ANDRE PIOLTINE

Influência do tamanho de partículas floculadas na
eficiência da clarificação de águas para abastecimento por
flotação.

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

Orientador:
Prof. Dr. Marco Antônio Penalva Reali

Versão Corrigida

São Carlos, SP
2013

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANDRÉ PIOLTINE**.

Título da tese: "Influência do tamanho de partículas floculadas na eficiência da pré-clarificação de águas para abastecimento por flotação".

Data da defesa: 25/04/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Luiz Olindo Monteggia**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

APROVADO

Prof. Titular **Pedro Além Sobrinho**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Ricardo de Lima Isaac**
(Universidade Estadual de Campinas/UNCAMP)

APROVADO

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

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

*A toda a minha família, em especial à
minha maravilhosa esposa Aline pela
paciência, compreensão e incentivo durante
esses anos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de aprimoramento intelectual e espiritual concedida a mim nesta vida.

A toda a minha família, em especial à minha esposa Aline, aos meus pais Vergílio e Shirley e aos meus irmãos Victor e Luís Flávio, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado nos momentos de dificuldades e alegrias.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali, orientador e grande idealizador desta pesquisa, pela paciência, apoio, incentivo e confiança durante estes sete anos de trabalho (mestrado e doutorado). Agradeço imensamente o aprendizado conquistado sob sua orientação. Sem dúvida alguma, tenho como um dos grandes exemplos a serem seguidos em minha carreira profissional.

Aos meus amigos Kisner, Artur José e Ricardo, dentre tantos outros que me acompanharam nestes anos e foram muito importantes nesta fase da minha vida.

Às minhas companheiras de LATAR, em especial à técnica Maria Teresa e às alunas Aline Escher e Irene Monteiro, as quais tiveram participação direta na realização desta pesquisa.

Ao Alcino, funcionário da USP, o qual também teve participação direta na realização desta pesquisa, efetuando todas as manutenções e adaptações necessárias na unidade piloto de flotação e demais equipamentos empregados.

A todos os funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial a Rose, Sá, Pavi, Valderez, Fernanda e Flávia pelo atendimento sempre atencioso e pela ajuda.

Aos professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial aos professores Luiz Antonio Daniel e Lyda Patricia Sabogal Paz, pelas importantes contribuições fornecidas no Exame de Qualificação.

Aos professores Luiz Olindo Monteggia (UFRGS), Pedro Além Sobrinho (Poli/USP) e Ricardo de Lima Isaac (UNICAMP), membros externos ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP, os quais gentilmente participaram da Comissão Julgadora de defesa desta Tese.

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e pela bolsa de estudos concedida, respectivamente.

E, finalmente, à cidade de São Carlos, à Universidade de São Paulo e à Escola de Engenharia de São Carlos, as quais me proporcionaram uma nova visão da vida, me auxiliando em meu amadurecimento pessoal e profissional em todos estes anos.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”

Mahatma Gandhi

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

Albert Einstein

RESUMO

PIOLTINE, A. **Influência do tamanho de partículas floculadas na eficiência da clarificação de águas para abastecimento por flotação**. 2013. 119 f. Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

A presente pesquisa teve por objetivo a investigação da influência do tamanho de partículas floculadas na eficiência da clarificação de águas para abastecimento por flotação por ar dissolvido (FAD) com o emprego de método e equipamento para a aquisição e análise de imagens especialmente desenvolvidos, tendo em vista à caracterização da distribuição de tamanho de flocos e microbolhas de ar, bem como, o estudo dos aglomerados bolhas-floco (em termos de número de microbolhas de ar aderidas e velocidade ascensional) presentes no processo de flotação e comparação dos dados experimentais àqueles obtidos em simulação com o emprego do modelo matemático proposto por Reali (1991). Os ensaios foram realizados com água sintética (turbidez de $7,5 \pm 0,2$ NTU; cor aparente de 38 ± 1 uC; alcalinidade de $29,8 \pm 0,6$ mgCaCO₃.L⁻¹; condutividade de $59,3 \pm 0,8$ µS.cm⁻¹; UV_{254nm} de $0,128 \pm 0,004$ cm⁻¹), a qual foi coagulada com a aplicação de 1,9mg.L⁻¹ de Al³⁺ (pH de $6,6 \pm 0,05$) e divididos em duas Fases: *Fase 1* - ensaios preliminares realizados em escala de laboratório, com o emprego do flotatest; *Fase 2* - ensaios realizados em unidade piloto de flotação. Os resultados alcançados demonstraram que: *i*) a distribuição de tamanho de partículas floculadas influenciou diretamente a clarificação por flotação da água em estudo, sendo que as melhores condições de floculação foram aquelas que conduziram à formação, em sua maioria, de partículas floculadas com diâmetro médio de Feret acima de 300µm; *ii*) os menores valores residuais dos parâmetros analisados na água em estudo foram alcançados com o emprego do tempo de floculação de 17min, entretanto a FAD foi capaz de operar também com boa eficiência com a utilização de tempo de floculação de 10min; *iii*) o método e equipamento desenvolvidos nesta pesquisa para a aquisição e análise de imagens demonstraram constituir importantes ferramentas para a obtenção das distribuições de tamanho de flocos e microbolhas de ar, bem como, para a determinação do número de microbolhas de ar aderidas às superfícies dos flocos e da velocidade ascensional dos aglomerados bolhas-floco gerados no processo de flotação; *iv*) mesmo com as diversas simplificações adotadas no desenvolvimento do modelo matemático analisado e considerando as condições experimentais utilizadas nesta pesquisa, foi possível verificar para a água em estudo e para as condições operacionais empregadas nesta pesquisa, que a modelação matemática proposta por Reali (1991) foi capaz de fornecer subsídios para uma adequada estimativa do número de microbolhas de ar aderidas aos flocos, bem como, das velocidades ascensionais dos aglomerados bolhas-floco.

Palavras-chave: floculação; flotação por ar dissolvido; análise de imagens; água de abastecimento.

ABSTRACT

PIOLTINE, A. **Influence of flocculated particles size on the efficiency of water supply clarifying by flotation.** 2013. 119 f. Thesis (Doctoral) – São Carlos School of Engineering of the São Paulo University, Brazil.

The goal of this research was to investigate the flocculated particles size distribution influence on the dissolved air flotation (DAF) efficiency. Special image acquisition method and equipment were used to characterize the flocculated particles and air microbubbles size distribution, as well as, the clusters (in terms of microbubbles number adhered and rise velocity) in the contact zone outlet of the DAF unit. Besides that, the experimental results were compared with those obtained from the DAF modeling proposed by Reali (1991). The trials were carried out with synthetic water (temperature of $26.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$; turbidity of 7.5 ± 0.2 NTU; apparent color of 38 ± 1 CU; alkalinity of 29.8 ± 0.6 mgCaCO₃/L; conductivity of 59.3 ± 0.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$; UV_{254nm} of 0.128 ± 0.004 cm⁻¹), that it was coagulated by applying 1.9mg.L⁻¹ of Al³⁺ (22.5mg.L⁻¹ alum). The trials were divided into two phases: Phase 1 – preliminary tests carried out in laboratory facilities (flotatest); Phase 2 – tests carried out in pilot facilities (DAF pilot unit). The results showed that: *i*) the flocculation conditions interfered directly on the efficiency of DAF process, and the best flocculation conditions were those that conducted to formation of flocculated particles size with Feret mean diameter above 300 μm ; *ii*) the best results were obtained applying flocculation time of 17 min, however, DAF was also capable of operating with a satisfactory efficiency when applying flocculation time of 10 min; *iii*) the special image acquisition method and equipment developed in this research proved to be a important tool to characterize the flocculated particles and air microbubbles size distribution, as well as, the number of air microbubbles adhered to the flocs surface and the clusters rise velocity; *iv*) the DAF modeling developed by Reali (1991) provided a reliable prediction of the microbubbles number adhered to the flocs surface , as well as, the clusters rise velocity.

Keywords: flocculation; dissolved air flotation; image analysis; water supply; DAF modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Foto do aparato experimental utilizado por Cassel, Kaufman e Matijevic (1975) para o estudo do tamanho de microbolhas de ar formados no processo de flotação.	31
Figura 2 - Equipamento denominado LTM-BSizer empregado por Rodrigues e Rubio (2003) no estudo do tamanho de microbolhas de ar formadas no processo de flotação. 32	
Figura 3 – Detalhamento do equipamento denominado LTM-BSizer empregado para aquisição de imagens das bolhas de ar por Rodrigues e Rubio (2003).	33
Figura 4 - Esquema ilustrativo do sistema de aquisição de imagens desenvolvido por Leppinen e Dalziel (2004) e empregado no estudo da distribuição de tamanho microbolhas de ar no interior de tanques de flotação de duas Estações de Tratamento de Água.	34
Figura 5 - Ilustração do arranjo experimental utilizado para aquisição de imagens e determinação da distribuição de tamanho de microbolhas de ar por Moruzzi (2005). ..	36
Figura 6 - Esquema ilustrativo do processo de aquisição de imagens empregado por Han, Kim T. e Kim J. (2007).	38
Figura 7 - Esquema ilustrativo e foto do equipamento PIA empregado para a obtenção das velocidades ascensionais de aglomerados bolhas-floco formados no processo de flotação (Fonte: KWAK et al., 2009).	39
Figura 8 - Esquema ilustrativo do CFA: (1) câmara de saturação; (2) célula de flotação; (3) câmera digital para filmagem do escoamento; (4) tubo de ascensão; (5) fontes de iluminação; (6) microscópio óptico; (7) câmera digital para captura das imagens dos aglomerados; (8) monitor para visualização das imagens (Fonte: OLIVEIRA; RODRIGUES; RUBIO, 2010).	42
Figura 9 - Arranjo hipotético das microbolhas de ar e flocos no interior de reatores FAD segundo Reali (1991).	43
Figura 10 - Velocidade ascensional (ou de sedimentação) de flocos em função do n° de bolhas aderidas à sua estrutura e em função do diâmetro da bolha (flocos esféricos com $\rho_f/\rho_{\text{água}}$ igual a 1,003 e $\Theta_{\text{água}}$ de 20°C) – Fonte: Reali, 1991.	44
Figura 11 - Velocidade ascensional (ou de sedimentação) de flocos em função do n° de bolhas aderidas à sua estrutura e em função do diâmetro da bolha (flocos esféricos com $\rho_f/\rho_{\text{água}}$ igual a 1,014 e $\Theta_{\text{água}}$ de 20°C) – Fonte: Reali, 1991.	45
Figura 12 - "Cilindro de Colisão" utilizado por Reali (1991) no estudo de colisões entre bolhas de ar e flocos no processo de flotação.	46
Figura 13 - Flotateste utilizado nos ensaios em escala de laboratório (desenvolvido por Reali, 1991)	51

Figura 14 - Configuração da unidade piloto de FAD empregada nos <i>Ensaaios Preliminares</i>	52
Figura 15 - Configuração da unidade piloto de FAD empregada nos <i>Ensaaios Principais e Complementares</i>	53
Figura 16 - Esquema ilustrativo do sistema de aquisição e análise de imagens desenvolvido nesta pesquisa para a aquisição de seqüências de imagens de flocos, microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco.	53
Figura 17 – Colposcópio Olympus OCS-3.....	54
Figura 18 - Esquema ilustrativo do flotatesto utilizado para a aquisição de imagens na Fase 1 (escala de laboratório).	55
Figura 19 – Esquema ilustrativo do posicionamento da coluna de amostragem no interior do tanque de flotação durante o processo de aquisição das imagens.....	56
Figura 20 - Sistema de Aquisição de Imagens instalado na unidade piloto de FAD.	57
Figura 21 - Detalhes: <i>a)</i> coluna de sucção de amostras; <i>b)</i> bomba utilizada para sucção.	57
Figura 22 - Tela do software <i>Image-Pro Plus 7.01</i> utilizada para o ajuste dos parâmetros de aquisição de imagens.	60
Figura 23 - Calibração do software a partir de uma dimensão conhecida.....	63
Figura 24 – Passo 1: Abertura da seqüência de imagens contendo as partículas de interesse.	63
Figura 25 – Passo 2: Modificação do contraste da imagem.	64
Figura 26 – Passo 5: Aplicação de filtro (<i>median filter</i>).	64
Figura 27 – Passo 7: Binarização da imagem de interesse.	65
Figura 28 – Passo 8: Obtenção das medidas (diâmetro, área, entre outros) do objeto de interesse.	65
Figura 29 – Exemplos da utilização do comando <i>track objects</i> na obtenção das velocidades ascensionais de aglomerados bolhas-floco (à esquerda) e microbolhas de ar (à direita).....	66
Figura 30 - Ilustração do cálculo do diâmetro de <i>Feret</i>	68
Figura 31 - Exemplos de valores de circularidade para diferentes formas de partículas (Fonte: adaptado MALVERN, 2011)	68
Figura 32 - Elipse de Legendre (Fonte: MIKLI, 2001)	69

Figura 33 – Exemplos de partículas com diferentes valores de alongação	69
Figura 34 - Esquema ilustrativo dos ensaios realizados em escala de laboratório na Fase 1.	71
Figura 35 - Esquema ilustrativo dos <i>Ensaio Preliminares</i> realizados em escala piloto na Fase 2.	72
Figura 36 - Fluxograma ilustrativo dos <i>Ensaio Principais</i> realizados na Fase 2.....	74
Figura 37 - Fluxograma ilustrativo dos <i>Ensaio Complementares</i> realizados na Fase 2.	74
Figura 38 - Valores de turbidez residual alcançados nos ensaios realizados em escala de laboratório na Fase 1.....	76
Figura 39 - Valores de cor aparente residual alcançados nos ensaios realizados em escala de laboratório na Fase 1.	77
Figura 40 - Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtidas em <i>escala de laboratório</i> na Fase 1 em termos de Frequência Relativa Simples.	78
Figura 41 - Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtidas em <i>escala de laboratório</i> na Fase 1 em termos de Frequência Relativa Acumulada.....	78
Figura 42 - Valores de diâmetro médio de flocos incluindo intervalo de confiança de 95%, para cada condição de floculação investigada em escala de laboratório na Fase 1.	79
Figura 43 – Exemplos de imagens obtidas para a <i>condição 2</i> (G de $90s^{-1}$ com T de 12min - à esquerda) e <i>condição 1</i> (G de $180s^{-1}$ com T de 6min - à direita) de floculação investigadas em escala de laboratório na Fase 1.	80
Figura 44 - Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtida nos <i>Ensaio Preliminares</i> realizados em escala piloto em termos de Frequência Relativa Simples e Acumulada (<i>Condição 1</i> – $G = 115s^{-1}/T = 5min$; <i>Condição 2</i> - $G = 50s^{-1}/T = 11min$; <i>Condição 3</i> - $G = 35s^{-1}/T = 16min$).	82
Figura 45 - Valores de diâmetro médio de flocos, incluindo intervalo de confiança de 95%, para cada condição de floculação investigada nos <i>Ensaio Preliminares</i> realizados na Fase 2 em escala piloto.	82
Figura 46 – Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtida nos <i>Ensaio Principais</i> realizados na Fase 2 para T igual a 10min.	86
Figura 47 - Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtida nos <i>Ensaio Principais</i> realizados na Fase 2 para T igual a 17min.	86

Figura 48 - Valores de diâmetro médio de Feret incluindo intervalo de confiança de 95% para os diferentes valores de G investigados nos <i>Ensaio Principais</i> na Fase 2 para T igual a 10min.....	87
Figura 49 - Valores de diâmetro médio de Feret incluindo intervalo de confiança de 95% para os diferentes valores de G investigados nos <i>Ensaio Principais</i> na Fase 2 para T igual a 17min.....	88
Figura 50 - <i>Boxplot</i> dos valores de <i>fator de alongação</i> para as condições de floculação investigadas nos <i>Ensaio Principais</i> na Fase 2 para T igual a 10min.	89
Figura 51 - <i>Boxplot</i> dos valores de <i>fator de alongação</i> para as condições de floculação investigadas nos <i>Ensaio Principais</i> na Fase 2 para T igual a 17min.	89
Figura 52 - <i>Boxplot</i> dos valores de <i>fator de circularidade</i> para as condições de floculação investigadas nos <i>Ensaio Principais</i> na Fase 2 para T igual a 10min.	90
Figura 53 - <i>Boxplot</i> dos valores de <i>fator de circularidade</i> para as condições de floculação investigadas nos <i>Ensaio Principais</i> na Fase 2 para T igual a 17min.	90
Figura 54 - Frequência relativa simples e acumulada em número por faixa de tamanho de microbolhas de ar para concentrações em massa de ar (C_b) de 7,8 e 4,8mg.L ⁻¹	92
Figura 55 - Valores de diâmetro médio de Feret das microbolhas de ar incluindo intervalo de confiança de 95% para as concentrações em massa de ar (C_b) de 4,8 e 7,8mg.L ⁻¹	93
Figura 56 – Exemplos de imagens das microbolhas de ar com a aplicação de C_b de 4,8mg.L ⁻¹ (à esquerda) e C_b de 7,8mg.L ⁻¹ (à direita).....	94
Figura 57 - Efeito do gradiente médio de velocidade de floculação (G) na FAD para os diferentes tempos de floculação (T) investigados para C_b de 4,8mg.L ⁻¹ – <i>Ensaio Principais</i>	95
Figura 58 - Efeito da concentração em massa de ar na FAD para as condições de floculação onde foram obtidos os melhores resultados em termos dos parâmetros analisados nos ensaios principais – <i>Ensaio Complementares</i>	96
Figura 59 - Frequência relativa simples e acumulada em número por faixa de tamanho de partículas floculadas para as duas condições onde os melhores resultados em termos de remoção dos parâmetros analisados foram obtidos (Condição 1 - T = 10min / G = 75s ⁻¹ e Condição 2 - T = 17min / G = 60s ⁻¹).....	97
Figura 60 – Frequência relativa simples e acumulada em número por faixa de tamanho de microbolhas de ar para concentração em massa de ar (C_b) de 3,3 mg.L ⁻¹ (relativa à razão de recirculação de 4% e pressão de saturação de 4,5±0,1atm).	99
Figura 61 – Valores de velocidade ascensional das microbolhas de ar obtidos experimentalmente.....	100

