Gramado, RS. **Anais magnéticos...** Gramado, RS: ABES, 1996. v. 1.

SARTORI, L. **Influência do uso de polímeros sintéticos no desempenho da FAD aplicada ao tratamento de água para abastecimento.** 1998. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

SARTORI, L.; REALI, M.A.P. Diminuição da dosagem de coagulante primário através da aplicação de polímeros sintéticos na flotação de águas para abastecimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: ABES, 1999.

SCHNEIDER, D.O. et al. Dissolved air flotation and polyaluminium chloride - an effective economical combination. In: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION ANUAL CONFERENCE, WATER RESEARCH FOR THE NEW DECADE, 1991, Philadelphia, EUA. **Proceedings...** Philadelphia, EUA: IWWA, 1991. p. 367-383.

SCHOFIELD, T. Dissolved air flotation in drinking water production. **Wat. Sci. Tech.**, v.43, n.8, p.9-18, 2000.

SHAWWA, A.R.; SMITH, D.W. Dissolved air flotation model for drinking water treatment. **Can. J. Civ. Eng.**, v. 27, p. 373-382, 2000.

SHAWWA, A.R.; SMITH, D.W. Hidrodinamic characterization in dissolved air flotation (DAF) contact zone. **Wat. Sci. Tech.**, v. 38, n. 6, p. 245-252, 1998.

TA, C.T.; BECKLEY, J.; EADES, A. A multiphase CDF model of DAF process. **Wat. Sci. Tech.**, v.43, n.8, p. 153-157, 2001.

TAKAHASHI, T.; MIYAHARA, T.; MOCHIZUKI, H. Fundamental study of bubble formation in dissolved air pressure flotation. **J. Chem. Eng. Japan**, v. 12, n. 4, p. 275-280, 1979.

VALADE, M.T.; EDZWALD, J.K.; TOBIASON, J.E.; DAHLQUIST, J.; HEDBERG, T.; AMATO, T. Particle Removal by flotation and filtration: pretreatment effects. **J. AWWA.**, p. 35-47, Dec. 1996.

VAN PUFFELEN, J.; BUIJS, P.J.; NUHN, P.N.A.M.; HIJNEN, W.A. M. Dissolved air flotation in potable water treatment: the Dutch experience. In: IVES, K. J.; BERNHARDT, H. J. (Eds.). Flotation processes in water and sludge treatment. **Wat. Sci. Tech.**, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 149-157, 1995.

YANG, C.; DABROS, T.; LI, D.; CZARNECKI, J.; MASLIYAH, J.H. A visualizing method for study of micron bubble attachment onto a solid under varying physicochemical conditions. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 39, p. 4949-4955, 2000.

YAO, K. M.; HABIBIAN, M.T.; O'MELIA, C. R. Water and wastewater filtration: concepts and applications. **Envir. Sci. Tech.**, n. 5, p. 1105-1112, 1971.

ZABEL, T. The advantages of dissolved-air flotation for water treatment. **J. AWWA**, p. 42 - 46, May. 1985. Management and Operations.

ENSAIOS DE FLOTAÇÃO EM ESCALA DE LABORATÓRIO

Resumo do Apêndice

Este apêndice apresenta os resultados dos ensaios em escala de laboratório. Foram investigados alguns parâmetros para aplicação nos ensaios em escala piloto. Investigaram-se os seguintes parâmetros:

1. tipo de coagulante;
2. dosagem, condição de mistura e recirculação (p);
3. duas condições de floculação com resultados de eficiência semelhantes.

Os resultados apontaram para a utilização do sulfato de alumínio na dosagem de 25 mg/l em valor de pH em torno de 6,25 e recirculação de 8% (v/v). As duas condições de floculação obtidas foram: gradiente médio de velocidade (G_f) de 50 e 90 s^{-1} para tempo de floculação (T_f) de 8 minutos.

Objetivo específico do apêndice: Escolher o coagulante, as condições adequadas de coagulação (pH versus dosagem coagulante), as condições de floculação (G_f e T_f) e a quantidade de ar requerida para aplicação na instalação piloto.

Descrição da instalação

A influência das condições de coagulação e floculação na eficiência do processo de FAD já foi amplamente discutida em diversos trabalhos (ZABEL, 1985; LONGHURST; GRAHAM, 1987; EDZWALD; WINGLER, 1990; EDZWALD et al., 1992; REALI; CAMPOS, 1995, entre outros). As condições adequadas obtidas em equipamentos de jarteste não representam as melhores condições para a FAD (REALI; CAMPOS, 1995). A dosagem, o tipo de produto químico e as condições de mistura estão intimamente ligados às características da água de estudo e, por isso, não podem ser generalizadas. Assim, para ensaios visando obtenção de parâmetros para a FAD o equipamento denominado Flotatest deve ser utilizado (REALI; DOMBROSKI, 1996).

A instalação de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) em escala de laboratório (Flotatest), é constituída de quatro colunas de floculação/flotação independentes, (capacidade de 2,1 litros) graduadas com escala em mm, conforme apresentado na Figura 4.2. Essas colunas encontram-se interligadas a uma única câmara de saturação (pressurizada) e operam em regime de fluxo descontínuo (alimentação por batelada). Após a mistura rápida do coagulante, completam-se os jarros com o volume desejado de amostra de água coagulada, aciona-se o agitador para que seja iniciada a etapa de floculação. Cada câmara de floculação/flotação possui agitador próprio, que está conectado a um regulador de tensão para controle de rotação das pás giratórias, possibilitando o controle do gradiente médio de velocidade durante a floculação.

Terminado o período de floculação, abrem-se as válvulas que controlam a entrada do volume de água saturada (recirculação pressurizada) proveniente da câmara de

saturação, promovendo-se a colisão das micro-bolhas de ar com os flocos em suspensão e subsequente remoção.

A coleta de amostras da câmara de flotação é realizada com o auxílio de pinças dispostas em pontos situados em posições adequadas ao cálculo das curvas de distribuição de velocidades de flotação (Curvas de Flotação) conforme metodologia proposta por Reali (1991b). A Figura A1, a seguir, apresenta uma fotografia geral e um desenho esquemático da referida instalação.