Figura 62 - Comparação entre a curva de velocidade ascensional das microbolhas de ar obtida experimentalmente e a curva teórica calculada a partir da equação clássica de Stokes ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$).....	101
Figura 63 – Resultados experimentais referentes ao número de bolhas de ar aderidas nas diferentes faixas de diâmetro médio de <i>Feret</i> dos aglomerados bolhas-floco ($n = 32$, $G = 75\text{s}^{-1}$; $T = 10\text{min}$; $p = 4,5 \pm 0,1\text{atm}$; $C_b = 3,3\text{mg.L}^{-1}$).	102
Figura 64 - Imagens de aglomerados bolhas-floco obtidas a partir do sistema de aquisição e análise de imagens empregado nesta pesquisa.	103
Figura 65 – Comparação entre as curvas desenvolvidas por Reali (1991) e os dados obtidos experimentalmente para flocos com diâmetro entre 200 e 300 μm ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$; $\rho_{f\ 200} = 1005,4\text{kg/m}^3$; $\rho_{f\ 300} = 1002,9\text{kg/m}^3$; $\rho_w = 996,3\text{kg/m}^3$).	105
Figura 66 - Comparação entre as curvas desenvolvidas por Reali (1991) e os dados obtidos experimentalmente para flocos com diâmetro entre 300 e 400 μm ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$; $\rho_{f\ 300} = 1002,9\text{kg/m}^3$; $\rho_{f\ 400} = 1001,5\text{kg/m}^3$; $\rho_w = 996,3\text{kg/m}^3$).	105
Figura 67 - Comparação entre as curvas desenvolvidas por Reali (1991) e os dados obtidos experimentalmente para flocos com diâmetro entre 400 e 500 μm ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$; $\rho_{f\ 400} = 1001,5\text{kg/m}^3$; $\rho_{f\ 500} = 1000,7\text{kg/m}^3$; $\rho_w = 996,3\text{kg/m}^3$).	106
Figura 68 - Comparação entre as curvas desenvolvidas por Reali (1991) e os dados obtidos experimentalmente para flocos com diâmetro entre 600 e 700 μm ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$; $\rho_{f\ 600} = 1000,1\text{kg/m}^3$; $\rho_{f\ 700} = 999,7\text{kg/m}^3$; $\rho_w = 996,3\text{kg/m}^3$).	106
Figura 69 - Fotos do sensor de torque empregado nesta pesquisa.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da água sintética.....	50
Tabela 2 - Principais parâmetros empregados na aquisição de imagens nesta pesquisa.	62
Tabela 3 - Valores de gradiente médio de velocidade de floculação e tempo de floculação investigados em escala de laboratório (Fase 1).	70
Tabela 4 - Parâmetros mantidos fixos durante ensaios realizados em escala de laboratório na Fase 1.....	71
Tabela 5 - Condições de floculação investigadas nos <i>Ensaio Preliminares</i> em escala piloto na Fase 2.....	72
Tabela 6 - Parâmetros mantidos fixos durante <i>Ensaio Preliminares</i> em escala piloto na Fase 2.....	73
Tabela 7 - Parâmetros mantidos fixos durante <i>Ensaio Principais e Complementares</i> em escala piloto na Fase 2.	75
Tabela 8 - Valores residuais dos parâmetros analisados nos <i>Ensaio Preliminares</i> em escala piloto na Fase 2.	81
Tabela 9 - Valores de turbidez residual após FAD - Ensaio Principais.....	84
Tabela 10 - Valores de cor aparente residual após FAD - Ensaio Principais.	84
Tabela 11 - Valores de SST após FAD - Ensaio Principais.....	85
Tabela 12 – Caracterização dos aglomerados bolhas-floco empregados na comparação com o modelo matemático proposto por Reali (1991).	104
Tabela 13 - Principais informações a respeito do sensor de torque empregado nesta pesquisa.	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADV	<i>Acoustic Doppler velocimetry</i>
AS	Razão de Aspecto
AOI	<i>Area of Interest</i>
CCTV	<i>Closed-circuit Television</i>
CFA	Caracterização de Flocos Aerados
CCD	<i>Charge-coupled device</i>
DTMB	Distribuição de Tamanho de Microbolhas de Ar
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EL	Fator de Elongação
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
FC	Fator de Circularidade
MMBR	<i>Moving Bed Biofilm Reactor</i>
PIA	<i>Particle Image Analyzer</i>
SST	Sólidos em Suspensão Totais
TAS	Taxa de Aplicação Superficial
UV	Radiação Ultravioleta
USP	Universidade de São Paulo
USMB	Unidade Separadora de Microbolhas de Ar

LISTA DE SÍMBOLOS

C_b	Concentração em massa de ar
C_f	Concentração em volume de flocos
S_v	Concentração em volume de ar disponível na recirculação
C_{vb}	Concentração em volume de bolhas de ar
C_s	Concentração de ar na água recirculada
$\varnothing_{CE}$	Diâmetro de círculo de área equivalente
$\varnothing_{bolha}$	Diâmetro das microbolhas de ar
d_f	Diâmetro dos flocos
α	Fluxo de sólidos
G	Gradiente médio de velocidade de floculação
$\rho_{água}$	Massa específica da água
ρ_{bolha}	Massa específica das bolhas (ar)
ρ_f	Massa específica do floco
N_b	Número de bolhas de ar aderidas
N_{b50}	Número de bolhas de ar aderidas com 50 μ m de diâmetro
n	Tamanho amostral
TAS_{ZC}	Taxa de aplicação superficial na zona de contato
TAS_{ZS}	Taxa de aplicação superficial na zona de separação
$\Theta_{água}$	Temperatura da água
TDH_{ZC}	Tempo de detenção hidráulico na zona de contato
T	Tempo de floculação
V_f	Velocidade de flotação
V_{bf}	Velocidade ascendente dos aglomerados bolhas-floco
V_{bolha}	Velocidade ascensional das microbolhas de ar
$\mu_{água}$	Viscosidade dinâmica da água
$\nu_{água}$	Viscosidade cinemática da água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
2. OBJETIVOS	25
2.1 Objetivo Geral	25
2.2 Objetivos Específicos.....	25
3. REVISÃO DE LITERATURA	26
3.1 Considerações Gerais	26
3.2 Pesquisas relacionadas à investigação da faixa de valores adequados para as principais variáveis da etapa de floculação (tempo de floculação e gradiente médio de velocidade) visando à flotação por ar dissolvido para águas de abastecimento	26
3.3 Pesquisas relacionadas à caracterização da distribuição de tamanho de partículas floculadas e microbolhas de ar por meio de análise de imagens na flotação	30
3.4 Pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de modelos matemáticos para a flotação por ar dissolvido.....	42
4. MATERIAL E MÉTODOS	49
4.1 Considerações Gerais	49
4.2 Água de Estudo.....	49
4.3 Instalações e Equipamentos.....	50
4.3.1 Flotatestes	50
4.3.2 Unidade Piloto.....	51
4.4 Sistema de Aquisição de Imagens	53
4.4.1 Procedimentos para Aquisição e Tratamento de Imagens	57
4.4.2 Parâmetros utilizados na caracterização do tamanho e forma das partículas floculadas e microbolhas de ar	67
4.5 Programação dos Ensaios.....	70
4.5.1 Fase 1.....	70
4.5.2 Fase 2.....	71
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1 Fase 1.....	76
5.2 Fase 2.....	81
a) Ensaios Preliminares:.....	81
b) Ensaios Principais:	84

<i>c) Ensaios Complementares:</i>	96
<i>d) Velocidade Ascensional das microbolhas de ar:</i>	99
<i>e) Aglomerados bolhas-floco: Comparação dos resultados alcançados experimentalmente àqueles obtidos em simulação com o emprego do modelo matemático proposto por Reali (1991)</i>	102
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	109
Referências Bibliográficas	111
Apêndice A - Determinação experimental do valor de gradiente médio de velocidade de floculação empregado em escala piloto (Fases 1 e 2)	118
Apêndice B – Cálculo da densidade de partículas floculadas (ρ_f) segundo equação proposta por Haarhoff e Edzwald (2004)	120

1. INTRODUÇÃO

Em vista do comprometimento acentuado da qualidade das águas dos mananciais superficiais, principalmente no que diz respeito ao aumento da concentração de substâncias orgânicas, os sistemas de flotação por ar dissolvido (FAD) têm sido cada vez mais utilizados em Estações de Tratamento de Água (ETA) em todo o mundo, devido ao melhor desempenho dessa técnica em relação aos sistemas convencionais. Como exemplo, pode-se citar: ETA de Nova York com capacidade de $12,7\text{m}^3/\text{s}$ (CROSSLEY et al., 2007); ETA de Sangjiancom com capacidade de $2,3\text{m}^3/\text{s}$ (SOHN et al., 2007); ETA de Winnipeg, implantada no Canadá, com capacidade de $4,6\text{m}^3/\text{s}$ (PERNISTSKY et al., 2007). Especificamente no Brasil, já existe número expressivo de Estações de Tratamento de Água utilizando a flotação, podendo-se citar a ETA Brasília no Distrito Federal ($2,8\text{m}^3/\text{s}$), ETA Irai no Paraná ($4,0\text{m}^3/\text{s}$), ETA Carapina no Espírito Santo ($2,5\text{m}^3/\text{s}$) e ETA Vargem das Flores em Minas Gerais ($1,4\text{m}^3/\text{s}$), todas elas já em operação.

De acordo com Kiuru (2001), a FAD foi inicialmente utilizada no processamento de matérias primas minerais no final do século XIX, sendo introduzida como alternativa para o tratamento de água na década de 20. Durante as décadas de 60 e 70, a FAD foi extensivamente aplicada nos países Escandinavos, como Suécia e Finlândia, no tratamento de água de abastecimento e águas residuárias devido à alta eficiência deste processo em águas frias na remoção de sólidos em suspensão formados pela coagulação e floculação de substâncias húmicas, especialmente quando comparado ao processo de sedimentação. Nos Estados Unidos, segundo Edzwald et al. (1999), a FAD começou a ganhar maior importância como pré-tratamento no final da década de 1990, após a promulgação da *Surface Water Treatment Rule*, a qual requereu de forma efetiva a utilização do processo de filtração no tratamento de águas superficiais. No Brasil, as primeiras pesquisas com o emprego da FAD no tratamento de águas de abastecimento iniciaram-se no início da década de 1980 na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Ao longo destes anos, importantes desenvolvimentos no processo de FAD foram verificados, contribuindo significativamente para o aumento da utilização desta tecnologia tanto para o tratamento de águas de abastecimento, quanto para o tratamento de efluentes industriais e domésticos. Dentre estes desenvolvimentos, Edzwald (2010) cita os importantes avanços ocorridos nos últimos cinquenta anos com relação ao aumento das taxas de aplicação superficial (de 5 para 40m/h) empregadas no processo e a diminuição dos tempos de floculação aplicados na FAD (de 30 para 10min). Além disto, nas últimas décadas diversos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos e empregados, bem como, diversas ferramentas como análise de imagens, micro ADV (Accoustic Doppler Velocimetry), difração a laser, entre outros, os quais têm contribuído para uma melhor compreensão das interações ocorridas entre microbolhas de ar e flocos no interior de reatores FAD.

Entretanto, apesar destes avanços em relação ao conhecimento de diversos aspectos fundamentais do processo de flotação por ar dissolvido, pontos importantes desse processo permanecem ainda pouco esclarecidos. Desta forma, evidencia-se a necessidade da realização de estudos com o objetivo de aprofundar o nível de conhecimento acerca da cinética do processo de flotação, com ênfase na influência da distribuição de tamanho de flocos e microbolhas de ar na formação de aglomerados bolhas-floco.

Com relação às técnicas atualmente empregadas na captura e análise de imagens de flocos, bem como de microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco formados durante o processo de flotação, tem se verificado que ao longo dos últimos anos ocorreu um aumento significativo no número de pesquisas desenvolvidas, visto à importância que estas partículas exercem sobre a cinética do processo de flotação (BACHE E RASOOL, 2001; RODRIGUES E RUBIO, 2003; MORUZZI, 2005; LEE et. al., 2007; HAN, KIM T. E KIM, J., 2007; KWAK et. al., 2009; SOHN et. al., 2009; OLIVEIRA, RODRIGUES E RUBIO, 2010).

Desta forma, a presente pesquisa teve por objetivo a investigação da influência do tamanho de partículas floculadas na eficiência da clarificação de águas para abastecimento por flotação com o emprego de método e equipamento para a aquisição e análise de imagens especialmente desenvolvidos, tendo em vista à caracterização da

distribuição de tamanho de flocos e microbolhas de ar, bem como, o estudo dos aglomerados bolhas-floco (em termos de número de microbolhas de ar aderidas e velocidade ascensional) presentes no processo de flotação e comparação dos dados experimentais àqueles obtidos em simulação com o emprego do modelo matemático proposto por Reali (1991). Espera-se que os resultados obtidos com este estudo possam contribuir para o aperfeiçoamento de projetos futuros de instalações de floculação e flotação por ar dissolvido, podendo promover além da economia de espaço e custos, aumento no desempenho destas unidades e também um maior entendimento sobre a interação ocorrida entre microbolhas de ar e flocos no interior da zona de contato de unidades de flotação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa foi investigar a influência da distribuição de tamanho de partículas floculadas na eficiência da clarificação de água para abastecimento por flotação.

2.2 Objetivos Específicos

- Investigar a faixa de valores adequados para as principais variáveis da etapa de floculação (tempo de floculação e gradiente médio de velocidade de floculação) visando à flotação;
- Desenvolver método e equipamento para a aquisição e análise de imagens tendo em vista à caracterização da distribuição de tamanho de flocos e microbolhas de ar, bem como, o estudo dos aglomerados bolhas-floco (em termos de número de microbolhas de ar aderidas e velocidade ascensional) formados no processo de flotação;
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente àqueles obtidos em simulação com o emprego do modelo matemático proposto por Reali (1991).

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Considerações Gerais

Esta Revisão de Literatura apresentará estudos considerados relevantes realizados em âmbito nacional e internacional, referentes aos seguintes assuntos objetos desta pesquisa: *i)* pesquisas relacionadas à investigação da faixa de valores adequados para as principais variáveis da etapa de floculação visando à FAD para águas de abastecimento; *ii)* pesquisas relacionadas à caracterização da distribuição de tamanho de partículas floculadas e microbolhas de ar por meio de análise de imagens; *iii)* pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de modelos matemáticos para a FAD.

Deve ser ressaltado que em relação à investigação da faixa de valores adequados para as principais variáveis da etapa de floculação visando à flotação por ar dissolvido para águas de abastecimento, não há um número expressivo de pesquisas publicadas sobre este tema.

3.2 Pesquisas relacionadas à investigação da faixa de valores adequados para as principais variáveis da etapa de floculação (tempo de floculação e gradiente médio de velocidade) visando à flotação por ar dissolvido para águas de abastecimento

Edzwald et al. (1992) realizaram investigação dos efeitos do tempo de floculação visando à flotação por ar dissolvido a partir de ensaios realizados em escala de bancada e escala piloto, utilizando água proveniente de um reservatório natural (Lago Whitney), localizado no estado americano de Connecticut.

Nos ensaios em escala de bancada foi adicionada à água de estudo uma concentração de 10.000 células de *Chorella* (gênero de alga) produzindo uma concentração total de partículas de 21.000 partículas/ml e turbidez igual a 2,9NTU. A adição de células de *Chlorella* proporcionou a realização de experimentos nos quais foi possível simular as

condições encontradas em determinadas épocas do ano, quando há picos na concentração algal do reservatório.

Nestes experimentos duas condições foram simuladas: quebra dos flocos após a floculação e ausência da quebra dos flocos. No primeiro ensaio, as seguintes etapas do tratamento foram aplicadas: mistura rápida (coagulantes testados: sulfato de alumínio e cloreto férrico), floculação ($T = 20\text{min}$), agitação para a quebra dos flocos ($G = 380\text{s}^{-1}$ por 2min) e flotação por ar dissolvido ($p = 483\text{kPa}$). No segundo ensaio, apenas a etapa de agitação para a quebra dos flocos não foi realizada, sendo as demais etapas e parâmetros mantidos constantes.

Nos resultados obtidos em *escala de laboratório*, valores de turbidez menores ou iguais a $1,0\text{NTU}$ foram alcançados com ou sem a quebra dos flocos após período de 20min de floculação. Porém, a quebra dos flocos proporcionou os menores valores de turbidez residual.

Já nos ensaios em *escala piloto* foram realizados experimentos na ausência de câmara de floculação, na presença de uma câmara de floculação (T de $8\text{ min} - 1$ estágio) e na presença de duas câmaras de floculação (T de $16\text{ min} - 2$ estágios). A água em estudo proveniente do reservatório apresentou durante os ensaios as seguintes características: temperatura igual a 18°C , turbidez de $5,2\text{NTU}$ (valor médio) e absorbância 254nm igual a $0,173\text{cm}^{-1}$. Ressalta-se que nos ensaios em escala piloto, apenas o cloreto férrico foi utilizado como coagulante ($23 - 27\text{mg/L}$).

Nestes ensaios em *escala piloto* foram obtidos excelentes valores de turbidez (em torno de $0,5\text{NTU}$ para T de 16min e $1,0\text{NTU}$ para T de 8min), não havendo diferença significativa entre estes tempos de floculação em termos de perda de carga no filtro, localizado a jusante da FAD. Já os experimentos realizados na ausência de floculação indicaram um fraco desempenho da FAD (valores de turbidez em torno de $2,0\text{NTU}$).

Diante dos resultados obtidos em *escala de laboratório e piloto*, os autores concluíram que longos períodos de floculação não são necessários para um tratamento satisfatório por FAD.

Em estudo desenvolvido por Valade et al. (1996), a etapa de floculação antecedendo as etapas de flotação por ar dissolvido e filtração foi investigada. Nesta pesquisa foram estudadas as seguintes variáveis: tempo de floculação (T de 5 e 20min), quantidade de compartimentos no tanque de floculação (2 e 3 estágios), o tipo de agitador (floculador mecânico de paletas e de fluxo axial) e gradiente médio de velocidade da floculação (G de 30s^{-1} e 70s^{-1}).

A pesquisa foi desenvolvida em *escala piloto* utilizando água proveniente do rio Göta, localizado na cidade de Gothenburg – Suécia. Os ensaios foram divididos em duas fases: Fase 1 ($\Theta_{\text{ÁGUA}} = 5,8^{\circ}\text{C}$; turbidez média de 0,85NTU; T = 20min) e Fase 2 ($\Theta_{\text{ÁGUA}} = 2,7^{\circ}\text{C}$; turbidez média de 0,97NTU; T = 5min). Nos dois ensaios realizados foram testados dois diferentes tipos de coagulantes (sulfato de alumínio e sulfato férrico) e realizado a contagem de partículas através do sistema *WGS 260 Grab Sampler* (fabricante *Met One*).

Os resultados obtidos com esta pesquisa demonstraram que a flotação por ar dissolvido produziu excelentes resultados no tratamento da água em estudo para os dois tempos de floculação estudados, sendo que o T de 20min proporcionou melhor desempenho na FAD. Entretanto, segundo os autores, o desempenho da unidade FAD com a utilização de T de 5min é considerado bom, pois nestes ensaios foram obtidos valores de turbidez residual em torno de 1,0NTU e contagem de partículas de 1.000 a 2.000 partículas/mL.

Com relação às demais variáveis investigadas neste estudo (número de compartimentos de floculação, tipo de misturador, tipo de coagulante e gradiente médio de velocidade de floculação), as seguintes conclusões foram obtidas pelos autores: *i)* não houve diferença significativa no desempenho da FAD quando o número de compartimentos na floculação (2 ou 3 estágios) foi variado; *ii)* o tipo de misturador (paletas ou fluxo axial) não influenciou significativamente o desempenho da FAD; *iii)* as maiores eficiências de remoção foram alcançadas com a utilização de sulfato férrico como coagulante para ambos os tempos de floculação estudados; *iv)* o gradiente médio de velocidade de floculação teve um menor efeito na FAD, sendo que a turbidez e contagem de partículas foram menores quando foi aplicado G de 70s^{-1} associado a T de 5min, enquanto que para T de 20min, não houve efeito significativo de G na FAD.

Reali e Dombroski (1996) investigaram a influência do gradiente médio de velocidade de floculação e tempo de floculação na eficiência de unidade FAD aplicada para o tratamento de água de abastecimento.

Esta investigação foi realizada em *escala de laboratório* (flotatestes) com água sintética (cor aparente em torno de 90uC e turbidez em torno de 7uT). Diferentes valores de tempos de floculação (T de 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 30min) e gradiente médio de velocidade de floculação (G de 20, 40, 60, 80 e 100s⁻¹) foram estudados. Os seguintes parâmetros foram mantidos fixos: dosagem de coagulante (sulfato de alumínio) de 40mg/L, razão de recirculação de 8% e pressão de saturação de 456kPa.

Os resultados demonstraram que para a água sintética em estudo, as maiores eficiências de remoção (90% de remoção de cor aparente) foram alcançadas para o tempo de floculação de 20min associado ao gradiente médio de velocidade de 60s⁻¹. Segundo os autores, a FAD operou bem com flocos menores, tendo apresentado boa eficiência de remoção de cor aparente para T de 12min associado à G de 80s⁻¹ (88% de remoção de cor aparente) e para T de 8min associado à G de 80s⁻¹ (86% de remoção de cor aparente).