Figura A1 - Fotografia e esquema geral do equipamento de floculação/flotação em escala de laboratório (flotatest).

Questões específicas deste apêndice

Conforme colocado nos objetivos, nos ensaios de laboratório buscou-se verificar quais as melhores condições de coagulação, floculação e quantidade de ar requerida para aplicação na unidade piloto.

As características dos flocos formados nas etapas de coagulação e floculação determinam, juntamente com as características das micro-bolhas e as condições hidrodinâmicas, a eficiência do processo de FAD. No entanto, existe uma contundente contradição no que diz respeito ao tamanho ideal dos flocos para a remoção por FAD. Enquanto para Malley e Edzwald (1991b) flocos pequenos (da ordem de 10 a 100 micra) são recomendados, para Reali (1991b) e Fukushi, Tambo e Matsui (1995) quanto maior o floco formado, maior a eficiência do processo, uma vez que a probabilidade de choque aumenta consideravelmente conforme aumenta o tamanho médio dos flocos (considerando a mesma quantidade de bolhas dispersas). Assim, para efeito de comparação, foi importante a obtenção de dois valores de gradientes médios de velocidade de floculação (G_f) e tempo de floculação (T_f) que produzissem eficiências de remoção de cor e turbidez semelhantes, mantendo-se constantes as condições de geração e despressurização das micro-bolhas. O motivo para tal foi a obtenção de duas condições diferentes de distribuição de tamanho de flocos permitindo a análise do modelo proposto por Reali (1991b). Todavia, a análise de distribuição de tamanho de flocos não foi realizada nos ensaios de laboratório. Como parâmetro utilizou-se o *número de Camp* definido como o produto $G_f \times T_f$ por Camp e Stein (1943).

Assim, as questões que nortearam os ensaios de laboratório foram:

- 1- Qual o coagulante mais adequado?
- 2- Qual a condição de coagulação mais favorável à remoção da cor e turbidez da água de estudo?
- 3- Quais são as duas condições de floculação (Gf e Tf) que produzem remoções de cor e turbidez semelhantes?

Metodologia específica deste apêndice

Os ensaios foram divididos em três fases denominados séries de investigação. Na primeira série (série I) foram realizados ensaios visando adequação das condições de coagulação. Posteriormente, foram realizados ensaios visando adequação das condições de floculação (série II). Finalmente, foram realizados os ensaios visando ajuste da porcentagem de água saturada (série III). Assim, para cada coagulante investigado (cloreto férrico e sulfato de alumínio) foram realizados os ensaios referentes as três séries anteriormente descritas.

Para uma melhor visualização da grade de ensaios realizados foram construídos os fluxogramas apresentados nas Figuras A2, A3, A4 e A5 .

Água de estudo

Na água proveniente do poço profundo que abastece o campus da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), foi acrescentado ácido húmico comercial (marca Aldrich) e caulinita (marca Fluka) de modo a se obter características de cor aparente em torno de 50 uC (5mg/L de ácido húmico) e turbidez em torno de 5 uT. As demais características da água de estudo são apresentadas na Tabela 1. A água foi preparada sempre um dia antes da realização dos ensaios e acondicionada em galões de 200 litros.

Quanto aos coagulantes utilizados, julgou-se conveniente a utilização de produtos comerciais. Esta escolha adveio da necessidade de reprodução dos resultados dos ensaios em escala de laboratório para a unidade piloto. Como as vazões envolvidas na instalação em escoamento contínuo são muito maiores, os custos para a aquisição dos produtos químicos analíticos inviabilizariam a realização dos ensaios. Sendo assim, foram consultados alguns fabricantes e analisados: qualidades do produto, custos e distância para frete. O produto que atendeu melhor a estas exigências foi o fabricado pela Base Química, com sede em Ribeirão Preto.

Caracterização da água de estudo

Conforme exposto, a água de estudo foi preparada a partir da água proveniente do poço que abastece o campus da Escola de Engenharia de São Carlos coletada antes da adição do cloro. À água do poço foi adicionado caulinita marca FLUKA de acordo com metodologia proposta por Campos (1991) e ácido húmico marca ALDRICH. A Tabela A1 apresenta os resultados dos exames e análises físico-químicas que visaram caracterizar a água utilizada na pesquisa.

Tabela A1 - Características da água preparada para os ensaios.

pH	6,50
Temperatura (°C)	24,0
Turbidez (uT)	5
Cor Aparente (uC)	52
Cor Verdadeira (uC)	10
Alcalinidade (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	24
Dureza (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	15
Condutividade (µS/cm)	28
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	0
Sólidos Totais (ST) (mg/L)	150
Sólidos Fixos (SF) (mg/L)	72
Sólidos Voláteis (SV) (mg/L)	78
Sólidos Suspensos Totais (SST) (mg/L)	2,22
Sólidos Suspensos Fixos (SSF) (mg/L)	0,96
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) (mg/L)	1,26
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) (mg/L)	147,78
Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF) (mg/L)	71,04
Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV) (mg/L)	76,74
Distribuição de tamanho das partículas	----
Absorbância a 254nm	0,060

Ensaio Visando a Otimização da Dosagem de Coagulante e pH de Coagulação

Nessa fase de investigação (série I) foram investigadas diferentes dosagens de coagulante para diferentes valores de pH de coagulação. Foram investigados dois coagulantes: sulfato de alumínio (pó) e cloreto férrico (líquido), da marca Base Química, disponíveis no mercado. As dosagens de sulfato de alumínio investigadas foram: : 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 mg/l para valores de pH de coagulação entre 6,0 e 7,5. Para o cloreto férrico foram investigadas as seguintes dosagens: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 45mg/l para valores de pH de coagulação entre 5,0 e 7,1.

Os demais parâmetros operacionais foram mantidos fixos, sendo estes: $T_{mr}(s)$, $G_{mr}(s^{-1})$, $T_f (min)$, $G_f (s^{-1})$, $P (KPa)$, $R (%)$, $V_{f1} (cm/min)$, $V_{f2} (cm/min)$, $V_{f3} (cm/min)$, $V_{f4} (cm/min)$ e $V_{f5} (cm/min)$, assim como a qualidade da água bruta.

Figura A2: Fluxograma esquemático dos ensaios de adequação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação (série I).

Figura A3: Fluxograma esquemático dos ensaios de adequação da dosagem de cloreto férrico e pH de coagulação (série I).

Curvas de Flotação

As curvas de flotação foram construídas a partir dos resultados de eficiência de remoção de cor aparente e turbidez obtidos utilizando a metodologia proposta por REALI (1991). Com os valores de dosagem de coagulante e $pH_{\text{coagulação}}$ foi produzida uma curva com cinco pontos referentes as cinco velocidades de flotação (V_f) investigadas. As curvas de flotação permitem avaliar a velocidade ascensional dos flocos formados em diferentes condições de coagulação/floculação. Assim quanto maior a velocidade de flotação, maior poderá ser a Taxa de Aplicação Superficial (TAS) em uma unidade de flotação, para uma determinada eficiência de remoção.

Ensaio Visando a Otimização do Tempo e do Gradiente médio de Floculação

Para estes ensaios (série II) foram variados o tempo (T_f) e o gradiente médio de velocidade de floculação (G_f). Inicialmente, foram variados os gradientes médios de velocidade para a floculação (G_f) de: 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 s^{-1} . De posse do melhor resultado foi variado o tempo de floculação (T_f) de: 5, 8, 10, 15 e 20 minutos.

Figura A4: Fluxograma esquemático dos ensaios que envolveram a adequação das condições de floculação (série II) para cada coagulante investigado.

Ensaios Visando a Otimização da Quantidade de Ar Fornecida

De posse dos resultados dos resultados anteriores, foram realizados os ensaios de adequação da quantidade de ar fornecida (série III). A variação da quantidade de ar fornecida para a flotação (S_p) foi produzida pela variação da taxa de recirculação (R), medida em percentual do volume de água contida no jarro de flotação. Foram investigados utilizados valores de taxa de recirculação correspondentes a: $R = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15$ e 20% . Nesses ensaios foram mantidos constantes os seguintes parâmetros: T_{mr} (s), G_{mr} (s^{-1}), T_f (min), G_f (s^{-1}), P (KPa), V_{f1} (cm/min), V_{f2} (cm/min), V_{f3} (cm/min), V_{f4} (cm/min), V_{f5} (cm/min).

Figura A5: Fluxograma dos ensaios que envolveram a adequação da quantidade de ar fornecida (série III) para cada coagulante investigado.

Resultados e Discussões Específicas deste Apêndice

Resultados dos ensaios, em escala de laboratório, que envolveram a utilização do sulfato de alumínio como coagulante.

A seguir são apresentados e discutidos os resultados que envolveram a adequação da dosagem do coagulante sulfato de alumínio, o pH de coagulação (série I), as condições de mistura (Gf e Tf) referentes aos ensaios da série II, assim como a porcentagem de recirculação (R%) visando a FAD (série III). Para tal foi utilizado o sulfato de alumínio em pó, isento de ferro, comercial marca Base Química cujas características são apresentadas na Tabela A2.

Tabela A2 - Características do produto químico comercial (sulfato de alumínio) utilizado nos ensaios. Dados fornecidos pelo fabricante.

Elementos	Resultado
Insolúveis	0,49%
Alumina	17,03%
Ferro	<0,0006%
Ácido Livre	0,00%
Alumina Livre	0,38%
Densidade	-----
Umidade	24,62%
Concentração	-----
pH a 5%	3,3
Arsênio	Não detectável

Resultados dos ensaios de adequação da dosagem de coagulante (sulfato de alumínio) e pH de coagulação

As curvas de flotação a seguir apresentam os resultados dos ensaios de adequação da dosagem de coagulante e pH de coagulação visando a FAD. Para cada dosagem de sulfato de alumínio nos diferentes valores de pH e velocidades de flotação investigadas, são apresentados os residuais de cor (Figura A6) e turbidez (Figura 7) para as diferentes condições de coagulação/flotação investigadas. É importante constatar que os valores ora apresentados referem-se à dosagem do coagulante comercial sendo, portanto menores, os valores das dosagens quando forem efetuadas as devidas correções para obtenção das dosagens de sulfato de alumínio em base seca.

Figura A6: Curvas de flotação para cor aparente residual referentes aos ensaios de adequação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação (série I).

Figura A7: Curvas de flotação para turbidez residual referentes aos ensaios de adequação da dosagem de sulfato de alumínio e pH de coagulação (série I).

Nas figuras A6 e A7 apresentadas, pode-se observar que, para algumas dosagens de coagulante e valores de pH de coagulação, os valores residuais dos parâmetros monitorados apresentam-se com grande variação frente as diferentes velocidades estudadas enquanto que, para outras, os valores residuais apresentam-se praticamente constantes. Este fator se deve, principalmente, pela adequação do pré-tratamento às condições de flotação representadas pelas cargas superficiais, número e distribuição de tamanho das bolhas. Em uma unidade em escoamento contínuo, além dessas condições, teríamos a influência das condições hidrodinâmicas responsáveis, não somente, pela promoção dos choques entre bolhas e flocos e aglutinação das micro-bolhas, mas também, pela desagregação do conjunto bolhas/flocos e arraste provocado por linhas de correntes superiores às velocidades ascensionais envolvidas.

A análise dos resultados, apresentados nas Figuras A6 e A7, permite constatar que a dosagem de sulfato de alumínio de 25 mg/L em valor de pH de 6,25 apresentou os menores valores de cor aparente e turbidez residuais. Sendo assim, estes valores foram adotados nos ensaios posteriores que envolveram a adequação das condições de mistura (Gf e Tf) e recirculação de água saturada (R%).