Han et al. (2007) pesquisaram quatro opções de floculação visando à Flotação por Ar Dissolvido: *opção 1*) floculação convencional (floculadores mecânicos); *opção 2*) ausência de floculação; *opção 3*) floculação mecânica no interior da zona de contato do tanque de flotação e; *opção 4*) floculação com uso de defletores instalados no interior da zona de contato do tanque de flotação.

Os ensaios foram realizados com água sintética (turbidez de 20NTU) e em *escala piloto*. Foram investigadas taxas de aplicação superficial de 5 a 40m.h⁻¹. Os resultados demonstraram: *i*) dentre as opções de floculação investigadas, a floculação convencional apresentou os melhores resultados em termos de eficiência *ii*) o emprego de taxas de aplicação superficial de até 10m.h⁻¹ promoveu eficiência superior a 80% em todas as opções de floculação investigadas; *iii*) defletores instalados no interior da zona de contato do tanque de FAD podem ser empregados como opção para a floculação, proporcionando menores gastos com energia.

Moruzzi e Reali (2008) realizaram pesquisa em *escala de laboratório* com objetivo de investigar as condições de floculação (G e T) visando a FAD. Os ensaios foram realizados a partir de água sintética (turbidez de 5uT, cor aparente de 50uC, alcalinidade de 24mgCaCO₃/L e condutividade de 28μS.cm⁻¹), a qual foi preparada por adição de quantidades específicas de caulinita e ácido húmico à água proveniente de poço profundo localizado no campus da USP na cidade de São Carlos.

Primeiramente foram realizados ensaios onde o tempo de floculação (T) foi mantido fixo e igual a 15min e diferentes valores de gradiente médio de velocidade de floculação foram variados (G de 40 a 100s⁻¹). Após a realização destes ensaios, o valor do gradiente médio de velocidade foi fixado em 90s⁻¹ (melhor conjunto de resultados obtido anteriormente) e variado os tempos de floculação (T de 5, 8, 10, 15 e 20min). De acordo com os autores, as condições adequadas de floculação foram obtidas com o emprego de G de 90s⁻¹ e T de 8min.

É importante ressaltar que os autores deixam clara a importância e a necessidade de realização de ensaios em escala real, pois os ensaios em regime de batelada (laboratoriais) não reproduzem as condições hidrodinâmicas que ocorrem normalmente em escala de escoamento contínuo.

3.3 Pesquisas relacionadas à caracterização da distribuição de tamanho de partículas floculadas e microbolhas de ar por meio de análise de imagens na flotação

Um dos primeiros estudos desenvolvidos com objetivo de compreender a influência do tamanho de microbolhas de ar na flotação por meio de análise de imagens foi realizado por Cassel, Kaufman e Matijevic (1975). Neste estudo, os pesquisadores avaliaram os efeitos da concentração de etanol e ácido láurico sobre o tamanho das microbolhas de ar e sobre a eficiência de remoção de ácido húmico. Os tamanhos das microbolhas de ar foram determinados em laboratório através de equipamento fotográfico convencional adaptado a um microscópio para a captura de imagens de microbolhas de ar e um analisador de partículas Zeiss, modelo TGZ3.

A Figura 1 apresenta foto do aparato experimental utilizado por Cassel, Kaufman e Matijevic (1975).

Figura 1 – Foto do aparato experimental utilizado por Cassel, Kaufman e Matijevic (1975) para o estudo do tamanho de microbolhas de ar formados no processo de flotação.

Em relação ao tamanho das microbolhas de ar, os resultados dos ensaios realizados indicaram que o etanol possui maior interferência no tamanho das microbolhas de ar que o ácido láurico, sendo que pequenas adições de etanol (1ml/L) reduzem drasticamente o tamanho das microbolhas. Cassel, Kaufman e Matijevic (1975) também verificaram que a eficiência de remoção de ácido húmico pela flotação diminuiu quando os diâmetros das microbolhas de ar foram superiores a 60 μ m. De acordo com os autores, os resultados alcançados demonstram que o diâmetro ótimo de microbolhas de ar na flotação é de 50 μ m.

Bache e Rasool (2001) realizaram estudo com objetivo de verificar a influência do pré-tratamento (aplicação de polímero) e do gradiente médio de velocidade de floculação na distribuição de tamanho de flocos em unidades de flotação. Os ensaios foram realizados com diferentes águas provenientes de estações de tratamento destinadas ao abastecimento público. Os ensaios foram realizados da seguinte forma: amostras de água eram retiradas do interior das unidades de floculação e transferidas para béqueres quadrados de 2L, nos quais estas amostras eram misturadas por 15 minutos. Após este período de tempo, os misturadores eram desligados por dois minutos com o objetivo de diminuir a velocidade da água e permitir a aquisição das imagens dos flocos. Esta

aquisição era obtida por meio de gravações CCTV (sigla em inglês para *closed-circuit television*) através de câmera focada a 50mm acima da base do béquer.

Bache e Rasool (2001) constataram que a distribuição de tamanho de flocos é função das características da água, do pré-tratamento empregado e dos valores de gradiente médio de velocidade de floculação aplicados. Segundo os autores, o polímero exerceu a principal influência na distribuição de tamanho de flocos quando aplicado (flocos até quatro vezes maiores). Além disto, de acordo com os autores, ficou evidente que, de maneira geral, os flocos possuem baixa capacidade em resistir às forças hidrodinâmicas de ruptura quando elevados valores de gradiente médio de velocidade de floculação são aplicados.

Rodrigues e Rubio (2003) realizaram estudo sobre a distribuição de tamanho de bolhas de ar geradas em dois diferentes sistemas: ar dissolvido (FAD) e ar induzido com o emprego de agente tensoativo (*frother*). Para a realização deste estudo foi desenvolvido equipamento denominado LTM-BSizer, conforme apresentado na Figura 2. Ressalta-se que os ensaios foram realizados com água (*tap water*).

Figura 2 - Equipamento denominado LTM-BSizer empregado por Rodrigues e Rubio (2003) no estudo do tamanho de microbolhas de ar formadas no processo de flotação.

As imagens das bolhas de ar foram obtidas com o emprego de célula de captura de bolhas, microscópio (Zeiss Stemi SV 11), câmera (SONY, Cyber-Shot DSC-S75), fonte

de luz fria de 250W (Schott KL 2500 LCD) posicionada no lado oposto ao da câmera e software específico denominado *Image Tools* (Figura 3).

Figura 3 – Detalhamento do equipamento denominado LTM-BSizer empregado para aquisição de imagens das bolhas de ar por Rodrigues e Rubio (2003).

Rodrigues e Rubio (2003) constataram nos ensaios realizados com ar dissolvido (FAD), que o diâmetro médio das bolhas de ar permaneceram constantes independentemente das pressões de saturação empregadas (p igual a 294, 392, 490 e 588kPa), encontrando-se em sua maior parte na faixa de diâmetro entre 33 e 37,5 μ m. Em relação aos ensaios realizados com ar induzido com emprego de agente tensoativo (*Dowfroth 250*), os autores verificaram que a adição deste produto tem importante ação sobre a distribuição do tamanho de bolhas de ar, sendo que um aumento na adição deste produto (concentrações acima de 5mg/L) promove diminuição considerável no tamanho das microbolhas de ar.

Em relação ao equipamento LTM-BSizer desenvolvido, de acordo com Rodrigues e Rubio (2003), problemas comuns como a qualidade das imagens das bolhas, foco, iluminação e concentração de bolhas são solucionados com o emprego desta técnica. Segundo os autores, os resultados obtidos nesta pesquisa apresentaram pequenas diferenças quando comparados aos resultados alcançados em outros estudos realizados com técnicas tradicionais de análise de imagens. Entretanto, estes acreditam que esta

técnica será útil em futuras pesquisas envolvendo flotação por ar dissolvido e por ar induzido.

Leppinen e Dalziel (2004) estudaram a distribuição do tamanho de microbolhas de ar no interior de tanques de flotação de duas Estações de Tratamento de Água (*Albert e Graincliffe*). Os ensaios foram realizados por meio da inserção de tubo de acrílico (diâmetro de 11,5cm) em diferentes profundidades do interior dos tanques de flotação. Com o auxílio de uma bomba, amostras de água eram succionadas, permitindo a captura de imagens das microbolhas de ar. As imagens capturadas eram armazenadas em computador e analisadas posteriormente através do software *Digiflow*. Segundo os autores, o desenvolvimento deste sistema de aquisição de imagens foi necessário para evitar a imersão da câmera no tanque de flotação.

A Figura 4 apresenta um esquema ilustrativo do sistema de aquisição de imagens empregado na pesquisa desenvolvida por Leppinen e Dalziel (2004).

Figura 4 - Esquema ilustrativo do sistema de aquisição de imagens desenvolvido por Leppinen e Dalziel (2004) e empregado no estudo da distribuição de tamanho microbolhas de ar no interior de tanques de flotação de duas Estações de Tratamento de Água.

Os resultados obtidos através da análise de imagens demonstraram a presença de aglomerados bolhas-floco, os quais os autores denominaram *clusters*, em diferentes profundidades do interior dos tanques de flotação. De acordo com os pesquisadores, os *clusters* agem como redes, coletando maiores quantidades de flocos quando comparados às quantidades de partículas capturadas por microbolhas de ar individuais. Além disto,

foi verificado que os *clusters* possuem velocidades ascensionais superiores às microbolhas de ar individuais, sendo capazes de apresentar velocidade ascendente maior que a velocidade descendente do líquido e ascender à superfície do tanque de flotação.

Ainda em relação aos *clusters*, Leppinen e Dalziel (2004) verificaram que as bolhas de ar maiores ($\varnothing_{\text{bolha}} > 200\mu\text{m}$) são excluídas destes aglomerados devido às forças de cisalhamento do escoamento, as quais são proporcionais à área superficial das microbolhas de ar. Desta forma, segundo os autores, as microbolhas menores são preferencialmente incorporadas nestes aglomerados. De maneira geral, o tamanho médio das microbolhas de ar encontrado nas diferentes profundidades estudadas da zona de contato dos tanques de flotação variaram entre 70 e 84 μm .

Em relação às partículas floculadas, em ambas as Estações de Tratamento de Água analisadas (*Albert e Graincliffe*), os flocos foram gerados a partir da adição de sulfato férrico à água, seguido de floculação (dois estágios) com tempo de detenção de 20min. Os resultados indicaram que os flocos possuem uma variedade de formas e tamanhos, sendo constituídos por minúsculos dendritos. Além disto, Leppinen e Dalziel (2004) verificaram que os *clusters* parecem estar presos pelos grandes grupos de flocos.

Assim, os autores concluem sua pesquisa defendendo a idéia de que os bocais de despressurização de água saturada devem ser projetados com o intuito de promoverem a formação de microbolhas de ar com diâmetro máximo de 150 μm e evitar a fragmentação das partículas floculadas no interior da zona de contato dos tanques de flotação.

Moruzzi (2005) realizou investigação da Distribuição do Tamanho de Microbolhas de Ar (DTMB) em sistemas FAD, submetido a diferentes condições de mistura ($TAS_{ZC} = 25, 40 \text{ e } 60\text{m/h}$ e $TDH_{ZC} = 1,10 \times 10^{-2}, 1,70 \times 10^{-2} \text{ e } 2,5 \times 10^{-2}\text{h}$), pH (6,0; 6,25; 6,50 e 6,75), taxa de recirculação (5, 10 e 20%) e dosagem de coagulante (0 e 2,25mgAl³⁺/L). Os ensaios ocorreram em instalação especialmente concebida denominada Unidade Separadora de Microbolhas (USMB), visando à captura de imagens em movimento e não interferindo nas características originais das microbolhas de ar. O aparato experimental também foi formado por câmera digital, conjunto de lentes para ampliação e plano de laser (Figura 5).

Figura 5 - Ilustração do arranjo experimental utilizado para aquisição de imagens e determinação da distribuição de tamanho de microbolhas de ar por Moruzzi (2005).

Nesta pesquisa desenvolvida por Moruzzi (2005), em todas as condições estudadas, a distribuição do tamanho de microbolhas de ar apresentou valores de diâmetros coerentes com os encontrados na literatura (entre 10 - 120 μ m). Os resultados desta pesquisa demonstraram: *a*) a alteração do par TAS_{ZC} x TDH_{ZC} produziu leve mudança na DTMB, sendo que a fração de bolhas menores que 50 μ m foi maior que 85% em todas as condições investigadas; *b*) a alteração do pH produziu um achatamento na curva DTMB, assim, o diâmetro médio das bolhas foi alterado (27 a 35 μ m) e a fração de microbolhas menores que 50 μ m variou de 75 a 95%; *c*) a taxa de recirculação foi pouco importante na DTMB, onde o diâmetro médio das bolhas variou de 25 a 30 μ m (maior valor observado na taxa de 10%) e a fração de bolhas menores que 50 μ m oscilou entre 90 e 95%; *d*) a aplicação do coagulante teve pouca interferência no diâmetro médio das bolhas (27 μ m na ausência e 29 μ m na presença de Al^{3+}).

Além disto, Moruzzi (2005) também realizou uma investigação preliminar da distribuição de tamanho de flocos através do método não intrusivo utilizado no estudo das microbolhas de ar. A aquisição das imagens ocorreu na entrada do flotador e objetivou a obtenção de amostras indeformadas. Nestes ensaios, foram estudados apenas dois diferentes valores de gradiente médio de velocidade de floculação (50 e 90 s^{-1}) para um mesmo tempo de floculação (34min). O tamanho dos flocos foi determinado através do princípio da esfera equivalente de mesma área de projeção no plano. Os resultados demonstraram que a variação no valor de gradiente médio de

floculação para um mesmo tempo de floculação estudado interfere na distribuição de tamanho dos flocos. Desta forma, uma diminuição no gradiente médio de velocidade de floculação desloca a curva de distribuição de tamanho para as faixas de maior tamanho.

Em relação ao equipamento desenvolvido para a aquisição e análise das imagens de microbolhas de ar e flocos, Moruzzi (2005) constatou que este constitui alternativa viável do ponto de vista técnico, tendo como principais vantagens a simplicidade, a flexibilidade, a possibilidade de coleta de amostras indeformadas e o baixo custo. Contudo, o autor destaca o elevado tempo gasto para obtenção dos resultados, como a principal desvantagem do método empregado.

Lee et al. (2007) realizaram investigação para determinar o tamanho das partículas flotadas durante a FAD. Os ensaios foram realizados em sistema de batelada em escala de laboratório, nos quais foram empregados como amostras areia e carvão ativado. Durante os ensaios, as amostras eram peneiradas para a obtenção de diversos tamanhos, e posteriormente, estas eram coaguladas e floculadas. A distribuição do tamanho das partículas era realizada por equipamento denominado *Accusizer* 780A, USA.

Este estudo demonstrou que há um tamanho limite de floco para a flotação, visto que se parte da suposição de que há espaços vazios entre as microbolhas de ar, pelos quais os flocos podem escapar. Segundo Lee et al. (2007), o tamanho destes vazios depende do tamanho das microbolhas de ar e da forma como estas se aglomeram na massa líquida. Em geral, o tamanho limite do floco para remoção por flotação foi em torno de 30 μ m para ambas as amostras de areia e carvão ativado, analisadas neste estudo. Desta forma, com o objetivo de maximizar a remoção de sólidos suspensos no processo de flotação por ar dissolvido, os autores afirmam que os flocos devem ser floculados para atingirem tamanhos superiores a 30 μ m.

Han, Kim T. e Kim J. (2007) realizaram estudo em escala de laboratório com o objetivo de analisar a relação entre os tamanhos de microbolhas de ar e de partículas na eficiência de remoção por flotação com o emprego da análise de imagens. Durante os ensaios uma amostra de 20ml da água sintética (turbidez de 20NTU; pH de 7.6; $\Theta_{\text{água}}$ de 15°C) previamente coagulada e floculada era coletada por meio de pipeta (diâmetro de 10mm) e injetada no interior de uma célula de PVC (dimensões: 2x100x100mm). Uma

câmera digital (*Nikon Coolpix 4500*) acoplada a um microscópio trifocal (*Meiji Techno Co.*) era utilizada para a captura das imagens, as quais eram analisadas posteriormente pelo software *SigmaScan Pro*, conforme esquema ilustrativo apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema ilustrativo do processo de aquisição de imagens empregado por Han, Kim T. e Kim J. (2007).

Neste estudo, Han, Kim T. e Kim J. (2007) também analisaram o efeito da razão de recirculação (4 e 10%) e da pressão de saturação (2, 3 e 5atm) na eficiência da FAD. Os resultados demonstraram que a remoção de partículas em suspensão foi maior quando foi empregada razão de recirculação de 10% e formação de flocos na faixa de 30 a 60 μ m. Segundo os autores, o aumento na concentração em volume de bolhas de ar aumentou a chance de colisão entre bolhas e partículas e, conseqüentemente, promoveu uma eficiente adesão das bolhas aos flocos.

Em relação às diferentes pressões de saturação investigadas (2, 3 e 5atm), foi constatado que o aumento na pressão de saturação promoveu a formação de bolhas de ar em faixas de menor tamanho (20 a 50 μ m), enquanto que a diminuição nos valores de pressão de saturação promoveram a formação de bolhas de ar em faixas de maior tamanho (60 a 100 μ m) e, conseqüentemente, uma menor concentração em número de bolhas. Além disto, foi constatado que quanto maior a pressão de saturação, maior a eficiência da flotação para uma mesma razão de recirculação e faixa de tamanho de partículas.

Segundo os autores, as condições operacionais adequadas para a flotação podem ser determinadas a partir do tamanho dos flocos. Desta forma, se um floco grande é formado, a pressão de saturação e a razão de recirculação podem ser reduzidas. De acordo com Park, Kim T. e Kim Y. (2007), uma melhor eficiência de clarificação é obtida quando o floco possui tamanho superior ao das microbolhas de ar.

Jönsson, Ljunggren e Lundh (2007) investigaram por meio da análise de imagens, a velocidade ascensional de aglomerados bolhas-floco formados em processos biológicos (MBBR) e químicos ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Os ensaios foram realizados em tubo de acrílico transparente preenchido com água. As velocidades ascensionais dos aglomerados bolhas-floco foram obtidas por meio da utilização de boroscópio com câmera CCD e gravador digital de vídeo (taxa de frames empregada - 25frames/s) instalados a poucos milímetros abaixo da superfície da água. Os resultados demonstraram velocidades ascensionais dos aglomerados no intervalo de 1 a 12mm/s para os flocos formados no processo biológico e no intervalo de 1 a 8mm/s para os flocos formados no processo químico. Os autores também constataram que o aumento nos valores de velocidade ascensional estão relacionados com o aumento no número de bolhas aderidas aos flocos.

Kwak et al. (2009) desenvolveram pesquisa com o objetivo de verificar os valores reais de velocidade ascensional dos aglomerados bolhas-floco e compará-los com os valores de velocidade obtidos teoricamente por meio de modelagem matemática.

Os ensaios para obtenção das velocidades dos aglomerados foram realizados em equipamento *jar tester* adaptado com suprimento de ar e sistema para aquisição de imagens denominado PIA (sigla em inglês para *Particle Image Analyzer*). O PIA é composto por microscópio, câmera CCD de alta velocidade e software específico para aquisição e análise de imagens (*Image-Pro Plus v. 5.0*) conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema ilustrativo e foto do equipamento PIA empregado para a obtenção das velocidades ascensionais de aglomerados bolhas-floco formados no processo de flotação (Fonte: KWAK et al., 2009).

Nestes estudos realizados por Kwak et al. (2009), os valores reais de velocidade ascensional dos aglomerados bolhas-floco observados experimentalmente através do PIA foram comparados aos resultados obtidos através da modelação matemática desenvolvida com base na modelação proposta por Fukushi, Tambo e Matsui (1995) e modificada por Leppinen, Dalziel e Linden (2001).