Resultados dos ensaios de adequação do gradiente médio de velocidade (G_f) e tempo de floculação (T_f)

Para a dosagem de sulfato de alumínio e valor de pH adequados na fase anterior de estudo (25 mg/L e pH de 6,25, respectivamente), foram variadas às condições de floculação (G_f e T_f) e mantidos fixos os demais parâmetros: $R=10\%$, $Psat.$ relativa 450KPa e condições de mistura rápida (G_{mr} e T_{mr}). Primeiramente, foram variados os valores dos gradientes médios de velocidade (50, 60, 70, 80, 90 e 100 s^{-1}) tendo fixado o tempo de floculação de 15 minutos para as diferentes velocidades de flotação investigadas.

A Figura 8 apresenta os resultados de cor aparente e turbidez residuais para os ensaios de adequação das condições de mistura onde foram variados diversos valores de gradientes médios de velocidade para o tempo de floculação de 15 minutos.

Figura A8: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de floculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de floculação de 15 minutos. (série II)

A Figura A8 permite visualizar que os resultados obtidos com o gradiente médio de velocidade de 90s⁻¹ apresentaram o melhor conjunto de resultados para as diferentes velocidades de flotação investigadas. Nota-se que, mesmo para a maior velocidade investigada (25 cm/min), os residuais de cor aparente e, principalmente, de turbidez residual foi menor para o gradiente médio de velocidade de 90 s⁻¹.

Assim, procederam-se os ensaios visando investigação do tempo de floculação para o gradiente médio de velocidade de 90 s⁻¹. A Figura A9 apresenta estes resultados para os tempos de floculação de 5, 8, 10, 15 e 20 minutos.

Figura A9: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos tempos de floculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o gradiente médio de velocidade de 90 s⁻¹ (série II)

De uma forma geral, os resultados referentes ao tempo de floculação de 8 minutos apresentaram o melhor conjunto de resultados para todas as velocidades investigadas, principalmente para a cor aparente residual. Para a turbidez residual, os resultados foram ligeiramente menores para o tempo de floculação de 25 minutos, porém o tempo de 8 minutos apresentou resultados bastante satisfatórios. Sendo assim, o tempo de 8 minutos foi adotado para o prosseguimento dos ensaios referentes à adequação da porcentagem de recirculação.

Resultados dos ensaios de adequação da porcentagem de recirculação de água saturada (R%)

Conforme exposto, a porcentagem de recirculação é controlada pelo volume de água saturada introduzido em cada jarro de flotação. Os resultados apresentados na Figura A10 referem-se à investigação dos seguintes valores de porcentagem de recirculação: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 e 20%. Para tal, foram adotados todos os parâmetros adequados nas séries de investigações anteriores.

Figura A10: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações da porcentagem de recirculação.

Vê-se pela Figura A10 que, a porcentagem de recirculação de 10% apresentou o melhor conjunto de resultados para as diferentes velocidades de flotação investigadas. No entanto, a porcentagem de recirculação de 6% apresentou bons resultados principalmente para cor aparente residual. Devido as diferentes condições dos ensaios em escala de laboratório em relação aos ensaios de escoamento contínuo, principalmente no que se refere a hidrodinâmica responsável pelo choque entre bolhas e flocos, a porcentagem de recirculação deverá ser investigada, também, nos ensaios com a instalação piloto.

Resultados dos ensaios em escala de laboratório que envolveram a utilização do cloreto férrico como coagulante

Da mesma forma que para o sulfato de alumínio, a seguir são apresentados e discutidos os resultados que envolveram a aplicação de cloreto férrico como coagulante para as três séries de investigação de laboratório. Para tal foi utilizado o cloreto férrico líquido comercial marca Base Química cujas características são apresentadas na Tabela A7.

Tabela A7 - Características do produto químico (cloreto férrico) utilizado nos ensaios. Dados fornecidos pelo fabricante.

Características	Resultado
Densidade relativa a 24°C	1,42
%insolúveis	0,001
Acidez	1,06
%FeCl ₃	39,79
%Fe total	13,70
Ferro II (%)	Máx. 2,5
Cor	Marrom escuro
Aspecto	Líquido

Resultados dos ensaios de adequação da dosagem de cloreto férrico e pH de coagulação

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de otimização da dosagem de coagulante e pH de coagulação visando a FAD. Como coagulante foi utilizado o cloreto férrico em solução preparada a 20 g/L e como alcalinizante utilizou-se a cal em solução de 2g/L. Embora não seja recomendada a administração de ácido, em alguns ensaios foi necessária a utilização de solução de ácido sulfúrico a 0,02N para baixar o valor de pH. Este procedimento está previsto somente nos ensaios de laboratório para investigação de baixas dosagens de cloreto férrico.

As dosagens apresentadas referem-se ao produto comercial sendo, portanto, menores as dosagens quando forem efetuadas as correções para a dosagem de cloreto férrico em base seca.

Nas Figuras A11 e A12 são apresentadas as curvas de flotação para cada dosagem de cloreto férrico nos diferentes valores de pH e velocidades de flotação investigadas.

Figura A11: Curvas de flotação para cor aparente residual referentes aos ensaios de adequação da dosagem de cloreto férrico e pH de coagulação (série I).

Figura A12: Curvas de flotação para turbidez residual referentes aos ensaios de adequação da dosagem de cloreto férrico e pH de coagulação (série I).

Pode-se analisar, através das Figuras A11 e A12, que as dosagens de cloreto férrico inferiores a 20 mg/L não apresentaram bons resultados tanto para a cor aparente residual quanto para a turbidez. Para as demais dosagens observam-se bons resultados para valores de pH entre 6,20 e 6,50, sendo que os menores valores de cor aparente e turbidez foram obtidos para a dosagem de 30 mg/L em valores de pH entre 6,00 e 6,40.

Para a dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L em pH de coagulação em torno de 6,00 podem ser observados valores de cor aparente residual menores que 0,05uC e turbidez menor que 0,30uT em todas as velocidades de flotação investigadas. Sendo assim, adotou-se a dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L em pH de coagulação em torno de 6,0 para a realização das etapas subsequentes de investigação (séries II e III).

Resultados dos ensaios de adequação do gradiente médio de velocidade (Gf) e tempo de floculação (Tf)

São apresentados os resultados dos ensaios referentes a série II para a dosagem de cloreto férrico de 30 mg/l em valor de pH em torno de 6,0. Para tal foram variadas às condições de floculação (Gf e Tf) e mantidos fixos os demais parâmetros: $R=10\%$,

Psat. relativa 450KPa e condições de mistura rápida (Gmr e Tmr). Primeiramente, foram variados os valores dos gradientes médios de velocidade (50, 60, 70, 80, 90 e 100 s^{-1}) tendo fixado o tempo de floculação de 15 minutos para as diferentes velocidades de flotação investigadas. Posteriormente foram efetuados os ensaios visando adequação do tempo de floculação.

A Figura A13 apresenta graficamente os resultados dos ensaios referentes a série II para o coagulante cloreto férrico.

Figura A13: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de floculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de floculação de 15 minutos.(série II)

Estudando os melhores gradientes de velocidade para a floculação, notou-se que o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} apresentou o melhor conjunto de resultados para as diferentes velocidades de flotação investigadas. Mesmo para a maior velocidade investigada (25 cm/min), os residuais de cor aparente (05uC) e de turbidez (0,30uT) foram menores obtidos. Assim, procederam-se os ensaios visando investigação do tempo de floculação para o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} . Assim, são apresentados na Figura A14, a seguir, os resultados para os tempos de floculação de 5, 8, 10, 15 e 20 minutos.

Figura A14: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos tempos de floculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o gradiente médio de velocidade de 90 s^{-1} (série II)

Visando adequar o tempo de floculação para o gradiente de 90 s^{-1} , verificou-se que o tempo de floculação de 15 minutos apresentou os menores residuais de cor aparente e turbidez. Mesmo para a maior velocidade de flotação investigada (25 cm/min) os valores de cor aparente e turbidez foram baixos (08 uC e $0,38 \text{ uT}$, respectivamente). Assim, para os ensaios referentes a série III de investigação foi adotado o tempo de floculação de 15 minutos além dos parâmetros obtidos anteriormente ($Gf=90 \text{ s}^{-1}$ e dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L em pH de coagulação de 6,0).

Resultados dos ensaios de adequação da porcentagem de recirculação de água saturada (R%)

Neste item são apresentados os resultados da série III para o coagulante cloreto férrico. Foram mantidos constantes os demais parâmetros adequados nas séries de investigações anteriores ($DCF=30 \text{ mg/L}$ em pH de coagulação de 6,0, $Gf=90 \text{ s}^{-1}$ para $Tf=15$ minutos) e variadas as porcentagens de recirculação em valores equivalentes a: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 e 20%.

A Figura A15 apresenta, graficamente, os residuais de cor aparente e turbidez para os ensaios referentes a série III onde foram investigadas as porcentagens de recirculação para diferentes valores de velocidade de flotação.

Figura A15: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações da porcentagem de recirculação referentes aos ensaios da série III utilizando o cloreto férrico como coagulante.

Pela Figura A15 pode-se observar que, as porcentagens de recirculação de 10% e 12% apresentaram o melhor conjunto de resultados para as diferentes velocidades de flotação investigadas. Porém, a porcentagem de recirculação de 10% apresentou os melhores resultados principalmente para cor aparente residual. No entanto, assim como nos ensaios referentes à série III para o coagulante sulfato de alumínio, valores menores podem ser observados para outras porcentagens de recirculação, como por exemplo 12 e 15% as quais obtiveram os menores residuais de cor aparente (04 e 03 uC , respectivamente para a velocidade de flotação de 08 cm/min).

Ensaio Complementares

O objetivo principal destes ensaios complementares foi investigar a cinética da floculação visando a flotação. Para tal, os tempos de floculação foram cruzados com diversos valores de gradientes de velocidade de floculação nas dosagens e valores de pH adequados. Observou-se que os menores valores de gradientes estudados demandam maiores tempos de floculação e vice-versa para que a remoção dos parâmetros monitorados seja maior que 90%. Para o tempo de floculação em torno de 10 minutos o gradiente de velocidade de floculação mais adequado foi o de 90 s^{-1} (residuais de 4uC e 0,25uT para cor aparente e turbidez, respectivamente). Já para o tempo de 20 minutos o gradiente de velocidade de 70 s^{-1} também apresentou bons resultados (residuais de 2uC e 0,23uT para cor aparente e turbidez, respectivamente).

Estes diferentes valores foram investigados nos ensaios subseqüentes na unidade em escala piloto. Assim, foi possível verificar a influência da distribuição de tamanho das partículas, para a mesma dosagem de sulfato de alumínio, na eficiência do processo de FAD para duas distribuições de tamanhos médios de flocos diferentes. As Figuras A16, A17, A18 e A19 apresentam os resultados complementares de laboratório para as diferentes condições investigadas.

Figura A16: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de floculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de floculação de 5 minutos.(série II)

Figura A17: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de floculação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de floculação de 10 minutos.(série II)

Figura A18: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de flocação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de flocação de 15 minutos.(série II)

Figura A19: Valores de cor aparente e turbidez residuais frente às variações dos gradientes médios de velocidade de flocação e às diferentes velocidades de flotação investigadas para o tempo de flocação de 20 minutos.(série II)

Considerações a respeito da aplicação dos parâmetros nos ensaios em escala piloto.

Os resultados obtidos nos ensaios em escala de laboratório contribuíram para a escolha de alguns parâmetros adotados nos ensaios subseqüentes em escala piloto. No entanto, a aplicação irrestrita de todos os valores obtidos em laboratório não foi possível. Isso se deve ao grande número de variáveis que devem ser controladas para a consecução dos ensaios durante a operação da unidade de FAD em escala piloto. A Tabela A8 apresenta algumas destas variáveis, o modo pelo qual elas foram controladas e a dependência de cada uma com as demais. Os valores adotados para a operação da unidade piloto serão convenientemente apresentados na seção destinada para tal.