Os resultados alcançados demonstraram que não houveram similaridades entre os valores experimentais e os valores teóricos de velocidade ascensional dos aglomerados bolhas-floco. Kwak et al. (2009) levantaram três possíveis causas para o ocorrido: 1) a interação entre bolhas e flocos não é interrompida pela saída dos aglomerados da zona de contato do tanque FAD, mas esta interação continua na zona de separação; 2) pode haver uma ligeira alteração no tamanho das microbolhas de ar durante sua ascensão no interior do tanque de flotação, devido à diminuição na pressão exercida pela água; 3) as bolhas aderidas aos flocos, ao estarem bem próximas entre si podem se tocar e sofrer coalescência na superfície dos flocos.

Os autores não conseguiram comprovar estas hipóteses devido às dificuldades encontradas durante o tratamento das imagens como, por exemplo, o sombreamento e o bloqueio visual produzidos pelos flocos, os quais impossibilitaram uma investigação mais detalhada do comportamento das microbolhas de ar. Também não foi possível constatar o aumento no tamanho destas microbolhas durante sua ascensão na coluna d'água, bem como, realizar a contagem destas após a aderência ao floco. De acordo com os autores, são necessários estudos adicionais para uma melhor compreensão das interações ocorridas entre bolhas e flocos no interior de tanques de flotação. Contudo, Kwak et al. (2009) acreditam que as diferenças constatadas entre os valores teóricos e experimentais de velocidade ascensional dos aglomerados bolhas-floco podem ser atribuídos a uma ou mais hipóteses apresentadas e discutidas anteriormente.

Em estudo desenvolvido por Sohn et al. (2009), a interferência do tamanho de flocos na eficiência da FAD e a velocidade ascensional das microbolhas de ar foram investigadas a partir da aquisição e análise de imagens. Os ensaios foram realizados com o PIA (mesmo equipamento empregado por Kwak et al., 2009), o qual foi utilizado para a medição do tamanho de bolhas e flocos, bem como, na determinação das velocidades de flotação e sedimentação dos aglomerados, e o equipamento PDA (sigla em inglês para

Photometric Dispersion Analyzer, PDA 2000, Rank Brothers Ltd, UK), através do qual foi possível analisar de forma indireta a evolução dos tamanhos dos flocos nas diferentes condições de floculação analisadas.

Os resultados demonstraram que o tamanho das partículas floculadas aumentam à medida que se aumenta o tempo de floculação, porém, após um período de tempo, esse aumento não é considerado significativo. De acordo com Sohn et al. (2009), a combinação de gradientes médios de velocidade de floculação de 70 e 50s⁻¹ promovem uma melhor eficiência da FAD.

Em relação à velocidade ascensional das microbolhas de ar, os valores obtidos experimentalmente foram comparados àqueles apresentados pela American Water Work Association¹ (1999 apud SOHN et al., 2009, p. 1945). Foi constatado que os valores de velocidade ascensional obtidos no estudo desenvolvido por Sohn et al. (2009), foram ligeiramente inferiores àqueles obtidos teoricamente. Segundo os autores, tal fato ocorreu devido às condições experimentais, as quais são diferentes das condições ideais.

Oliveira, Rodrigues e Rubio (2010) realizaram pesquisa com o objetivo de desenvolver e validar técnica denominada “Caracterização de Flocos Aerados” (CFA), utilizada para caracterizar sistemas multifásicos (com microbolhas de ar) em escala de laboratório. Segundo os autores, o CFA foi inspirado em técnica conhecida como LubaTube, a qual segundo Malysa et al.² (1999 apud OLIVEIRA, RODRIGUES e RUBIO, 2010, p. 37), é utilizada há alguns anos pelo Centro de Pesquisa Canadense Sycrude no estudo da flotação do betume no processamento mineral.

O CFA é composto por duas câmeras digitais responsáveis pela aquisição de vídeos do escoamento e captura de imagens dos flocos e/ou microbolhas de ar, microscópio, fonte de iluminação (instalada no lado oposto às câmeras) e software utilizado para a aquisição e tratamento de imagens (*Image Tool v.3.0*), conforme apresentado na Figura 8.

¹American Water Works Association. **Water Quality and Treatment**, 5th Ed., McGraw Hill: 7.47-7.61.

²MALYSA, K.; NG, S.; CYMBALISTY, L.; CZARNECKI, J.; MASLIYAH, J. A method of visualization and characterization of aggregate flow inside a separation vessel, Part 1. Size, shape and rise velocity of the aggregates. **International Journal of Mineral Processing**, v. 55, p. 171-188.

Figura 8 - Esquema ilustrativo do CFA: (1) câmara de saturação; (2) célula de flotação; (3) câmera digital para filmagem do escoamento; (4) tubo de ascensão; (5) fontes de iluminação; (6) microscópio óptico; (7) câmera digital para captura das imagens dos aglomerados; (8) monitor para visualização das imagens (Fonte: OLIVEIRA; RODRIGUES; RUBIO, 2010).

Neste estudo, foram verificadas que para a solução de caulinita ($2g_{\text{caulinita}}/2L_{\text{água}}$), a qual foi coagulada com sulfato de alumínio ($2,5 \times 10^{-5} \text{ mol Al}^{3+}/g_{\text{caulinita}}$), as partículas floculadas apresentaram distribuição de tamanho entre 0,5 e 3,3mm e velocidade ascensional dos aglomerados na faixa de 35 a 105m/h. Já as microbolhas de ar apresentaram tamanho entre 10 e 230 μm , com diâmetro médio de 73 μm .

3.4 Pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de modelos matemáticos para a flotação por ar dissolvido

Diversas pesquisas tem sido realizadas com o intuito de se desenvolverem modelos matemáticos para o processo de flotação por ar dissolvido, possibilitando desta forma, uma melhor compreensão dos parâmetros envolvidos no processo (EDZWALD et al. 1990; MALLEY; EDZWALD, 1991; REALI, 1991; EDZWALD, 1995; FUKUSHI; TAMBO; MATSUI, 1995; LIERS; BAEYENS; MOCHTAR, 1996; MATSUI; FUKUSHI; TAMBO, 1998; LEPPINEN, 1999; SHAWWA; SMITH, 2000; HAN; KIM; DOCKKO, 2001; LEPPINEN; DALZIEL; LINDEN, 2001; HAARHOFF; EDZWALD, 2004; BONDELIND et al., 2010; EDZWALD, 2010; BONDELIND; SASIC; BERGDAHL, 2012).

Nesta revisão bibliográfica será realizado um detalhamento do modelo matemático proposto por Reali (1991), visto que este modelo é objeto de estudo da presente tese.

Na pesquisa realizada por Reali (1991), este desenvolveu uma equação teórica capaz de fornecer subsídios para uma melhor compreensão de como o tamanho de flocos e microbolhas de ar, razão de recirculação e concentração de saturação de ar (parâmetros fundamentais na flotação por ar dissolvido) influem na eficiência do processo.

Para o desenvolvimento desta equação foi admitido que as microbolhas de ar e partículas floculadas apresentam diâmetros esféricos uniformes, se encontrando uniformemente distribuídas na massa líquida e arranjadas na forma cúbica centrada, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Arranjo hipotético das microbolhas de ar e flocos no interior de reatores FAD segundo Reali (1991).

Em relação à quantidade de ar necessária para que um determinado floco se torne flutuável, segundo Reali (1991), é necessário que um número de bolhas de ar seja aderido a determinado floco, de forma que a velocidade ascensional do aglomerado seja superior a taxa de aplicação superficial empregada no reator. Assim, através da equação clássica de Stokes e supondo que estejam presentes no reator somente bolhas de ar com tamanho uniforme, a Equação 1 é obtida.

$$V_{bf} = \frac{g}{18 \times \nu_{\text{água}}} \times (d_f^3 + N_b \times \phi_{\text{bolha}}^3)^{2/3} \times \left[1 - \left(\frac{\rho_f \times d_f^3 + \rho_{\text{bolha}} \times \phi_{\text{bolha}}^3 \times N_b}{\rho_{\text{água}} \times (d_f^3 + N_b \times \phi_{\text{bolha}}^3)} \right) \right] \times 10^{-12} \times 86400 \quad (1)$$

em que:

V_{bf} : velocidade ascensional dos aglomerados bolhas-floco (m/d);

g : aceleração da gravidade (igual a $9,81\text{m.s}^{-2}$);

$\nu_{\text{água}}$: viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

d_f : diâmetro do floco (μm);

N_b : número de bolhas de ar aderidas ao floco;

$\varnothing_{\text{bolha}}$: diâmetro da microbolha de ar (μm);

ρ_f : massa específica do floco (Kg.m^{-3});

ρ_{bolha} : massa específica da microbolha de ar (Kg.m^{-3}).

A partir da Equação 1, Reali (1991) desenvolveu curvas relacionando a velocidade ascensional dos aglomerados bolhas-floco em função do número de microbolhas aderidas aos flocos, as quais são apresentadas nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Velocidade ascensional (ou de sedimentação) de flocos em função do nº de bolhas aderidas à sua estrutura e em função do diâmetro da bolha (floco esférico com $\rho_f/\rho_{\text{água}}$ igual a 1,003 e $\Theta_{\text{água}}$ de 20°C) – Fonte: Reali, 1991.

Figura 11 - Velocidade ascensional (ou de sedimentação) de flocos em função do nº de bolhas aderidas à sua estrutura e em função do diâmetro da bolha (foco esférico com $\rho_f/\rho_{\text{água}}$ igual a 1,014 e $\Theta_{\text{água}}$ de 20°C) – Fonte: Reali, 1991.

Segundo Reali (1991), através das Figuras 10 e 11 é possível visualizar a influência da densidade dos flocos na velocidade de flotação e se ter uma idéia do número de microbolhas de ar com certo diâmetro (uniforme) que teria de colidir efetivamente com cada floco a fim de se atingir uma dada velocidade ascensional superior à taxa de aplicação superficial adotada no reator.

Com referência ao estudo de colisão entre microbolhas de ar e flocos, Reali (1991) realizou uma analogia deste fenômeno com aquele ocorrido na colisão entre partículas desestabilizadas em campo turbulento durante o processo de coagulação. Assim, com objetivo de simplificar este estudo, foram realizadas algumas suposições, como: *i)* bolhas possuem diâmetros idênticos; *ii)* flocos em suspensão possuem forma esférica e mesmo tamanho; *iii)* concentração em número de flocos é constante, após atingido o regime de equilíbrio; *iv)* efeitos hidrodinâmicos na taxa de colisão entre partículas são considerados desprezíveis; *v)* não ocorre aglutinação entre as microbolhas de ar; *vi)* apenas as colisões entre flocos e microbolhas são efetivas; *vii)* o aumento no volume dos flocos devido à incorporação de microbolhas de ar é desprezível.

De acordo com Reali (1991) as colisões ocorridas entre as microbolhas de ar e os flocos no interior dos reatores de flotação são devidas principalmente a dois fatores: *i)* fluxo turbulento; *ii)* velocidade ascensional das microbolhas de ar em relação à velocidade dos flocos. Para o estudo da taxa de colisões entre bolhas e flocos induzidas pelo escoamento turbulento, Reali (1991) adaptou expressões descritas por Amirtharajah e Trusler³ (1986 apud REALI, 1991) e para o estudo sobre as colisões devidas à velocidade relativa entre bolhas e flocos, Reali (1991) considerou que estas ocorrem no interior de “cilindros de colisão”, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - "Cilindro de Colisão" utilizado por Reali (1991) no estudo de colisões entre bolhas de ar e flocos no processo de flotação.

Desta forma, a análise conjunta destes dois modelos de colisão permitiu a obtenção da Equação 2 (equação final do modelo proposto por Reali, 1991).

$$\beta \times t_d = - \left\{ \ln \left[1 - \frac{N_b \times C_f}{S_v \times r} \left(\frac{\phi_{bolhas}}{d_f} \right)^3 \right] \times \frac{\pi \times (1+r) \times d_f^3}{6 \times C_f \times \alpha} \right\} \quad (2)$$

em que:

β : define a efetividade das colisões entre microbolhas de ar e flocos;

t_d : tempo de detenção teórico;

C_f : concentração em volume de flocos ($m^3_{flocos}/m^3_{\text{água}}$);

S_v : concentração em volume de ar disponível na recirculação ($m^3_{ar}/m^3_{\text{água}}$);

r : razão de recirculação;

³AMIRTHARAJAH, A.; TRUSLER, S. L. Destabilization of particles by turbulent rapid mixing. **Journal of Environmental Engineering**, v. 112, n. 6, p. 1085-1108, 1986.

α : este parâmetro assume diferentes valores de acordo com a microescala de turbulência Kolmogorov (η). É ressaltado que α_1 e α_2 referem-se às colisões devidas ao fluxo turbulento, enquanto que α_3 refere-se às colisões devidas à velocidade ascensional das microbolhas de ar em relação à velocidade dos flocos.

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_3 \text{ para } \eta > (d_f + \phi_{bolha})/2$$

$$\alpha = \alpha_2 + \alpha_3 \text{ para } \eta < (d_f + \phi_{bolha})/2$$

onde,

$$\alpha_1 = 0,051 \times (d_f + \phi_{bolha})^3 \times \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{0,5}$$

$$\alpha_2 = 0,427 \times (d_f + \phi_{bolha})^{7/3} \times (\varepsilon)^{1/3}$$

$$\alpha_3 = \frac{\pi}{4} \times (\phi_{bolha} + d_f)^2 \times \left| \frac{g}{18 \cdot \nu} \times \left(\phi_{bolha}^2 + \frac{\Delta p \times d_f^2}{2} \right) - \frac{v_{bf}}{2} \right|$$

$$\Delta p = \frac{\rho_f}{\rho_{\text{água}}} - 1$$

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}$$

Na Equação 2, de acordo com Reali (1991), o valor de t_d pode ser interpretado como sendo o tempo de detenção teórico que se deve ter na zona de contato do tanque de flotação para que se atinja o número N_b de bolhas aderidas em cada floco. O fator β define a efetividade dos choques entre microbolhas de ar e flocos, estando relacionado às características dos flocos (hidrofobicidade e forma estrutural) e das microbolhas de ar (tamanho). Além disto, este fator apresenta valor sempre menor ou igual a unidade. Assim, em uma situação ideal, o fator β é igual a 1, ou seja, todas as colisões ocorridas entre microbolhas de ar e flocos são efetivas e t_d é o tempo teórico necessário para que todos os flocos atinjam uma velocidade estipulada. Agora, se for assumido um certo valor de t_d , é possível calcular o inverso de β (ou seja, $1/\beta$), o qual representa o número teórico de choques por floco “disponíveis” no reator para fornecer pelo menos 1 choque efetivo.

Desta forma, segundo Reali (1991), quanto maior o valor encontrado de $\beta \cdot t_d$, pior é a situação, pois considerando o t_d fixo, para se atingir a eficiência desejada seria

necessário ou um tempo de detenção maior (fixando-se β) ou maiores valores de β , ou seja, flocos com maior número de sítios hidrófobos, por exemplo.

Em relação à influência do tamanho de flocos e microbolhas de ar na flotação, Reali (1991) realizou simulações com o modelo matemático proposto, verificando que um aumento no tamanho de flocos e/ou no tamanho de microbolhas de ar (respeitando o tamanho máximo de bolha para que se garanta uma ligação bolha/floco estável) é interessante do ponto de vista da cinética da flotação, ou seja, promove aumento na eficiência do processo. Entretanto, o fator β incluído no modelo, segundo Reali (1991), está mais relacionado ao número de sítios hidrófobos presentes nos flocos, não considerando se a intensidade de ligação entre bolhas e flocos é suficiente para superar a tendência de escape da bolha devido ao empuxo atuante sobre a mesma, o qual depende de seu tamanho.

Com referência à influência na FAD dos parâmetros razão de recirculação (r) e concentração em volume de ar disponível na recirculação (S_v), tem-se que de acordo com o modelo matemático proposto por Reali (1991), um aumento na quantidade de ar fornecida ao sistema (produto $S_v.r$) promove aumento considerável na eficiência do processo. Segundo este modelo matemático, caso se pretenda aumentar o valor do produto $S_v.r$, é preferível que se aumente o máximo possível o valor de S_v através do aumento da pressão de saturação. Além disto, é observado que a medida que se tenha valores elevados de razão de recirculação ($0,5 < r < 1,0$), os ganhos percentuais na eficiência da FAD são cada vez menores.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Considerações Gerais

O presente estudo foi desenvolvido nos setores de equipamentos de bancada e de instalações piloto do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas – LATAR, pertencente ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP.

Os ensaios foram divididos em duas fases: *Fase 1* - ensaios preliminares realizados em escala de laboratório (flotatestes); *Fase 2* - ensaios realizados em escala piloto (unidade FAD).

Deve ser destacado que os valores de gradiente médio de velocidade de floculação (G) empregados nos ensaios realizados em escala piloto foram determinados experimentalmente por meio de sensor de torque especialmente adquirido para esta pesquisa. Detalhes sobre esta determinação experimental serão apresentados no Apêndice A.

Em relação às análises físico-químicas realizadas nesta pesquisa, estas foram realizadas segundo as determinações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005).

4.2 Água de Estudo

Com o objetivo de proporcionar um maior controle das condições experimentais, os ensaios foram realizados com água sintética preparada a partir da adição de $8,5\text{mg.L}^{-1}$ de caulinita (marca *FLUKA Analytical*) e de $1,0\text{mg.L}^{-1}$ de ácido húmico (marca *ALDRICH Chemistry*) à água proveniente de lençol subterrâneo localizado no campus da EESC – USP.

A água sintética foi coagulada com a aplicação de $1,9\text{mg.L}^{-1}$ de Al^{3+} ($22,5\text{mg.L}^{-1}$ de sulfato de alumínio – marca VETEC P.A. 277). Para manter o pH na faixa ótima de

coagulação ($6,6 \pm 0,05$), foi utilizada solução de carbonato de sódio (marca GENCO). Estudo preliminar em unidade de flotação por batelada (equipamento denominado flotatestes) foi realizado com objetivo de obter o pH e dosagem ótima de coagulante para a água em estudo. Os resultados completos deste estudo preliminar podem ser obtidos nos trabalhos desenvolvidos por Araujo (2010) e Maia (2010).

É ressaltado que a água sintética empregada nesta pesquisa foi utilizada em outros estudos desenvolvidos no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP dentro linha mais ampla de pesquisa, sob a coordenação do Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali, na qual o presente trabalho se insere. Dentre estes, podem ser citados os estudos desenvolvidos por Reali e Patrizzi (2007), Moruzzi e Reali (2008), Araujo (2010), Maia (2010), Escher (2011) e Souza (2012).

A Tabela 1 apresenta as características da água sintética utilizada nesta pesquisa.

Tabela 1 - Características da água sintética

Parâmetro	Faixa de Valores
Temperatura (°C)	$26,0 \pm 0,5$
Turbidez (NTU)	$7,5 \pm 0,2$
Cor Aparente (uC)	38 ± 1
Cor Real (uC)	$3,8 \pm 0,1$
Alcalinidade ($\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$)	$29,8 \pm 0,6$
Condutividade ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$59,3 \pm 0,8$
UV _{254nm} (cm^{-1})	$0,128 \pm 0,004$
pH	$6,6 \pm 0,1$

4.3 Instalações e Equipamentos

4.3.1 Flotatestes

O Flotatestes é um equipamento em escala de laboratório e com alimentação por batelada, que possui quatro colunas de flotação independentes, construídas em acrílico e possuindo cada coluna um agitador removível, conforme desenvolvido por Reali (1991). Estas colunas funcionam como unidades de floculação e flotação, sendo que para a realização desta última, a retirada dos agitadores, os quais são removíveis, é necessária. Além disso, as quatro colunas do flotatestes dispõem de pontos de coleta de

amostras a diferentes alturas, proporcionando o estudo de diferentes velocidades de flotação.

Interligada às quatro colunas de flotação há a câmara de saturação pressurizada, na qual é borbulhado ar comprimido à alta pressão, até que a mesma atinja o ponto de saturação para dadas temperatura e pressão em estudos.