Tabela A8 - Variáveis controladas nos ensaios em escala piloto e a dependência com as demais.

Variáveis	Controle	Dependência
(1) Vazão entrada	R.A	-
(2) Razão recirculação (p)	R.A	+ (1)
(3) Pressão saturação (Psat)	R.A	-
(4) Gradiente médio de velocidade de floculação (Gf)	R.T	-
(5) Tempo de floculação (Tf)	C.I	+ (1)
(6) Tempo contato zona reação	Variação volume zona reação	+ (1); (2)
(7) Taxa de aplicação superficial aparente na zona de clarificação (TASap)	Variação volume zona clarificação	+ (1); (2) e (5)
(8) DTP ^a	C.I	+ (4) e (5)
(9) DTMB ^b	-----	+ (2) e (3)

^a Distribuição de tamanho de partículas (flocos)

^b Distribuição de tamanho de micro-bolhas

R.A registro de agulha

R.T regulador de tensão

C.I controlada indiretamente através de outras variáveis

+ variáveis dependentes

- variáveis não dependentes

Conclusões Específicas deste Apêndice

Com base nos resultados obtidos durante os estudos em escala de laboratório, foi possível responder as questões levantadas e dar prosseguimento aos ensaios em escala piloto. Entre as principais conclusões destacam-se:

✓ Como era esperado, a flotação apresentou excelentes resultados no tratamento da água contendo cor aparente de 50 uC e turbidez de 05uT onde os melhores resultados obtiveram eficiência superior a 90% para a cor aparente (residual inferior a 05uC) e superior a 94% para a turbidez (residual inferior a 0,3uT) para os dois coagulantes investigados nas melhores condições de dosagem e pH de coagulação.

✓ A flotação, para a mesma água, realizada com o emprego de sulfato de alumínio como coagulante, apresentou os menores valores de cor aparente e turbidez residuais (correspondentes a 02uC e 0,24uT, respectivamente, para a dosagem de 25 mg/L em pH em torno de 6,5).

✓ A escolha do coagulante de sal de alumínio não ficou restrita a sua maior eficiência. O coagulante foi adotado, pois altera muito menos as condições de visualização necessárias para a realização dos ensaios fotográficos. O cloreto férrico mancha demasiadamente a superfície do acrílico e dificulta a aquisição das imagens.

- ✓ Para os dois coagulantes utilizados, o gradiente de velocidade de floculação de 90 s^{-1} foi mais adequado na remoção da cor aparente e turbidez quando comparado aos demais gradientes investigados.
- ✓ O tempo de floculação mais adequado variou com o coagulante utilizado, sendo que, para o sulfato de alumínio, o tempo de floculação de 8 minutos apresentou o melhor conjunto de resultados enquanto que, para o cloreto férrico, o tempo de floculação que produziu melhores resultados foi o de 15 minutos.
- ✓ Para os ensaios que envolveram a investigação da porcentagem de recirculação (série III), observou-se a necessidade de repetir alguns valores nos ensaios a serem realizados em escoamento contínuo, uma vez que os ensaios em regime de batelada não reproduzem as condições de hidrodinâmicas responsáveis pelo choque entre bolhas e flocos. No entanto foi possível observar que porcentagens de recirculação entre 6 e 12% produziram bons resultados tanto para o cloreto férrico quanto para o sulfato de alumínio.

SISTEMA DE COLETA DE ÁGUA FLOTADA

Resumo do Apêndice

Este apêndice apresenta os resultados dos ensaios visando obtenção de sistema adequado de coleta de água flotada. Foram investigadas duas opções de coleta:

1. Manifold de coleta superior (água verte livremente para o interior do tubo);
2. Manifold de coleta inferior (sistema de coleta afogado).

Os ensaios envolveram a análise visual da distribuição do fluxo com registro fotográfico. O manifold de coleta inferior mostrou-se mais adequado. Assim, foram investigadas diferentes configurações que culminaram na adoção de placa com orifícios.

Objetivo específico do apêndice: Determinar a condição de coleta de água flotada da unidade piloto.

Descrição da Unidade Piloto de FAD convencional e de Alta Taxa construída em acrílico

A instalação piloto de flotação por ar dissolvido (FAD) utilizada nesta pesquisa (1500L/h) é construída em acrílico e constituída de uma unidade de mistura rápida tipo tubular, uma unidade de floculação mecanizada com três compartimentos em série associada a uma unidade de flotação que pode operar tanto do modo convencional quanto do modo de alta taxa. Para tal, é introduzido em seu interior um módulo composto por placas planas paralelas devidamente dispostas de modo a promover escoamento vertical. A Figura 1 apresenta um fluxograma ilustrativo da referida instalação.

A unidade de floculação pode ser usada com uma, duas ou três câmaras em série e os agitadores do sistema de floculação possuem controles de rotação independentes e são do tipo de eixo vertical com paletas paralelas ao eixo. Cada agitador possui quatro braços e duas paletas por braço.

Esta unidade de flotação possui, instalado junto à sua entrada, um dispositivo de despressurização da vazão de recirculação proveniente da câmara de saturação (registro de agulha). A região situada logo à jusante deste ponto é chamada zona de contato. Esta é a região onde ocorre encontro entre os flocos e as micro-bolhas de ar geradas após a despressurização da vazão de recirculação. Após a zona de contato encontra-se a zona de separação ou clarificação, onde ocorre a flotação propriamente dita. No interior da região de clarificação foi instalado um módulo especial contendo placas planas paralelas inclinadas 60° com a horizontal. A inserção de tal módulo proporciona escoamento vertical provavelmente associado a baixos números de *Reynolds*. Acima da zona de flotação, situa-se a região de acumulação de lodo. Os flocos removidos permanecem na superfície da zona de acumulação formando uma camada de lodo.

Parte da água clarificada na unidade de flotação é recalçada para a câmara de saturação por uma bomba centrífuga multi-estágio de alta pressão (Bomba Jacuzzi

60 Hz) e monitorada através de medidor de vazão Enginstrel/Engematic. A câmara de saturação é do tipo com recheio, sendo este constituído de anéis de PVC com diâmetro de 30 mm e comprimento de 20 mm, conforme proposto por Reali e Campos (1992). Na parte superior da câmara é injetado ar comprimido de tal maneira que o recheio fique envolto por ar. Assim, ao passar pelo recheio, a água submetida à alta pressão é saturada com ar.

Figura B1 – Esquema e foto da instalação piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa com módulo. Esquema Fonte: Patrizzi (2002)

Questão específica deste apêndice

A principal questão que orientou a consecução dos ensaios foi:

Qual é a condição de coleta de água flotada que propicia a distribuição de água mais homogênea no interior da zona de clarificação da unidade de FAD?

Neste sentido nenhum trabalho foi encontrado na literatura para contrapor os resultados obtidos. No entanto, observações práticas têm confirmado a utilização de

duas opções: i) sistema de coleta constituído por calhas distribuídas na porção oposta a entrada e, ii) sistema constituído de tubulação perfurada (*Manifold*) distribuída no fundo da zona de clarificação das unidades de FAD.

Metodologia específica deste apêndice

Realizaram-se ensaios alterando-se a taxa de aplicação superficial para cada sistema de coleta de água flotada. Após a definição da melhor alternativa foi variada a recirculação de água pressurizada (p) que fornece micro-bolhas ao sistema de FAD para cada condição operacional (convencional e alta taxa).

Foram investigadas duas posições para os manifolds de coleta: superior e inferior. O manifold superior constituiu-se de um tubo perfurado de comprimento igual a largura da unidade no qual a água flotada vertia livremente para seu interior. Para o manifold inferior foram investigadas duas concepções: tubulação perfurada e placa de orifícios (Figura 2). Os resultados foram analisados qualitativamente por meio de ensaios fotográficos.

Como traçador foram utilizados azul dimetileno e rodamina acrescidos um após a saída do outro para evidenciar a presença de regiões estagnadas no interior do reator.

Os resultados de um conjunto de ensaios são apresentados em figuras dispostas seqüencialmente tendo como início o momento de injeção de traçador. Cada figura refere-se a uma condição investigada onde foram variadas: Taxa de Aplicação Superficial (TAS) e porcentagem de recirculação de água saturada (p).

Figura B2: Fotografia de um dos conjuntos de tubulação perfurada e placa com orifícios investigados para coleta de água na porção inferior da zona de clarificação.

Resultados e Discussão Específicos deste Apêndice

Manifold superior

Para o modo de operação de alta taxa (constituído de modulo lamelar), investigaram-se as taxas de 200, 300, 500 e 700 me.m2.dia.

Os resultados demonstraram que existe um grande desequilíbrio do escoamento na zona de clarificação da unidade. As Figuras 3; 4; 5 e 6 mostram claramente a presença de curtos-circuitos acentuados com o incremento da taxa de aplicação superficial, quando o sistema de coleta de água flotada foi constituído de manifold livre localizado no extremo superior da unidade piloto. Esta informação é de

extrema relevância, pois grande parte das unidades em escala plena utilizam deste tipo de concepção para coleta de água flotada.

Figura B3: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $200\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ e a saída feita através de tubulação perfurada localizada na parte superior da unidade.

Figura B4: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $300\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ e a saída feita através de tubulação perfurada localizada na parte superior da unidade.

Figura B5: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $500\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ e a saída feita através de tubulação perfurada localizada na parte superior da unidade.

Figura B6: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $700\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ e coleta de água flotada feita através de tubulação perfurada localizada na parte superior da unidade.

Em todas as condições investigadas a má condição de distribuição na zona de clarificação foi atribuída ao sistema de coleta de água flotada. Assim, os ensaios subsequentes visaram corrigir o problema alterando-se as configurações e o posicionamento do manifold bem como as dimensões, número e a disposição dos furos que compuseram a área de coleta de água.

Manifold inferior

Tubulação perfurada

Conforme exposto anteriormente, foram investigadas diferentes conformações de manifold(s) afogados para coleta da água flotada. Os sistemas de coleta foram dispostos em diferentes posições da parte inferior da zona de clarificação visando equalização do fluxo entre as placas, onde os ensaios demonstraram dois pontos fundamentais: i) o espaço físico destinado a montagem do manifold é limitado e não foi possível realizar a montagem com um número suficiente de tubos perfurados; ii) provavelmente, o fator de redução de escala na zona de clarificação influenciou nas características do escoamento. Estas limitações dificultaram a equalização da vazão. As Figuras 7; 8 e 9 apresentam alguns dos resultados dos ensaios com manifold afogado localizado no fundo da instalação piloto, a cerca de 50 cm abaixo do módulo de placas.

Figura B7: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $200\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ e a saída feita através de tubulação perfurada localizada na parte inferior da unidade.

Figura B8: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $300\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ e a saída feita através de tubulação perfurada localizada na parte inferior da unidade.

Figura B9: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $500\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ e a saída feita através de tubulação perfurada localizada na parte inferior da unidade.

Figura B10: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $700\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ e a saída feita através de tubulação perfurada localizada na parte inferior da unidade.

Observa-se através das figuras que, apesar de esta opção proporcionar melhores resultados quando comparados com o sistema de coleta superior, os resultados não foram satisfatórios principalmente para taxas de aplicação superficial maiores que $200\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$.

Placa com orifícios

Visando solucionar os problemas apresentados foi construída uma placa com orifícios montada na região de clarificação, porém logo abaixo do módulo de placas. Desta forma a coleta pode ser efetuada por lamela uma vez que a conformação da placa permitiu que fosse posicionada uma linha de furos abaixo de cada lamela. Com este sistema de coleta foi possível a adoção do número de furos demandados, permitindo uma distribuição equânime do fluxo entre as placas que compõem o módulo. Para a obtenção da TAS de $460\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ foi necessário efetuar o bloqueio da entrada na primeira placa que compõem o módulo lamelar. Os resultados destes ensaios são apresentados nas figuras subsequentes e foram realizados somente para as TAS investigadas nos ensaios de tratabilidade variando-se também a razão de recirculação (p) e o tempo de detenção na zona de reação da unidade piloto ($T_{dz,r}$). Foram investigadas também dois valores de TAS_{ap} para a unidade operando no modo convencional.