A Figura 13 apresenta o Flotateste utilizado nesta pesquisa, o qual foi desenvolvido por Reali (1991).

Figura 13 - Flotateste utilizado nos ensaios em escala de laboratório (desenvolvido por Reali, 1991)

4.3.2 Unidade Piloto

A unidade piloto de flotação por ar dissolvido de escoamento contínuo empregada na Fase 2 desta pesquisa é constituída das seguintes partes principais: *i)* reservatórios de água com capacidade de 15m^3 cada, onde o ácido húmico (*ALDRICH Chemistry*) e a caulinita (*FLUKA Analytical*) são adicionados à água proveniente de lençol subterrâneo localizado no campus da EESC – USP e misturados através de agitadores submersos instalados no interior dos reservatórios; *ii)* aquecedores a gás in-line instalados paralelamente na alimentação de água sintética antes da unidade de mistura rápida; *iii)* unidade de mistura rápida tubular in-line responsável pela mistura rápida do coagulante; *iv)* compartimentos de floculação, nos quais os misturadores verticais são controlados eletronicamente operando na mesma rotação; *v)* unidade de flotação por ar dissolvido retangular dividida em zona de contato e zona de separação; *vi)* câmara de saturação na qual a tubulação efluente é conectada a três válvulas do tipo agulha instaladas no fundo da zona de contato (sistema de despressurização); *vii)* sistema dosador para controle do processo de coagulação (bombas dosadoras e reservatórios para armazenamento de

coagulante e alcalinizante); *viii*) bombas centrífugas associadas a medidores de escoamento eletromagnéticos e rotâmetros que alimentam a unidade piloto com água sintética e pressurizam o escoamento na câmara de saturação.

Duas diferentes configurações da unidade piloto de flotação foram utilizadas nesta pesquisa. Nos *Ensaio Preliminares* realizados na Fase 2, a unidade FAD foi operada em três diferentes estágios de floculação (1, 2 e 3 estágios), através dos quais foi possível variar os tempos de floculação empregados nesta fase (T de 5, 11 e 16min), mantendo os demais parâmetros operacionais constantes.

Já nos *Ensaio Principais e Complementares* da Fase 2, todos os ensaios foram realizados com a utilização de dois estágios de floculação, ou seja, duas câmaras de floculação. Nesta fase, a diminuição do tempo de floculação empregado foi possível por meio do aumento da vazão afluyente e da utilização de bomba de sucção instalada na parte inferior da segunda câmara de floculação, a qual ao succionar determinada vazão de água, que era descartada, permitia a operação da unidade piloto com os demais parâmetros operacionais da flotação constantes.

As Figuras 14 e 15 apresentam as configurações da unidade piloto de flotação utilizadas.

**Figura 14 - Configuração da unidade piloto de FAD empregada nos *Ensaio Preliminares*.
a) planta; b) corte. (unidade em metros)**

Figura 15 - Configuração da unidade piloto de FAD empregada nos *Ensaio Principais e Complementares*.
a) planta; b) corte. (unidade em metros)

4.4 Sistema de Aquisição de Imagens

A caracterização da distribuição de tamanho de partículas floculadas (flocos) e microbolhas de ar, bem como a análise dos aglomerados bolhas-floco em termos de número de microbolhas de ar aderidas e velocidade ascensional, foi realizada com equipamento especialmente desenvolvido para a esta pesquisa, o qual foi composto por câmera CCD (*charge-coupled device*) especial de alta luminosidade (*QImaging QICAM FAST MONO 12-bit*) acoplada a um colposcópio (*Olympus OCS-3*) e a um microcomputador com software específico para a captura e análise das imagens (*Image-Pro Plus 7.01*). A Figura 16 apresenta o esquema ilustrativo do sistema de aquisição e análise de imagens desenvolvido nesta pesquisa.

Figura 16 - Esquema ilustrativo do sistema de aquisição e análise de imagens desenvolvido nesta pesquisa para a aquisição de seqüências de imagens de flocos, microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco.

Deve ser ressaltado que o software *Image-Pro Plus 7.01* foi utilizado nesta pesquisa por tratar-se de uma importante ferramenta para a aquisição e o processamento de imagens, possuindo diversas aplicações científicas, médicas e industriais, além de ter sido empregado em importantes pesquisas desenvolvidas por Kwak et al. (2007 e 2009) e Sohn et al. (2009), as quais tiveram como objetivo a caracterização de flocos, microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco no processo de flotação.

Em relação ao colposcópio empregado nesta pesquisa (Figura 17), trata-se de um equipamento desenvolvido e utilizado na área médica (ginecologia), sendo que sua utilização foi por este apresentar distância focal ajustável de até 220mm, além de possuir uma fonte de luz intensa (150W) e elevada capacidade de ampliação (zoom de 7,9 até 23,5X). É ressaltado que o acoplamento da câmera CCD de alta luminosidade ao colposcópio foi possível a partir de dispositivo especialmente desenvolvido para o presente trabalho.

Figura 17 – Colposcópio Olympus OCS-3.

Nos ensaios realizados em *escala de laboratório* (Fase 1), a aquisição de imagens foi realizada em flotatestes providos de coluna de floculação/flotação construída em vidro, a qual permitiu a aquisição externa das imagens, constituindo-se em sistema não intrusivo. Todas as seqüências de imagens foram obtidas a 25cm da base da coluna de flotação e após a retirada das hastes utilizadas para a floculação, como pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 - Esquema ilustrativo do flotatesto utilizado para a aquisição de imagens na Fase 1 (escala de laboratório).

Nos ensaios realizados em *escala piloto* (Fase 2), a aquisição das imagens das partículas floculadas, microbolhas de ar e dos aglomerados bolhas-floco foi realizada por meio de sistema de sucção de amostras especialmente desenvolvido para esta pesquisa (sistema similar ao empregado por Leppinen e Dalziel, 2004). Este sistema foi constituído por bomba, responsável pela sucção de amostras e uma coluna retangular de amostragem (dimensões internas de 7x3cm e altura de 115cm) na qual era possível a aquisição de imagens.

O desenvolvimento do sistema coluna de amostragem/bomba foi necessário, pois não foi possível a aquisição de imagens de partículas floculadas, microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco através da abertura localizada na lateral do tanque de flotação (idéia inicial desta pesquisa). Tal fato foi devido à grande turbulência verificada no interior da zona de contato, a qual impossibilitou a aquisição de imagens com qualidade suficiente para a análise posterior.

Durante os ensaios, a coluna de vidro (espessura de 4mm) era inserida verticalmente na saída da zona de contato do flotador (Figura 19) e através da bomba, amostras de água contendo as partículas em estudo eram succionadas lentamente e visualizadas na coluna de amostragem, onde o sistema de aquisição estava instalado.

Figura 19 – Esquema ilustrativo do posicionamento da coluna de amostragem no interior do tanque de flotação durante o processo de aquisição das imagens.

É ressaltado que no início da operação do sistema, após o preenchimento da coluna de amostragem, a velocidade no interior desta coluna era ajustada a um valor igual à taxa de aplicação superficial empregada naquele momento na zona de contato (TAS_{ZC}), com o objetivo de evitar o possível rompimento dos flocos. Após esta operação, a bomba era desligada e o fluxo de amostras era controlado pela abertura ou fechamento de registro localizado na saída desta coluna. No momento da aquisição de imagens, este registro era lentamente fechado com o intuito de diminuir a velocidade das partículas e/ou bolhas no interior da coluna e favorecer a amostragem. Ressalta-se que toda vazão succionada era descartada durante a operação, não retornando ao tanque de flotação.

As Figuras 20 e 21 apresentam fotos do sistema aquisição de imagens instalado na unidade piloto de FAD.

Figura 20 - Sistema de Aquisição de Imagens instalado na unidade piloto de FAD.

Figura 21 - Detalhes: a) coluna de sucção de amostras; b) bomba utilizada para sucção.

4.4.1 Procedimentos para Aquisição e Tratamento de Imagens

Os procedimentos empregados para a aquisição e tratamento de imagens foram estabelecidos após a realização de uma série de testes, através dos quais foi possível o conhecimento das diversas ferramentas fornecidas pelo software, bem como a familiarização com a operação do colposcópio e dos demais equipamentos utilizados.

Deve ser salientado que o tratamento das seqüências de imagens foi um processo manual e trabalhoso, no qual foi necessária a análise *frame a frame* de cada seqüência obtida experimentalmente para a localização dos objetos de interesse (flocos, bolhas ou

aglomerados posicionados no foco ajustado do equipamento de aquisição de imagens), os quais, por sua vez, foram caracterizados individualmente. Tal processo foi realizado com o objetivo de diminuir o erro inerente ao processo de tratamento de imagens.

Assim, foram selecionadas imagens de 100 partículas floculadas para cada condição de floculação investigada (totalizando 1.800 partículas floculadas analisadas), imagens de 200 microbolhas de ar para cada concentração em massa de ar analisada (totalizando 800 microbolhas de ar analisadas) e imagens de 32 aglomerados bolhas-floco. Portanto, no total foram utilizadas mais de 2.500 imagens, através das quais foi possível o estudo da distribuição do tamanho de flocos e microbolhas de ar, bem como do comportamento dos aglomerados bolhas-floco no interior de tanques de flotação.

A maior dificuldade encontrada no tratamento das imagens ocorreu durante a caracterização dos agregados bolhas-floco. Tal fato foi devido à complexidade verificada na contagem e caracterização do número de microbolhas de ar aderidas em cada floco. Em diversas situações, as microbolhas de ar aderidas encontravam-se próximas entre si e em outras vezes, um sombreamento destas microbolhas por parte dos flocos era verificado, o que impedia a determinação correta das dimensões das partículas floculadas, bem como, das bolhas de ar em análise.

A seguir são apresentados os passos básicos empregados na aquisição e tratamento das imagens em escala piloto. Em relação à aquisição de imagens em escala de laboratório, como comentado anteriormente, esta foi realizada de forma não intrusiva a partir de ponto localizado à 25cm da base da coluna de flotação (flotateste). Desta forma, após ligado o computador, a câmera CCD e o colposcópio, foram seguidos os procedimentos a partir do Passo nº 3.

Com referência ao tratamento das seqüências de imagens, os procedimentos utilizados para as imagens obtidas em escala piloto foram idênticos àqueles empregados nas imagens obtidas em escala de laboratório.

a) Passos básicos para o processo de aquisição de imagens em escala piloto

1. Com a unidade piloto operando com todos os parâmetros de coagulação, floculação e flotação fixos para uma determinada condição em estudo e após o processo FAD alcançar o ponto de equilíbrio dinâmico (eficiência de clarificação constante), o sistema de aquisição de imagens (bomba de sucção, computador, colposcópio e câmera CCD) era ligado;
2. Com a coluna de amostragem preenchida por água, a vazão era regulada, de modo que a velocidade da água no interior da coluna ficasse igual à taxa de aplicação superficial da zona de contato da unidade piloto (TAS_{ZC});
3. A posição do colposcópio (por exemplo rotação, inclinação), a dioptria, o filtro (*green*) e o foco em um ponto de interesse no interior da coluna de amostragem eram ajustados. É ressaltado que o ajuste da dioptria era fundamental, pois este ajuste permitia manter o foco da imagem no caso de ampliação da mesma;
4. O menu *Acquire* → *Video/Digital Capture* no software Image-Pro Plus 7.0.1 era acessado;
5. O fluxo de partículas no interior da coluna de amostragem em tempo real (comando *preview*) era visualizado;
6. Os parâmetros de aquisição de imagens, como tempo de exposição, número de bits, taxa de frames por segundo e *binning* eram ajustados;
7. As seqüências de imagens por meio do comando *snap* eram adquiridas.

A Figura 22 apresenta a tela de aquisição de imagens do software *Image-Pro Plus 7.01*.

Figura 22 - Tela do software *Image-Pro Plus 7.01* utilizada para o ajuste dos parâmetros de aquisição de imagens.

Em relação à utilização dos possíveis *filtros* fornecidos pelo colposcópio (*green* ou *LB-Lighter and Brighter filter*), após a realização de testes e familiarização com os equipamentos, optou-se pela utilização do *green filter* por este permitir uma melhor visualização das extremidades das partículas, facilitando o tratamento posterior das imagens.

No que diz respeito ao *tempo de exposição*, este corresponde ao tempo que o obturador da câmera permanece aberto recebendo a luz que formará a imagem. Desta forma, quanto maior o tempo de exposição, menor será a velocidade do obturador, o que permitirá uma maior entrada de luminosidade na câmera. Como para objetos em movimento um aumento excessivo do tempo de exposição pode criar um efeito de arrastamento, este deve ser definido durante a própria aquisição das imagens. Desta forma, para uma determinada condição de estudo (por exemplo, velocidade do fluxo de água no interior da coluna de amostragem maior ou menor) é possível definir o melhor valor de tempo de exposição, permitindo a obtenção de imagens com qualidade suficiente para o tratamento posterior.

Outra ferramenta fornecida pelo software *Image-Pro Plus 7.0.1*, refere-se ao comando *binning*. Através deste, é possível o agrupamento de pixels, permitindo a captura de imagens com alta qualidade em condições com baixos níveis de luminosidade. A

desvantagem está na diminuição da resolução das imagens, a qual é sacrificada para obtenção de uma melhor qualidade. Este comando é muito útil especialmente quando se necessita de uma alta taxa de aquisição e/ou se dispõe de fraca iluminação. Além disto, este comando permite melhorar a relação de sinal/ruído (SNR). Por exemplo, a utilização de *binning 2x2* (valor empregado nesta pesquisa) diminui a resolução da imagem em 50%, porém, eleva a relação SNR em 4x, melhorando assim, a qualidade das imagens obtidas.

Outro parâmetro importante na aquisição de imagens é a *profundidade do pixel*, a qual é representada pelo número de bits, variando na faixa de 1 a 32bits. O número de bits de uma imagem dependerá, principalmente, da capacidade do equipamento utilizado para a aquisição das mesmas. Como a câmera CCD empregada nesta pesquisa (QImaging QICAM FAST MONO 12-bit) proporciona a aquisição de imagens em no máximo 12bits, estas foram adquiridas nesta profundidade de pixel. Além disto, a obtenção de imagens com o maior número de bits possível, fornece imagens com maior detalhamento, facilitando o tratamento posterior. Entretanto, quanto maior o número de bits utilizado, maior deverá ser o espaço na memória do computador para o armazenamento das seqüências de imagens adquiridas.

Com relação à *taxa de frames* (quadros), esta significa o número de imagens que o equipamento utilizado para aquisição de imagens é capaz de registrar por segundo. Assim, quanto maior este número, maior será o número de imagens obtidas neste intervalo de tempo e conseqüentemente, melhor será a visualização da seqüência obtida. No caso da aquisição de imagens de microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco, por estes possuírem velocidades ascensionais altas, é verificada a necessidade de se obter seqüências com taxa de frames elevadas. Entretanto, é importante que o computador empregado possua memória suficiente para o arquivamento destas seqüências e que a placa de vídeo tenha capacidade suficiente para suportar o processamento das seqüências nesta taxa de frames.

Na Tabela 2 são apresentados os principais parâmetros empregados na aquisição de imagens nesta pesquisa.

Tabela 2 - Principais parâmetros empregados na aquisição de imagens nesta pesquisa.

Parâmetros	
Filtro do colposcópio	<i>Green</i>
Tempo de exposição	Variável
<i>Binning</i>	2 x 2
Profundidade do pixel	12 bits
Taxa de frames	40 frames/s
Resolução (nº de pixels)	1392 x 1040

b) Passos básicos para o processo de calibração do software:

Para uma correta determinação das dimensões (área, diâmetro, entre outros) das partículas de interesse é necessária a calibração do software a partir da obtenção de uma imagem de calibração. Esta imagem é utilizada como referência no tratamento das demais seqüências de imagens por possuir uma de suas dimensões conhecida. Entretanto, é necessário que os mesmos parâmetros empregados na aquisição e tratamento da imagem de calibração sejam utilizados na captura e tratamento de imagens de flocos, microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco. Caso isto não ocorra, as dimensões destas partículas serão determinadas erroneamente durante o processo de tratamento de imagens. Nesta pesquisa foi utilizado um fio de diâmetro conhecido e igual a 330µm.

A seguir são apresentados os passos básicos empregados para a calibração do software:

1. O arquivo contendo a imagem de calibração (Imagem *TIFF*) a partir do menu *file* → *open* era aberto;
2. O contraste da imagem, escolhendo o limiar do histograma a partir do menu *enhance* → *contrast enhancement* → *range* era modificado;
3. A partir do menu *process* → *filters* → *enhancement* → *median* era aplicado o filtro;
4. O menu *measure* → *calibration* → *spatial* → *new* era aberto;
5. Um nome (*name*) para a calibração era determinado e uma unidade (*unit*) era definida;

6. No sub menu *unit/pixel* → *image* era informado ao software o diâmetro do fio de calibração (nesta pesquisa, um fio de 330 μ m de diâmetro foi empregado), posicionada uma linha que aparece na tela junto ao diâmetro do fio (dimensão conhecida) e clicado em *ok*, conforme Figura 23.

Figura 23 - Calibração do software a partir de uma dimensão conhecida.

c) Passos básicos para o processo de tratamento de imagens:

1. O arquivo contendo a sequência de imagens em estudo (Imagem *TIFF*) a partir do menu *file* → *open* era aberto;

Figura 24 – Passo 1: Abertura da sequência de imagens contendo as partículas de interesse.

2. O contraste da imagem era modificado, escolhendo o limiar do histograma a partir do menu *enhance* → *contrast enhancement* → *range*;

Figura 25 – Passo 2: Modificação do contraste da imagem.

3. O frame contendo os objetos (partículas floculadas, bolhas ou aglomerados bolhas-floco) em interesse era localizado;
4. Com o auxílio da ferramenta *New AOI* (área de interesse) era selecionado um ou mais objetos em interesse no frame em análise;
5. Com o objetivo de melhorar a visualização das partículas era aplicado um filtro a partir do menu *process* → *filters* → *enhancement* → *median*;

Figura 26 – Passo 5: Aplicação de filtro (*median filter*).

6. A calibração através do menu *measure* → *calibration* → *select spatial* era carregada, a qual foi estabelecida através de fio de diâmetro conhecido, conforme comentado anteriormente;
7. A binarização da imagem (comando *select ranges* no menu *measure* → *count/size*) por meio do histograma de intensidade era realizada;

Figura 27 – Passo 7: Binarização da imagem de interesse.

8. As dimensões das partículas em estudo eram obtidas a partir do menu *measure* → *count/size* → *count* ou a velocidade das partículas em interesse a partir do menu *measure* → *track objects*;

Figura 28 – Passo 8: Obtenção das medidas (diâmetro, área, entre outros) do objeto de interesse.

É ressaltado que o mesmo procedimento foi utilizado no processo de tratamento de imagens contendo as microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco.

Dentre os passos básicos apresentados para o tratamento das seqüências de imagens, deve-se salientar que o emprego de filtros é uma importante ferramenta oferecida por este software. Por meio desta operação, é possível acentuar os contornos da imagem, proporcionando um aumento no detalhamento e nitidez da mesma. Esta operação produz seu efeito pela modificação de determinado pixel baseado nos pixels presentes em seu entorno, proporcionando uma melhor visualização das partículas em análise.

Nesta pesquisa, foi utilizado um filtro de convolução/aprimoramento denominado *median filter*, o qual suaviza a imagem por meio da substituição de pixels por outros contendo valores médios calculados com base nos pixels vizinhos.

Em relação ao tratamento das seqüências de imagens visando à obtenção dos valores de velocidade ascensional de microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco, foi utilizado o comando *track objects*. Por meio deste comando é possível acompanhar o deslocamento das microbolhas de ar e aglomerados bolhas-floco no interior da coluna de amostragem e calcular sua velocidade ascensional, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Exemplos da utilização do comando *track objects* na obtenção das velocidades ascensionais de aglomerados bolhas-floco (à esquerda) e microbolhas de ar (à direita).