Figura B11: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $460\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$, $p=0,05$, $Tdz.r=40$ seg. e a saída feita através placa com orifícios localizada logo abaixo do conjunto de lamelas.

Um fator importante a ser considerado é que uma vez que o manifold foi posicionado logo abaixo das placas, a eficiência que será determinada nos ensaios será exclusivamente devido a FAD, já que existem flocos que poderiam ser removidos pela sedimentação no tanque.

Observa-se uma melhor distribuição do fluxo através das placas. No entanto, as linhas não obedecem a uma distribuição totalmente equânime, dando preferência às primeiras placas a partir da saída da zona de reação. Deve-se considerar, porém o fator de redução de escala como interferente na distribuição do fluxo. A Figura 12 mostra os resultados referentes a TAS de $460\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$ para recirculação de 10% ($p=0,10$) e tempo de detenção na zona de reação ($Tdz.r$) de 40 segundos.

Figura B12: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $460\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$, $p=0,10$, $Tdz.r=40$ seg. e a saída feita através placa com orifícios localizada logo abaixo do conjunto de lamelas.

Figura B13: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo de alta taxa. Ensaios realizados com a taxa de $460\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$, $p=0,10$, $Tdz.r=90$ seg. e a saída feita através placa com orifícios localizada logo abaixo do conjunto de lamelas.

Modo convencional

Realizaram-se também ensaios com a unidade no modo de operação convencional, já que esta foi objeto de estudos subsequentes. Para tal, foram aplicadas as taxas de 200 e $125\text{ m}^3/\text{m}^2\text{.dia}$ para os tempos de detenção na zona de reação ($Tdz.r$) de 40 e 90 segundos. As figuras 14, 15 e 16 mostram algumas das imagens tiradas na consecução destes ensaios.

Figura B14: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo convencional. Ensaios realizados com a taxa de $125\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$, $p=0,10$, $T_{dz.r}=40$ seg. e a saída feita através placa com orifícios localizada na porção inferior da zona de clarificação.

Figura B15: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo convencional. Ensaios realizados com a taxa de $200\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$, $p=0,10$, $T_{dz.r}=40$ seg. e a saída feita através placa com orifícios localizada na porção inferior da zona de clarificação..

Figura B16: Algumas das imagens dos ensaios de traçador que envolveram a definição das condições de coleta da água flotada na unidade operando com modo convencional. Ensaios realizados com a taxa de $200\text{m}^3/\text{m}^2\text{dia}$, $p=0,10$, $Tdz.r=90$ seg. e a saída feita através placa com orifícios localizada na porção inferior da zona de clarificação.

Os resultados permitiram verificar que o modo de operação convencional obteve distribuição mais equânime de água no interior da zona de clarificação utilizando-se do mesmo sistema de coleta utilizado nos demais ensaios com o modo de alta taxa.

Considerações finais

A distribuição da água entre as cinco placas que compõem o sistema de alta taxa não foi adequada quando a coleta de água flotada foi realizada através de saída superior (composta por tubo perfurado com escoamento livre). Estes ensaios foram realizados em diferentes taxas de aplicação superficial e analisados fotograficamente.

Posteriormente, foram estudadas diversas configurações de tubulações perfuradas distribuídas na parte inferior da unidade (*Manifold* afogado). As dimensões internas da zona de clarificação limitaram a adoção do número de furos que constituíram o sistema de coleta composto por tubulação. Sendo assim, a melhor alternativa foi a utilização de placa de orifícios localizada logo abaixo do módulo de placas. No entanto, considerou-se ainda que o sistema, no modo de operação de alta taxa, não estava com fluxo igualmente distribuído na zona de clarificação. Este fato foi atribuído a redução de escala da unidade investigada. Para estudar as condições de interesse no que tange aos valores das $TASap.$ e p , foi necessário reduzir a largura e comprimento da zona de clarificação para cerca de 40% da área original. Este fato

pode ter dificultado a distribuição equânime da água e constituído parte do problema que antes era somente atribuído as condições de coleta de água flotada. Acredita-se que as unidades plenas seriam menos influenciadas por esta questão uma vez que possuem espaço suficiente para que seja adotada uma configuração adequada do sistema de coleta de água flotada.

Conclusões específicas deste apêndice

A análise dos resultados referentes a definição do sistema de coleta de água flotada permitem concluir que:

- 1- O sistema constituído *Manifold* localizado na parte superior da unidade, não foi adequado para coleta uniforme da água flotada;
- 2- O *Manifold* inferior constituído por placa com orifícios obteve melhor desempenho para coleta de água flotada;
- 3- A redução de escala, principalmente no comprimento da zona de clarificação, foi considerada responsável pela distribuição considerada satisfatória.

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO GRAVIMÉTRICA

Os resultados a seguir referem-se a calibração dos medidores de vazão de entrada e de recirculação, utilizados para controle da vazão afluyente e para controle da vazão de recirculação de água saturada. Os resultados mostrados nas Figuras AX1 e AX2 permitem concluir que os medidores estavam em bom funcionamento garantindo precisão nas medidas efetuadas.

a)

b)

c)

Figura AX1: Resultados dos ensaios de aferição do medidor de vazão de água de recirculação. a) valor medido e valor aferido (L/min); b) relação entre vazão medida e aferida e; c) vazão medida x vazão aferida (L/min).

a)

b)

c)

Figura AX2: Resultados dos ensaios de aferição do medidor de vazão de entrada. a) valor medido e valor aferido (L/h); b) relação entre vazão medida e aferida e; c) vazão medida x vazão aferida (L/h).