O Guia de Referência que acompanha o software apresenta informações detalhadas de todas as funções oferecidas pelo Image-Pro Plus 7.01, bem como, exercícios práticos que auxiliam na aplicação dos diversos comandos disponibilizados.

4.4.2 Parâmetros utilizados na caracterização do tamanho e forma das partículas floculadas e microbolhas de ar

Nos ensaios preliminares realizados em escala de bancada (flotatestes) na Fase 1, as partículas floculadas foram caracterizadas por meio de diâmetro de um círculo de área equivalente (ϕ_{CE}), o qual é calculado pela Equação 4.

$$\phi_{CE} = 2 \times \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (4)$$

em que,

A: área de projeção bidimensional da partícula.

Já nos demais ensaios, o tamanho das partículas floculadas e das microbolhas de ar foram obtidos a partir do princípio da esfera equivalente na qual se utilizou a medida linear (1D) denominada diâmetro de *Feret*. Para a caracterização da forma dos flocos, foram utilizados o fator de circularidade (FC) e o fator de alongação (EL). É ressaltado que estes parâmetros foram empregados em diversas pesquisas onde houve a caracterização de partículas (MIKLI et al., 2001; AL-THYABAT e MILE, 2006; PABST, BERTHOLD e GREGOROVÁ, 2005; IGATHINATHANE et al., 2008; CONSEGLIO, 2009; PARK, KIM, T e KIM Y., 2007; GRAU e HEISKANEN, 2002).

O Diâmetro de *Feret* consiste na distância paralela a uma direção fixa entre duas tangentes localizadas em lados opostos da partícula, conforme apresentado na Figura 30. Este parâmetro é calculado diretamente pelo software *Image-Pro Plus 7.01* (*Feret Mean*).

Figura 30 - Ilustração do cálculo do diâmetro de *Feret*.

O fator de circularidade (FC) é baseado na relação entre a área da projeção bidimensional da partícula (A) e a área correspondente do círculo que possui o mesmo perímetro (P) da partícula. O fator de circularidade pode ser descrito como:

$$FC = \frac{4 \times \pi \times A}{P^2} \quad (5)$$

Este fator varia de 0 a 1, sendo que partículas circulares, como as microbolhas de ar, apresentam fator de circularidade igual a 1. Já as partículas com superfície bastante irregular como os flocos, possuem valores de fator de circularidade próximos a zero.

A Figura 31 apresenta exemplos de valores de circularidade para diferentes formas de partículas.

Figura 31 - Exemplos de valores de circularidade para diferentes formas de partículas (Fonte: adaptado MALVERN, 2011)

Pode-se notar que o fator de circularidade é sensível tanto à forma quanto à rugosidade da superfície das partículas. É ressaltado que o software *Image-Pro Plus 7.01* utilizado

nesta pesquisa, não calcula diretamente o fator de circularidade, e sim, um parâmetro denominado *roundness* que equivale a $1/FC$.

Em relação ao fator de alongação (EL), este pode ser definido como:

$$EL = \log_2(a/b) \quad (6)$$

onde a e b são eixos da elipse de *Legendre* (Figura 32).

Figura 32 - Elipse de Legendre (Fonte: MIKLI, 2001)

A relação (a/b) é conhecida como Razão de Aspecto ou Aspecto (AS). Como o *Image-Pro Plus 7.01* não calcula o valor de alongação das partículas, se faz necessário primeiramente o cálculo de AS, o qual é calculado diretamente pelo software (*Aspect*).

A Figura 33 apresenta exemplos de partículas com diferentes valores de fator de alongação (EL). Como pode ser observado, o fator de alongação (EL) não é afetado pelas irregularidades da superfície das partículas.

Figura 33 – Exemplos de partículas com diferentes valores de alongação
MIKLI, 2001 (esquerda) e MALVERN, 2011 (direita).

4.5 Programação dos Ensaios

4.5.1 Fase 1

Nesta fase, a faixa de valores adequados das principais variáveis da etapa de floculação (tempo e gradiente médio de velocidade) visando à flotação foi estudada em escala de laboratório através da utilização do flotatesto (equipamento em escala de bancada e com alimentação por batelada, descrito no item 4.3.1).

Deve ser ressaltado, que nos ensaios realizados na Fase 1, o processo de aquisição e tratamento de imagens foi realizado em todas as condições de floculação investigadas, sendo que somente as seqüências de imagens referentes às partículas floculadas foram analisadas.

A Tabela 3 apresenta as quatro diferentes condições de floculação investigadas em escala de laboratório na Fase 1.

Tabela 3 - Valores de gradiente médio de velocidade de floculação e tempo de floculação investigados em escala de laboratório (Fase 1).

Condição de Floculação	G (s ⁻¹)	T (min)
1	180	6
2	90	12
3	60	18
4	45	24

Para cada condição de floculação investigada foram estudadas três velocidades de flotação (V_f de 13, 25 e 33 cm/min, equivalentes a 7,7m/h, 15m/h e 20m/h, respectivamente) e quatro diferentes valores de razão de recirculação (r igual a 4, 6, 8 e 10%), totalizando 16 ensaios em escala de laboratório na Fase 1. O esquema ilustrativo destes ensaios pode ser visualizado na Figura 34. É ressaltado que todos os ensaios foram realizados em duplicata.

Figura 34 - Esquema ilustrativo dos ensaios realizados em escala de laboratório na Fase 1.

Os parâmetros mantidos fixos durante todos os ensaios realizados em escala de laboratório estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros mantidos fixos durante ensaios realizados em escala de laboratório na Fase 1.

Parâmetros Fixos	
Dosagem de Sulfato de Alumínio / Al^{3+} (mg/L)	22,5 / 1,9
Dosagem de Alcalinizante (mg/L)	10
Temperatura da Água ($^{\circ}\text{C}$)	$24,5 \pm 0,5$
<i>Mistura Rápida</i>	
pH_{COAG}	$6,5 \pm 0,1$
Potencial Zeta (mV)	$-4,7 \pm 0,3$
Gradiente de velocidade de mistura rápida (s^{-1})	800
Tempo de mistura rápida (s)	20
<i>Flotação por Ar Dissolvido</i>	
Pressão de Saturação (atm)	4,5

É ressaltado que o processo de mistura rápida, onde houve a adição de coagulante (solução de sulfato de alumínio) e alcalinizante (solução de carbonato de sódio), foi realizado em misturadores rápidos.

4.5.2 Fase 2

a) Ensaios Preliminares:

Os Ensaios Preliminares da Fase 2 foram realizados em unidade piloto de flotação por ar dissolvido, conforme a configuração apresentada na Figura 14 (item 4.3.2). Nestes

ensaios, três diferentes condições de floculação foram investigadas como apresentado pela Tabela 5.

Tabela 5 - Condições de floculação investigadas nos *Ensaio Preliminares* em escala piloto na Fase 2.

Condição de Floculação	G (s^{-1})	T (min)
1	115	5
2	50	11
3	35	16

Os valores de gradiente médio de velocidade e tempo de floculação investigados nesta fase foram selecionados com o objetivo de se obter diferentes tamanhos de flocos (*condição 1* – flocos pequenos; *condição 2* – flocos com tamanho intermediário; *condição 3* – flocos grandes) nos ensaios realizados, e assim, realizar estudo preliminar sobre a influência do tamanho destas partículas em escala piloto na eficiência da FAD.

Os tempos de floculação investigados nesta fase foram obtidos com o emprego de diferentes estágios (câmaras) de floculação. Assim, considerando constantes os demais parâmetros empregados, foram necessários três estágios de floculação para obtenção de tempo de floculação de 16min; dois estágios para obtenção de tempo de floculação de 11min; e somente um estágio para obtenção de tempo de floculação de 5min.

Para cada condição de floculação investigada nos *Ensaio Preliminares*, foram avaliadas três diferentes concentrações em massa de ar (C_b de 4,8; 6,3 e 7,8mg.L⁻¹, relativas às razões de recirculação de 6, 8 e 10%, respectivamente). O esquema ilustrativo dos *Ensaio Preliminares* realizados na Fase 2 pode ser visualizado na Figura 35. É ressaltado que todos os ensaios foram realizados em duplicata.

Figura 35 - Esquema ilustrativo dos *Ensaio Preliminares* realizados em escala piloto na Fase 2.

Os parâmetros mantidos fixos durante todos os *Ensaio Preliminares* realizados em escala piloto na Fase 2 são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros mantidos fixos durante *Ensaio Preliminares* em escala piloto na Fase 2.

Parâmetros Fixos	
Vazão Afluente (m ³ /h)	4,6
Temperatura da Água Afluente (°C)	26,1 ± 0,4
<i>Mistura Rápida</i>	
Dosagem de Sulfato de Alumínio / Al ³⁺ (mg/L)	22,5 / 1,9
Dosagem de Alcalinizante (mg/L)	10
pH _{COAG}	6,5 ± 0,1
Potencial Zeta (mV)	-0,9 ± 0,4
<i>Flotação por Ar Dissolvido</i>	
Velocidade de entrada na zona de contato (m/h)	129,1
Pressão de Saturação (atm)	4,5 ± 0,1
TAS _{ZONA CONTATO} (m/h)	138 ± 2,6
TDH _{ZONA CONTATO} (s)	36,8 ± 0,7
Gradiente de Velocidade na Zona de Contato (s ⁻¹)*	2,8 ± 0,1
Velocidade Cross-Flow (m/h)	39,6 ± 0,7
TAS _{ZONA SEPARAÇÃO} (m/h)	7,5 ± 0,1
Profundidade Zona de Separação (m)	1,63

* valor estimado segundo equação utilizada por Richter (2009) para o cálculo do gradiente de velocidade em passagens submersas e utilizada no estudo desenvolvido por Maia (2010).

b) Ensaio Principais e Complementares:

Os *Ensaio Principais e Complementares* da Fase 2 foram realizados em unidade piloto de flotação por ar dissolvido, conforme a configuração apresentada na Figura 15 (item 4.3.2).

Nestes ensaios foram estudados dois diferentes tempos de floculação: T de 10min e T de 17min. Para cada tempo de floculação estudado, diferentes valores de gradiente médio de velocidade de floculação (G de 40, 45, 60, 75 e 110s⁻¹) e de concentração em massa de ar (C_b de 3,3; 4,8; 6,3 e 7,8mg.L⁻¹, relativas às razões de recirculação de 4, 6, 8 e 10%, respectivamente) foram investigados.

É ressaltado que os *Ensaio Complementares* foram definidos com base nos menores valores de turbidez residual alcançados nos *Ensaio Principais* e que todos os ensaios foram realizados em duplicata.

As Figuras 36 e 37 apresentam os esquemas ilustrativos dos *Ensaio Principais* e *Ensaio Complementares* realizados na Fase 2.

Figura 36 - Fluxograma ilustrativo dos *Ensaio Principais* realizados na Fase 2.

Figura 37 - Fluxograma ilustrativo dos *Ensaio Complementares* realizados na Fase 2.

Os parâmetros mantidos fixos durante todos os *Ensaio Principais* e *Ensaio Complementares* realizados em escala piloto na Fase 2 estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros mantidos fixos durante *Ensaio Principais e Complementares* em escala piloto na Fase 2.

Parâmetros Fixos	
Vazão Afluente (m ³ /h)	3,6 (T = 17min); 6,2 (T = 10min)
Temperatura da Água Afluente (°C)	26,1 ± 0,5
<i>Mistura Rápida</i>	
Dosagem de Sulfato de Alumínio / Al ³⁺ (mg/L)	22,5 / 1,9
Dosagem de Alcalinizante (mg/L)	10
pH _{COAG}	6,6 ± 0,05
Potencial Zeta (mV)	-2,6 ± 0,2
<i>Flotação por Ar Dissolvido</i>	
Velocidade de entrada na zona de contato (m/h)	84,0
Pressão de Saturação (atm)	4,5 ± 0,1
TAS _{ZONA CONTATO} (m/h)	106,7 ± 2,0
TDH _{ZONA CONTATO} (s)	67,9 ± 1,3
Gradiente de Velocidade na Zona de Contato (s ⁻¹)*	1,9 ± 0,05
Velocidade Cross-Flow (m/h)	38,4 ± 0,7
TAS _{ZONA SEPARAÇÃO} (m/h)	11,6 ± 0,2
Profundidade Zona de Separação (m)	1,91

* valor estimado segundo equação utilizada por Richter (2009) para o cálculo do gradiente de velocidade em passagens submersas e utilizada no estudo desenvolvido por Maia (2010).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Fase 1

A Figura 38 apresenta os resultados de turbidez residual alcançados para as condições de floculação investigadas em escala de laboratório na Fase 1

Figura 38 - Valores de turbidez residual alcançados nos ensaios realizados em escala de laboratório na Fase 1. ($\Theta_{\text{água}} = 24,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$; $p = 4,5 \text{ atm}$).

A partir dos resultados apresentados na Figura 38, foi verificado que a única condição de floculação que proporcionou turbidez residual abaixo de 1,0NTU para V_f de até 33cm/min foi a *condição 2* (G de 90s^{-1} com T de 12min), a qual demonstrou constituir a melhor condição de floculação dentre as quatro condições estudadas. Já os piores resultados foram obtidos na *condição 4* (G de 45s^{-1} associado a T de 24min).

Além disso, de maneira geral, para as quatro condições de floculação investigadas, foi constatado que independentemente das velocidades de flotação analisadas, os menores valores de turbidez residual, ou seja, uma melhor eficiência do processo FAD, ocorreu quando foram empregadas razões de recirculação (r) de 6 e 8%. A única exceção

ocorreu nos ensaios com a *condição 1* ($G = 180s^{-1}$ e $T = 6min$) em que foi adotada V_f de 33cm/min para a coleta de amostras no ensaio de flotatestes.

É importante ressaltar que na *condição 1*, na qual foi empregado um alto valor de gradiente médio de velocidade de floculação ($G = 180s^{-1}$) associado a um baixo valor de tempo de floculação ($T = 6min$), baixos valores de turbidez residual também foram alcançados quando foi utilizada razão de recirculação de 4% associada às velocidades de flotação (V_f) de 13 e 25cm/min. Porém, na *condição 1*, os resultados de remoção de turbidez referentes a velocidade de flotação de 33cm/min foram sempre acima de 1,0NTU, independente da razão de recirculação empregada, ao contrário do observado nos ensaios realizados na *condição 2*.

Na Figura 39 são apresentados os resultados de remoção de cor aparente obtidos em escala de laboratório, nas diferentes condições de floculação e quantidades de ar investigadas em escala de laboratório. A análise dos dados indicados nesta figura corroboram a discussão concernente à eficiência de remoção de turbidez apresentada anteriormente.

Figura 39 - Valores de cor aparente residual alcançados nos ensaios realizados em escala de laboratório na Fase 1. ($\theta_{\text{água}} = 24,5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$; $p = 4,5\text{atm}$).

As distribuições de tamanho de partículas floculadas para as quatro condições de floculação investigadas em escala de laboratório em termos de *freqüência relativa simples* e *acumulada* são apresentadas nas Figuras 40 e 41, respectivamente.

Figura 40 - Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtidas em *escala de laboratório* na Fase 1 em termos de Frequência Relativa Simples.

Figura 41 - Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtidas em *escala de laboratório* na Fase1 em termos de Frequência Relativa Acumulada.

De acordo com as distribuições de tamanho de partículas floculadas obtidas em escala de laboratório e apresentadas nas Figuras 40 e 41, foi verificado que a medida que se aumentaram os valores de gradiente médio de velocidade de floculação (G) e se diminuíram os tempos de floculação (T), houve o deslocamento da curva de distribuição relativa de tamanho de flocos para as faixas de menor diâmetro. Tal fato provavelmente ocorreu devido às forças de cisalhamento geradas nestas condições, as quais impediram a formação de flocos maiores quando foram aplicados altos valores de gradiente médio de velocidade associados a baixos tempos de floculação.

A Figura 42 apresenta os valores médios de diâmetro obtidos para cada condição de floculação investigada em escala de laboratório na Fase 1, incluindo os erros de estimativa calculados para um intervalo de confiança de 95%.

Figura 42 - Valores de diâmetro médio de flocos incluindo intervalo de confiança de 95%, para cada condição de floculação investigada em escala de laboratório na Fase 1.

De maneira geral, foi verificado nos ensaios realizados em escala de laboratório, que a flotação por ar dissolvido obteve as melhores eficiências de remoção de turbidez e cor aparente quando foram empregados um gradiente médio de velocidade de floculação (G) de 90s^{-1} associado a um tempo de floculação (T) de 12min. Esta condição, segundo os resultados obtidos com o emprego do sistema de aquisição e análise de imagens, promoveu a formação de partículas floculadas em sua maioria (em torno de 64%) na faixa de diâmetro de 500 – 800μm (Figura 40), com diâmetro médio de 700μm (Figura 42), sendo que 75% dos flocos gerados nestas condições possuíam até 800μm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 41.

Deve ser ressaltado ainda, que na *condição 1* ($G = 180s^{-1}$ e $T = 6min$), baixos valores de turbidez e cor aparente residuais também foram alcançados quando foi utilizada razão de recirculação de 4% associada às velocidades de flotação (V_f) de 13 e 25cm/min, conforme comentado anteriormente. Nesta condição, cerca de 70% dos flocos gerados possuíam diâmetro na faixa de 400 a 700 μm (Figura 40), com diâmetro médio de 600 μm (Figura 42), sendo que 88% dos flocos gerados nestas condições possuíam até 800 μm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 41.

Na *condição 4* (G de $45s^{-1}$ associado a T de 24min), a qual apresentou os piores resultados em termos de remoção de cor aparente e turbidez, cerca de 86% dos flocos gerados possuíam de 400 a 1.200 μm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 40. Isso demonstra que, para a água em questão, a aplicação de condições de floculação que proporcionaram a formação de flocos maiores que na *condição 2* (*condições 3 e 4*) resultou em queda na eficiência de remoção de cor e turbidez por flotação. É verificado também que, por outro lado, a aplicação da *condição 1* (que promoveu a formação dos menores tamanhos de flocos) também resultou em pequena piora no desempenho da flotação. Em outras palavras, para os ensaios em tela, a *condição 2* de floculação ($G = 90s^{-1}$ e $T = 12min$), que produziu 78% dos flocos com tamanhos na faixa de 400 a 1.000 μm (diâmetro médio de 700 μm), apresentou-se como a melhor condição dentre as quatro condições de floculação investigadas.

A Figura 43 apresenta exemplos de imagens obtidas em escala de laboratório com o emprego do sistema de aquisição e análise de imagens utilizado nesta pesquisa.

Figura 43 – Exemplos de imagens obtidas para a *condição 2* (G de $90s^{-1}$ com T de 12min - à esquerda) e *condição 1* (G de $180s^{-1}$ com T de 6min - à direita) de floculação investigadas em escala de laboratório na Fase 1.

Preliminarmente, com base nos resultados alcançados nos ensaios realizados em escala de laboratório na Fase 1, podemos afirmar que, independentemente das velocidades de flotação empregadas, para as condições de floculação investigadas nesta fase, uma menor quantidade de ar, ou seja, menores valores de razão de recirculação, associados à uma condição de floculação na qual houve a formação de uma maior quantidade de flocos dentro de uma faixa ótima de diâmetro, proporcionaram melhor desempenho da flotação. Entretanto, é importante salientar que ensaios realizados em escala de laboratório podem não reproduzir as condições hidrodinâmicas que ocorrem em unidades piloto com escoamento contínuo.

5.2 Fase 2

a) Ensaios Preliminares:

Os valores residuais de turbidez e cor aparente obtidos nos *Ensaios Preliminares* realizados em unidade piloto de flotação são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores residuais dos parâmetros analisados nos *Ensaios Preliminares* em escala piloto na Fase 2.
(*Condição 1* – $G = 115s^{-1}/T = 5min$; *Condição 2* – $G = 50s^{-1}/T = 11min$; *Condição 3* – $G = 35s^{-1}/T = 16min$)

Condição de Floculação	Turbidez (NTU)				Cor Aparente (uC)	
	$C_b=4,8mg.L^{-1}$	$C_b=6,3m.L^{-1}$	$C_b=7,8mg.L^{-1}$	$C_b=4,8mg.L^{-1}$	$C_b=6,3m.L^{-1}$	$C_b=7,8mg.L^{-1}$
1	2,3	2,7	2,6	4	6	6
2	1,1	1,3	1,5	4	4	5
3	0,9	0,7	0,8	2	2	2

Os resultados apresentados na Tabela 8, demonstraram que para as condições operacionais empregadas nos *Ensaios Preliminares* em escala piloto, os menores valores residuais de turbidez e cor aparente, independente das concentrações em massa de ar (C_b) empregadas, foram obtidos na *condição 3* de floculação ($G = 35s^{-1} / T = 16min$).

Já em relação às concentrações em massa de ar investigadas, foi verificada uma melhor eficiência da flotação quando foi empregada C_b igual a $4,8mg.L^{-1}$ nas *condições 1* e *2* de floculação e C_b igual a $6,3mg.L^{-1}$ na *condição 3* de floculação.

As distribuições de tamanho de partículas floculadas para as três condições de flocação investigadas preliminarmente nos *Ensaio Preliminares* em escala piloto em termos de *freqüência relativa simples* e *acumulada* são apresentadas na Figura 44.

Figura 44 - Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtida nos *Ensaio Preliminares* realizados em escala piloto em termos de Frequência Relativa Simples e Acumulada (Condição 1 – $G = 115s^{-1}/T = 5min$; Condição 2 – $G = 50s^{-1}/T = 11min$; Condição 3 – $G = 35s^{-1}/T = 16min$).

A Figura 45 apresenta os valores médios de diâmetro obtidos para cada condição de flocação investigada nos *Ensaio Preliminares* da Fase 2 em escala piloto, incluindo os erros de estimativa calculados para um intervalo de confiança de 95%.

Figura 45 - Valores de diâmetro médio de flocos, incluindo intervalo de confiança de 95%, para cada condição de flocação investigada nos *Ensaio Preliminares* realizados na Fase 2 em escala piloto.

Analisando a Figura 44, pode ser verificado que como ocorrido nos ensaios realizados em escala de laboratório (Fase 1), a medida que se diminuíram os valores de gradiente médio de velocidade de floculação (G) e se aumentaram os tempos de floculação (T), a curva de distribuição relativa de tamanho de flocos foi deslocada para as faixas de maior diâmetro médio de *Feret*.

Na condição onde foi empregado o maior valor de gradiente médio de velocidade de floculação e o menor tempo de floculação (*Condição 1* - $G = 115s^{-1}$ / $T = 5min$ – diâmetro médio de *Feret* igual a $135\mu m$, conforme apresentado na Figura 45), 95% das partículas floculadas geradas apresentaram diâmetro médio de *Feret* menor que $300\mu m$, sendo que cerca de 45% desses flocos apresentaram diâmetro médio de *Feret* abaixo de $100\mu m$. Tais resultados mostraram que flocos pequenos (diâmetro médio menor que $100\mu m$) não apresentaram boas eficiências de remoção por flotação para a água em estudo, contrariando pesquisas desenvolvidas por Haarhoff e Edzwald (2004) e Edzwald (2007), os quais afirmam ser possível a obtenção de boa eficiência de separação por flotação de flocos com diâmetros menores que $100\mu m$.

Na *Condição 3* ($G = 35s^{-1}$ / $T = 16min$, diâmetro médio de *Feret* igual a $575\mu m$, conforme apresentado na Figura 45), onde foram obtidos os melhores resultados em termos de clarificação da água em estudo (valores de turbidez menores que 1,0NTU e cor aparente de 2uC), houve a formação de partículas floculadas em sua maioria (em torno de 55%) na faixa de diâmetro médio de *Feret* de 300 – $600\mu m$, sendo que 74% dos flocos gerados encontravam-se na faixa de 100 a $700\mu m$ de diâmetro médio de *Feret*. Além disto, cerca de apenas 7% dos flocos gerados possuíam diâmetro abaixo de $300\mu m$. Ou seja, os resultados mostraram que para a água em questão, condições de floculação que conduzem a formação de flocos com tamanhos acima de $300\mu m$ de diâmetro resultaram em melhor desempenho da FAD.

Deve ser destacado que como verificado nos ensaios realizados em escala de laboratório, nas *Condições 1* e 2 de floculação, nas quais ocorreu a geração de partículas floculadas com menor valor de diâmetro médio de *Feret* (conforme apresentado na Figura 44), a concentração em massa de ar de $4,8mg.L^{-1}$ (relativa à uma razão de recirculação de 6%) proporcionou a melhor eficiência do processo de flotação nestas duas condições de floculação estudadas. Já na *Condição 3* de floculação, a qual

promoveu a geração de flocos com maior diâmetro médio de Feret, não foi verificada diferenças significativas em termos de eficiência da FAD para as três concentrações em massa de ar investigadas.

Desta forma, pode-se concluir preliminarmente, que nos *Ensaio Preliminares* com unidade FAD em escala piloto de escoamento contínuo, as condições de floculação interferiram diretamente na eficiência do processo de flotação, sendo que as melhores condições de floculação para a flotação dos flocos presentes na água de estudo foram aquelas que conduziram à formação de partículas floculadas com diâmetro médio de Feret acima de 300 μ m.

b) Ensaio Principais:

As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam os resultados de turbidez, cor aparente e SST encontrados para os tempos de floculação (T igual a 10 e 17min) e concentrações em massa de ar (C_b de 4,8, 6,3 e 7,8mg.L⁻¹) investigados durante a realização dos *Ensaio Principais* em escala piloto.

Tabela 9 - Valores de turbidez residual após FAD - Ensaio Principais.

Turbidez Residual (NTU)						
G (s ⁻¹)	T = 10min			T = 17min		
	$C_b=4,8\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=6,3\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=7,8\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=4,8\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=6,3\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=7,8\text{mg.L}^{-1}$
40	1,1	1,5	2,1	1,2	1,2	1,6
45	1,2	1,4	1,8	0,8	1,0	1,1
60	1,1	1,3	2,0	0,7	0,9	1,2
75	1,0	1,4	1,8	0,9	1,5	1,9
110	1,1	-	-	-	-	-

Tabela 10 - Valores de cor aparente residual após FAD - Ensaio Principais.

Cor Aparente (uC)						
G (s ⁻¹)	T = 10min			T = 17min		
	$C_b=4,8\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=6,3\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=7,8\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=4,8\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=6,3\text{mg.L}^{-1}$	$C_b=7,8\text{mg.L}^{-1}$
40	3	5	6	2	2	3
45	3	4	6	2	2	3
60	2	3	5	1	2	2
75	2	3	5	2	3	3
110	2	-	-	-	-	-

Tabela 11 - Valores de SST após FAD - Ensaios Principais.

G (s ⁻¹)	SST (mg/L)					
	T = 10min			T = 17min		
	$C_b=4,8mg.L^{-1}$	$C_b=6,3m.L^{-1}$	$C_b=7,8mg.L^{-1}$	$C_b=4,8mg.L^{-1}$	$C_b=6,3m.L^{-1}$	$C_b=7,8mg.L^{-1}$
40	2,4	3,3	4,6	2,6	2,6	3,5
45	2,6	3,1	4,0	1,8	2,2	2,4
60	2,4	2,9	4,4	1,5	2,0	2,6
75	2,2	3,1	4,0	2,0	3,3	4,2
110	2,4	-	-	-	-	-

Como pode ser observado a partir dos resultados apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11, os menores valores residuais de todos os parâmetros analisados na Fase 2, independentemente do tempo de floculação investigado, foram encontrados quando a concentração em massa de ar de $4,8mg.L^{-1}$ (relativa à razão de recirculação de 6% e pressão de saturação de $4,5\pm 0,1atm$) foi aplicada ao processo de tratamento por FAD. Por exemplo, valores de turbidez residual em torno de 0,7NTU e 1,0NTU foram obtidos quando gradientes de velocidade de $60s^{-1}$ (T de 17min) e $75s^{-1}$ (T de 10min) foram aplicados, respectivamente (Tabela 9).

As distribuições de tamanho de partículas floculadas obtidas com o emprego dos valores de gradiente médio de velocidade de floculação, os quais foram aplicados nos dois tempos de floculação investigados (T de 10 e 17min) na Fase 2, são apresentadas nas Figuras 46 e 47, respectivamente.

Figura 46 – Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtida nos *Ensaio Principais* realizados na Fase 2 para T igual a 10min.

Figura 47 - Distribuição do tamanho de partículas floculadas obtida nos *Ensaio Principais* realizados na Fase 2 para T igual a 17min.

A análise dos resultados apresentados nas Figuras 46 e 47 permite verificar que para ambos os tempos de floculação investigados nesta pesquisa, o aumento do valor do gradiente médio de velocidade de floculação (G) provocou o deslocamento da curva de distribuição relativa de tamanho de flocos para as faixas de menor diâmetro, ou seja,

independente do tempo de floculação empregado, o aumento no valor de G ocasionou a formação de flocos de menor diâmetro médio de Feret.

Segundo Reynolds & Richards (1996), quando há a aplicação de altos valores de gradiente médio de velocidade na floculação, as forças de cisalhamento geradas impedem a formação de flocos grandes, enquanto que a aplicação de valores baixos ou insuficientes de gradiente não proporciona um número adequado de colisões entre as partículas, não promovendo, assim, a formação de flocos com tamanhos suficientes para a apropriada clarificação da água em tratamento

Tal fato também é demonstrado a partir dos resultados apresentados nas Figuras 48 e 49, as quais apresentam os valores médios de diâmetro de Feret obtidos em cada condição de floculação investigada incluindo o erro de estimativa calculado para um intervalo de confiança de 95%.

Figura 48 - Valores de diâmetro médio de Feret incluindo intervalo de confiança de 95% para os diferentes valores de G investigados nos *Ensaíos Principais* na Fase 2 para T igual a 10min.

Figura 49 - Valores de diâmetro médio de Feret incluindo intervalo de confiança de 95% para os diferentes valores de G investigados nos *Ensaio Principais* na Fase 2 para T igual a 17min.

Como visualizado nas Figuras 48 e 49, os valores médios de diâmetro de *Feret* dos flocos gerados diminuíram à medida que se aumentaram os valores de gradiente de velocidade de floculação (G), variando de 255µm a 460µm nos ensaios realizados com T de 10min e de 327 a 520µm nos ensaios realizados com T de 17min.

Além disto, os resultados visualizados nas Figuras 48 e 49 demonstraram que a variação do tempo de floculação também influenciou a distribuição de tamanho de partículas floculadas, sendo que para um mesmo gradiente de velocidade empregado, menores partículas foram geradas quando o tempo de floculação de 10min foi utilizado.

Nesta fase da pesquisa também foram investigados os *fatores de circularidade e alongação* das partículas floculadas geradas em todas as condições de floculação investigadas nos *Ensaio Principais* na Fase 2, as quais são apresentadas através de diagramas de caixa (*boxplots*) nas Figuras 50, 51, 52 e 53.

Figura 50 - Boxplot dos valores de *fator de elongação* para as condições de flocculação investigadas nos *Ensaios Principais* na Fase 2 para T igual a 10min.

Figura 51 - Boxplot dos valores de *fator de elongação* para as condições de flocculação investigadas nos *Ensaios Principais* na Fase 2 para T igual a 17min.

Figura 52 - Boxplot dos valores de *fator de circularidade* para as condições de floculação investigadas nos *Ensaios Principais* na Fase 2 para T igual a 10min.

Figura 53 - Boxplot dos valores de *fator de circularidade* para as condições de floculação investigadas nos *Ensaios Principais* na Fase 2 para T igual a 17min.

Como verificado, não foram detectados dados suspeitos (*outliers*), ou seja, conforme definido por Lapponi (2005), dados extremamente diferentes da maioria dos dados das amostras, em nenhum dos ensaios realizados.

Com relação ao *fator de alongação* (Figuras 50 e 51), foi verificado que não houve diferenças significativas na distribuição das amostras nas diferentes condições de floculação investigadas, demonstrando que as partículas floculadas, independentemente

de seus tamanhos, apresentaram valores de fator de alongação similares e em sua maioria, menores que 1,5.

Já em relação ao *fator de circularidade* (Figuras 52 e 53), em todas as condições de floculação estudadas, a maior parte das partículas floculadas apresentaram baixos valores de fator de circularidade (valores menores que 0,50), conforme pode ser visualizado através do tamanho das caixas, as quais contém 50% dos dados.

Deve ser ressaltado, como comentado anteriormente, que o *fator de circularidade* é sensível tanto à forma quanto à rugosidade da superfície das partículas, apresentando baixos valores para partículas com alta rugosidade. Assim, tal fato ratifica a irregularidade da superfície dos flocos independente da condição de floculação analisada, a qual também pôde ser constatada visualmente durante a aquisição e tratamento das imagens.

Com relação às concentrações em massa de ar (C_b) investigadas em escala piloto nos *Ensaio Principais* da Fase 2, como os demais parâmetros empregados na FAD foram mantidos fixos, conclui-se que houve aglutinação de microbolhas de ar no interior da zona de contato do tanque de flotação durante os ensaios. Esta aglutinação, muito provavelmente, foi a responsável pela diminuição do desempenho da FAD nestes ensaios. Tal fato pôde ser comprovado a partir da realização de ensaios de aquisição e análise de imagens das microbolhas de ar geradas nas diferentes concentrações em massa de ar investigadas, as quais são apresentadas na Figura 54.

Figura 54 - Frequência relativa simples e acumulada em número por faixa de tamanho de microbolhas de ar para concentrações em massa de ar (C_b) de 7,8 e 4,8mg.L⁻¹.

Assim, a partir dos resultados apresentados na Figura 54 foi possível comprovar que o aumento na concentração em massa de ar disponível (C_b), ou seja, o aumento na razão de recirculação (r), promoveu a aglutinação das microbolhas de ar, deslocando a curva de distribuição de tamanho de microbolhas de ar em direção às faixas de maior diâmetro. Desta forma, quando foi empregado uma concentração em massa de ar de 4,8mg.L⁻¹ (relativa à razão de recirculação de 6% e pressão de saturação de 4,5±0,1atm), a maior parte das microbolhas de ar (em torno de 67%) apresentaram diâmetro entre 40 e 80μm, enquanto que o emprego de C_b de 7,8mg.L⁻¹ (relativa à razão de recirculação de 10% e pressão de saturação de 4,5±0,1atm) proporcionou a formação de microbolhas de ar em sua maioria, com diâmetro entre 80 - 120μm (em torno de 55%).

Em relação à curva de frequência relativa acumulada, foi verificado que para o emprego de C_b de 4,8mg.L⁻¹, 80% das microbolhas de ar apresentaram diâmetro menor que 80μm, enquanto que com a utilização de C_b de 7,8mg.L⁻¹, apenas 25% das microbolhas de ar tiveram diâmetro menor que 80μm. Esta aglutinação das microbolhas de ar foi causada possivelmente pelo aumento da concentração da massa de ar associado à taxa

de aplicação superficial (TAS_{ZC} de $106,7 \pm 2,0\text{m/h}$) e tempo de detenção (TDH_{ZC} de $67,9 \pm 1,3\text{s}$) aplicados na zona de contato do tanque FAD durante os ensaios.

A Figura 55 apresenta os valores médios de diâmetro de *Feret* obtidos nas concentração em massa de ar (C_b) de 4,8 e $7,8\text{mg.L}^{-1}$, incluindo o erro de estimativa calculado para um intervalo de confiança de 95%.

Figura 55 - Valores de diâmetro médio de Feret das microbolhas de ar incluindo intervalo de confiança de 95% para as concentrações em massa de ar (C_b) de 4,8 e $7,8\text{mg.L}^{-1}$.

Como pode ser observado na Figura 55, o aumento na concentração em massa de ar promoveu aumento no diâmetro médio das microbolhas de ar, ou seja, ocorreu a aglutinação destas microbolhas, como comentado anteriormente.

A Figura 56 apresenta exemplos de imagens das microbolhas de ar obtidas em escala piloto com o emprego do sistema de aquisição e análise de imagens utilizado nesta pesquisa.

Figura 56 – Exemplos de imagens das microbolhas de ar com a aplicação de C_b de $4,8\text{mg.L}^{-1}$ (à esquerda) e C_b de $7,8\text{mg.L}^{-1}$ (à direita).

Em relação às interações ocorridas entre as microbolhas de ar, de acordo com Edzwald (2010), existem 4 forças que afetam o comportamento destas em termos de coalescência: força de *London-van der Waals* (atração), força eletrostática (repulsiva), interação hidrofóbica (atrativa) e a repulsão hidrodinâmica (repulsiva). Segundo o autor, estas forças podem ser descritas conceitualmente, porém, sua quantificação é difícil. Além disto, Edzwald (2010) faz referência à pesquisa desenvolvida por Craig et al.⁴ (1993, apud EDZWALD, 2010), na qual foi demonstrada que águas com baixas concentrações de sais favorecem a coalescência entre as bolhas de ar, enquanto que em águas com altas concentrações de sais, a coalescência praticamente não ocorre. Assim, como as águas utilizadas para o abastecimento possuem em sua maioria, baixa concentração de sais (força iônica $< 0,02\text{mol.L}^{-1}$), a coalescência entre as bolhas de ar é freqüentemente constatada. De qualquer forma, para uma melhor compreensão destas forças que afetam o comportamento das microbolhas de ar no interior dos tanques de FAD, a realização de um maior número de pesquisas é necessária, visto que o tamanho das microbolhas de ar influenciam marcadamente a eficiência do processo de flotação, conforme verificado por diversos pesquisadores (KITCHENER e GOCHIN, 1981; HAHN, 1984; ZABEL, 1984; RIJK, VAN DEER GRAAF e BLANKEM, 1994; HAARHOFF e EDZWALD, 2004; LEPPINEN e DALZIEL, 2004; EDZWALD, 2007).

⁴ CRAIG, V.S.J.; NINHAM, B.W.; PASHLEY, R.M. Effect of electrolytes on bubble coalescence. *Nature*, 364, p. 317–319, 1993.

A Figura 57 mostra o efeito do gradiente médio de velocidade de floculação (G) na FAD para os diferentes tempos de floculação (T) investigados para a concentração em massa de ar de $4,8\text{mg.L}^{-1}$.

Figura 57 - Efeito do gradiente médio de velocidade de floculação (G) na FAD para os diferentes tempos de floculação (T) investigados para C_b de $4,8\text{mg.L}^{-1}$ – Ensaios Principais.

De acordo com os dados apresentados na Figura 57, os menores valores residuais dos parâmetros analisados na água em estudo foram alcançados para o tempo de floculação (T) de 17min. Entretanto, como podem ser verificados, os valores de turbidez residual, cor aparente e SST encontrados para T de 10min foram ligeiramente superiores àqueles encontrados para T de 17min, demonstrando que a FAD foi capaz de operar também com boa eficiência com a utilização de tempo de floculação de 10min. Ressalta-se que situação análoga foi alcançada em pesquisas realizadas por Edzwald et al. (1992), Valade et al. (1996) e Reali e Dombroski (1996), as quais se encontram comentadas no item referente à Revisão de Literatura.

De maneira geral, nos *ensaios principais* os pares $T = 10\text{min} / G = 75\text{s}^{-1}$ e $T = 17\text{min} / G = 60\text{s}^{-1}$ apresentaram os melhores resultados em termos de remoção dos parâmetros analisados, independente das concentrações em massa de ar investigadas. Desta forma,

novos ensaios foram realizados nestas condições de floculação, os quais foram denominados de *ensaios complementares*.

c) Ensaios Complementares:

A Figura 58 apresenta o efeito da concentração em massa de ar (C_b de 3,3; 4,8 e 7,8 mg.L^{-1} , relativo às razões de recirculação de 4, 6 e 10%) na FAD para as condições de floculação onde foram obtidos os melhores resultados em termos dos parâmetros analisados nos *Ensaios Principais: Condição 1* - $T = 10\text{min} / G = 75\text{s}^{-1}$ e *Condição 2* - $T = 17\text{min} / G = 60\text{s}^{-1}$.

Figura 58 - Efeito da concentração em massa de ar na FAD para as condições de floculação onde foram obtidos os melhores resultados em termos dos parâmetros analisados nos ensaios principais – Ensaios Complementares.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 58, foi constatado que os menores valores residuais dos parâmetros analisados foram encontrados quando foi empregada a *Condição 2* de floculação ($T = 17\text{min} / G = 60\text{s}^{-1}$) associada a uma concentração em massa de ar (C_b) de 4,8 mg.L^{-1} (Turbidez de 0,8 NTU, Cor Aparente de 1 uH, SST de 1,8 mg.L^{-1} e $\text{UV}_{254\text{nm}}$ de 0,007 cm^{-1}). Deve ser notado que o tempo de floculação que proporcionou os menores valores residuais dos parâmetros analisados encontra-se dentro da faixa de valores recomendado por diversos pesquisadores (normalmente na

faixa de 10 a 20min), conforme comentado por Edzwald (2010). De qualquer forma, se faz necessária a realização de ensaios prévios em escala de laboratório e/ou escala piloto, com o objetivo de se determinar os valores de tempo de floculação e gradiente médio de velocidade de floculação adequados ao tipo de água empregado.

Além disso, os resultados demonstraram que nos ensaios realizados na *Condição 2* de floculação associada à concentração em massa de ar (C_b) de $3,3\text{mg.L}^{-1}$, a quantidade de ar gerada foi insuficiente para promover uma adequada ascensão das partículas floculadas à parte superior do tanque de flotação e, conseqüentemente, houve uma baixa eficiência no processo de flotação. Fato oposto ocorreu nos ensaios realizados na *Condição 1* ($T = 10\text{min} / G = 75\text{s}^{-1}$) de floculação, onde foi verificado a obtenção de baixos valores residuais dos parâmetros analisados quando foi empregada C_b de $3,3\text{mg.L}^{-1}$.

Tal fato foi provavelmente devido às diferentes distribuições de tamanho de flocos geradas nas duas condições de floculação analisadas, as quais são apresentadas na Figura 59.

Figura 59 - Frequência relativa simples e acumulada em número por faixa de tamanho de partículas floculadas para as duas condições onde os melhores resultados em termos de remoção dos parâmetros analisados foram obtidos (Condição 1 - $T = 10\text{min} / G = 75\text{s}^{-1}$ e Condição 2 - $T = 17\text{min} / G = 60\text{s}^{-1}$).

A partir da distribuição do tamanho de partículas floculadas apresentada na Figura 59, foi verificado que a aplicação da *Condição 1* de floculação ($T = 10\text{min} / G = 75\text{s}^{-1}$) promoveu a formação de partículas em sua maioria (em torno de 58%) na faixa de 100 a $300\mu\text{m}$ de diâmetro médio de Feret, sendo que 62% das partículas geradas apresentaram diâmetro inferior a $300\mu\text{m}$, enquanto que na *Condição 2* de floculação ($T = 17\text{min} / G = 60\text{s}^{-1}$), onde houve a formação de partículas em sua maioria na faixa de 300 a $600\mu\text{m}$ (em torno de 58%), sendo que em torno de 30% das partículas apresentaram diâmetro inferior a $300\mu\text{m}$.

Nos ensaios realizados em escala piloto na Fase 2, também pôde ser constatado que a FAD foi capaz de operar com boa eficiência quando foi empregada uma baixa concentração em massa de ar (C_b de $3,3\text{mg.L}^{-1}$) associada à *Condição 1* de floculação ($T = 10\text{min} / G = 75\text{s}^{-1}$). Como comentado anteriormente, nesta condição de floculação as partículas floculadas apresentaram, em sua maioria (em torno de 62%), diâmetro médio de *Feret* inferior a $300\mu\text{m}$. Porém, é ressaltado que a eficiência obtida neste caso não foi a ótima, mas foi satisfatória e maior quando comparada à eficiência obtida com a aplicação desta mesma quantidade de ar na *Condição 2* de floculação.

O tamanho das microbolhas de ar geradas quando uma concentração em massa de ar de $3,3\text{mg.L}^{-1}$ (relativa à razão de recirculação de 4% e pressão de saturação de $4,5\pm 0,1\text{atm}$) foi empregada, também foi caracterizada pelo método de aquisição e análise de imagens desenvolvido nesta pesquisa (Figura 60), sendo constatado que o emprego desta concentração em massa de ar, promoveu a geração de 90% das microbolhas de ar com até $80\mu\text{m}$ de diâmetro.

Figura 60 – Frequência relativa simples e acumulada em número por faixa de tamanho de microbolhas de ar para concentração em massa de ar (C_b) de $3,3 \text{ mg.L}^{-1}$ (relativa à razão de recirculação de 4% e pressão de saturação de $4,5 \pm 0,1 \text{ atm}$).

d) Velocidade Ascensional das microbolhas de ar:

A Figura 61 apresenta os valores de velocidade ascensional das microbolhas de ar obtidos experimentalmente a partir do sistema de aquisição e análise de imagens desenvolvido nesta pesquisa.

Figura 61 – Valores de velocidade ascensional das microbolhas de ar obtidos experimentalmente ($C_b = 3,3 \text{ mg.L}^{-1}$; $\Theta_{\text{água}} = 26^\circ\text{C}$; $n = 200$).

A partir dos valores experimentais de velocidade ascensional (V_{bolhas}) e diâmetro das microbolhas de ar (ϕ_{bolhas}), foi possível o estabelecimento de curva relacionando estas duas variáveis (Equação 7).

$$V_{\text{bolhas}} = 0,002 \times \phi_{\text{bolhas}}^2 + 0,047 \times \phi_{\text{bolhas}} \quad (\text{para } \Theta_{\text{água}} = 26^\circ\text{C}) \quad (7)$$

em que,

V_{bolhas} : velocidade ascensional das microbolhas de ar (m/h)

ϕ_{bolhas} : diâmetro das microbolhas de ar (μm)

Desta forma, com a utilização da Equação 7 foi realizada a comparação entre a curva de velocidade ascensional das microbolhas de ar obtida experimentalmente e a curva teórica calculada a partir da equação clássica de Stokes (Equação 8), considerando $\Theta_{\text{água}}$ de 26°C , a qual é apresentada na Figura 62.

$$V_{\text{bolha}} = \frac{4 \times g \times (\rho_{\text{água}} - \rho_{\text{bolha}}) \times \phi_{\text{bolha}}^2}{18 \times \mu_{\text{água}}} \quad (8)$$

Figura 62 - Comparação entre a curva de velocidade ascensional das microbolhas de ar obtida experimentalmente e a curva teórica calculada a partir da equação clássica de Stokes ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$).

Como pode ser visualizado na Figura 62, os valores de velocidade ascensional das microbolhas de ar determinados através da Equação 7, a qual foi obtida experimentalmente nesta pesquisa, são ligeiramente superiores àqueles calculados por meio da equação teórica de Stokes. Tal diferença, provavelmente foi devida às condições experimentais empregadas nesta pesquisa, as quais foram diferentes das condições hidrodinâmicas ideais.

Durante a análise das seqüências de imagens, por exemplo, foi possível verificar no decorrer do movimento ascensional das microbolhas de ar, que estas, por diversas vezes, influenciam o movimento ascensional umas das outras, visto que de acordo com o tamanho que possuem, estas adquirem velocidades ascensionais diferentes. Além disto, deve ser ressaltado, que este movimento ascensional, em diversas ocasiões, não é perfeitamente retilíneo, aumentando assim, a probabilidade de colisão entre as microbolhas de ar. Contudo, mesmo considerando a existência e influência destes fatores durante os ensaios, foi possível obter a Equação 7, que fornece valores bastante próximos dos teóricos.

e) *Aglomerados bolhas-floco: Comparação dos resultados alcançados experimentalmente àqueles obtidos em simulação com o emprego do modelo matemático proposto por Reali (1991)*

A Figura 63 apresenta os resultados obtidos experimentalmente referentes ao número de microbolhas de ar aderidas em diferentes faixas de tamanho de aglomerados bolhas-floco investigadas.

Figura 63 – Resultados experimentais referentes ao número de bolhas de ar aderidas nas diferentes faixas de diâmetro médio de *Feret* dos aglomerados bolhas-floco ($n = 32$, $G = 75s^{-1}$; $T = 10min$; $p = 4,5 \pm 0,1atm$; $C_b = 3,3mg.L^{-1}$).

Deve ser ressaltado que o número de microbolhas de ar aderidas à superfície dos flocos é diretamente proporcional à área superficial destas partículas floculadas. Assim, flocos com valores de diâmetro médio de *Feret* elevados proporcionam a possibilidade de um maior número de colisões com as microbolhas de ar e conseqüentemente, uma maior aderência destas em sua superfície.

A Figura 64 apresenta exemplos de imagens de aglomerados bolhas-floco obtidas durante os ensaios com o emprego do sistema de aquisição e análise de imagens utilizado nesta pesquisa. Nestas, é possível verificar um maior número de microbolhas de ar aderidas à superfície dos flocos que possuem maior diâmetro médio de *Feret* e conseqüentemente, maior área superficial.

Figura 64 - Imagens de aglomerados bolhas-floco obtidas a partir do sistema de aquisição e análise de imagens empregado nesta pesquisa.

De acordo com Gochin e Solari (1983), as características dos flocos influenciam os mecanismos de adesão ocorridos entre estes e as microbolhas de ar. Desta forma, segundo os autores, flocos grandes e abertos, os quais possuem uma maior área superficial e menor densidade, provavelmente necessitam somente de alguns sítios hidrofóbicos para proporcionar a aderência de um número de microbolhas de ar suficiente para promover sua ascensão, diferentemente do que é verificado nos flocos menores e compactos, os quais possuem uma menor área superficial e maior densidade.

Além disto, segundo Gochin e Solari (1983), Shergold (1984) e Hahn (1984), o estabelecimento de um ângulo de contato entre o floco e a bolha de ar é considerado um fator determinante no mecanismo de aderência entre bolhas e flocos. Assim, quanto maior o número de sítios hidrofóbicos na superfície das partículas, maior o ângulo de contato e conseqüentemente, mais intensa a ligação entre bolhas e floco.

Com o intuito de se comparar as velocidades ascensionais dos aglomerados bolhas-floco calculadas experimentalmente com àquelas obtidas por meio da modelagem matemática desenvolvida por Reali (1991), um grupo de dez aglomerados bolhas-floco foram

selecionados. Nestes aglomerados, foi possível realizar a contagem total e a caracterização (em termos de diâmetro) de todas as microbolhas de ar aderidas.

É importante ressaltar com relação ao modelo matemático em análise nesta pesquisa, que este considera que as microbolhas de ar possuem diâmetros idênticos e os flocos em suspensão possuem forma esférica e mesmo tamanho. Desta forma, para efeitos de comparação, os aglomerados bolhas-floco foram caracterizados por meio do diâmetro de um círculo de área equivalente ($\varnothing_{CE}$). Assim, para cada microbolha de ar aderida à superfície do floco, o diâmetro e conseqüente volume de ar (considerando a forma esférica) foram calculados. Além disto, a partir do volume de ar de cada aglomerado, foi determinado um número hipotético de microbolhas de ar com diâmetro igual a $50\mu\text{m}$, as quais estariam teoricamente aderidas em cada aglomerado.

A Tabela 12 apresenta as características de cada aglomerado bolhas-floco utilizado nesta pesquisa na comparação com o modelo matemático proposto por Reali (1991).

Tabela 12 – Caracterização dos aglomerados bolhas-floco empregados na comparação com o modelo matemático proposto por Reali (1991).

Aglomerado	Diâmetro (μm)	Velocidade ascensional - V_{bf} (m/d)	N_b	Volume de ar (mm^3)	N_{b50}
1	208,3	105,7	2	203,3	3
2	275,0	261,7	3	487,4	7
3	296,7	124,4	3	209,6	3
4	341,5	98,4	3	493,2	8
5	341,9	232,2	3	1.265,4	19
6	345,7	129,3	1	296,5	5
7	385,8	163,1	3	514,0	8
8	386,3	321,7	5	808,1	12
9	413,4	154,2	2	477,1	7
10	673,9	299,8	7	2.906,1	44

Primeiramente, é apresentada nas Figuras 65, 66, 67 e 68 a comparação entre os resultados alcançados experimentalmente (Tabela 12) e aqueles obtidos por meio da modelagem matemática proposta por Reali (1991).

Figura 65 – Comparação entre as curvas desenvolvidas por Real (1991) e os dados obtidos experimentalmente para flocos com diâmetro entre 200 e 300 μm ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$; $\rho_{f200} = 1005,4\text{kg/m}^3$; $\rho_{f300} = 1002,9\text{kg/m}^3$; $\rho_w = 996,3\text{kg/m}^3$).

Figura 66 - Comparação entre as curvas desenvolvidas por Real (1991) e os dados obtidos experimentalmente para flocos com diâmetro entre 300 e 400 μm ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$; $\rho_{f300} = 1002,9\text{kg/m}^3$; $\rho_{f400} = 1001,5\text{kg/m}^3$; $\rho_w = 996,3\text{kg/m}^3$).

Figura 67 - Comparação entre as curvas desenvolvidas por Reali (1991) e os dados obtidos experimentalmente para flocos com diâmetro entre 400 e 500 μm ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$; $\rho_{f\ 400} = 1001,5\text{kg/m}^3$; $\rho_{f\ 500} = 1000,7\text{kg/m}^3$; $\rho_w = 996,3\text{kg/m}^3$).

Figura 68 - Comparação entre as curvas desenvolvidas por Reali (1991) e os dados obtidos experimentalmente para flocos com diâmetro entre 600 e 700 μm ($\Theta_{\text{água}} = 26^{\circ}\text{C}$; $\rho_{f\ 600} = 1000,1\text{kg/m}^3$; $\rho_{f\ 700} = 999,7\text{kg/m}^3$; $\rho_w = 996,3\text{kg/m}^3$).

Os resultados apresentados nas Figuras 65, 66, 67 e 68 demonstraram que os valores de velocidade ascensional e o número de microbolhas de ar com certo diâmetro (uniforme) que teria de colidir efetivamente com cada floco a fim de se atingir uma dada velocidade ascensional superior à taxa de aplicação superficial adotada no reator, alcançados experimentalmente, foram ligeiramente distintos daqueles valores obtidos por meio da modelação matemática proposta por Reali (1991).

De qualquer forma, uma diferença entre os valores teóricos e experimentais era esperada, visto que o modelo proposto por Reali (1991) foi desenvolvido a partir de diversas simplificações, já comentadas anteriormente, tais como: *i)* bolhas possuem diâmetros idênticos; *ii)* flocos em suspensão possuem forma esférica e mesmo tamanho; *iii)* concentração em número de flocos é constante, após atingido o regime de equilíbrio; *iv)* efeitos hidrodinâmicos na taxa de colisão entre partículas são considerados desprezíveis; *v)* não ocorre aglutinação entre as microbolhas de ar; *vi)* apenas as colisões entre flocos e microbolhas são efetivas; *vii)* o aumento no volume dos flocos devido à incorporação de microbolhas de ar é desprezível. Além disto, é ressaltado que as condições experimentais empregadas nesta pesquisa são diferentes das condições ideais, visto que para caracterização dos aglomerados bolhas-floco, foi necessário o desenvolvimento de equipamento específico composto por coluna de amostragem e bomba de sucção.

É ressaltado também que os valores de densidade das partículas floculadas (ρ_f) utilizados na comparação dos resultados experimentais e teóricos, foram estimados segundo equação proposta por Haarhoff e Edzwald (2004), apresentada no Apêndice B.

É importante considerar que, durante a análise das seqüências de imagens obtidas a partir do sistema de aquisição de imagens desenvolvido para a realização desta pesquisa, foi constatado que para cada condição de floculação analisada, há uma distribuição de tamanhos de flocos, a qual está diretamente relacionada ao valor do gradiente médio de velocidade de floculação (G) e ao tempo de floculação (T) empregados, não ocorrendo desta forma, a formação de flocos com tamanhos uniformes, nem mesmo esféricos, como assumido pelo modelo matemático analisado nesta pesquisa. Tal situação também se aplica às microbolhas de ar, onde os resultados

experimentais demonstraram que diferentes valores de razão de recirculação promoveram a formação de diferentes distribuições de tamanho de microbolhas de ar para uma mesma pressão de saturação empregada. Assim, pôde-se comprovar que as microbolhas de ar podem sofrer aglutinação no interior dos tanques de flotação e influenciar a eficiência do processo de flotação, dependendo das condições operacionais do sistema.

De maneira geral, mesmo com as diversas simplificações adotadas no desenvolvimento do modelo analisado e considerando as condições experimentais utilizadas nesta pesquisa, foi possível verificar para a água em estudo, que a modelação matemática proposta por Reali (1991) foi capaz de fornecer subsídios para uma adequada estimativa do número de microbolhas de ar aderidas aos flocos, bem como de velocidades ascensionais dos aglomerados bolhas-floco.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- ❖ A distribuição de tamanho de partículas floculadas influenciou diretamente a clarificação por flotação da água em estudo, sendo que as melhores condições de floculação foram aquelas que conduziram à formação, em sua maioria, de partículas floculadas com diâmetro médio de *Feret* acima de 300 μ m;
- ❖ Os menores valores residuais dos parâmetros analisados na água em estudo foram alcançados com o emprego do tempo de floculação de 17min. Entretanto, como podem ser verificados nos resultados obtidos nesta pesquisa, os valores de turbidez residual, cor aparente e SST encontrados para tempo de floculação de 10min foram apenas ligeiramente superiores àqueles encontrados para o tempo de floculação de 17min, demonstrando que a FAD foi capaz de operar também com boa eficiência com a utilização de tempo de floculação de 10min;
- ❖ As condições de floculação que apresentaram os melhores resultados em termos de remoção dos parâmetros analisados, independente das concentrações em massa de ar investigadas foram: $T = 10\text{min} / G = 75\text{s}^{-1}$ e $T = 17\text{min} / G = 60\text{s}^{-1}$. Nestas, foi verificado que a aplicação de $T = 10\text{min} / G = 75\text{s}^{-1}$ promoveu a formação de partículas em sua maioria (em torno de 58%) na faixa de 100 a 300 μ m de diâmetro médio de *Feret*, sendo que 62% das partículas geradas apresentaram diâmetro inferior a 300 μ m. Por outro lado, a aplicação da melhor condição de ensaio ($T = 17\text{min} / G = 60\text{s}^{-1}$), proporcionou a formação de partículas em sua maioria na faixa de 300 a 600 μ m (em torno de 58%), com cerca de 30% das partículas apresentando diâmetro inferior a 300 μ m;
- ❖ O método e equipamento desenvolvidos nesta pesquisa para a aquisição e análise de imagens demonstraram constituir importantes ferramentas para a obtenção das distribuições de tamanho de flocos e microbolhas de ar, bem como, para a determinação do número de microbolhas de ar aderidas às superfícies dos flocos e da velocidade ascensional dos aglomerados bolhas-floco gerados no processo de flotação;

- ❖ Mesmo com as diversas simplificações adotadas no desenvolvimento do modelo matemático analisado e considerando as condições experimentais utilizadas nesta pesquisa, foi possível verificar para a água em estudo e para as condições operacionais empregadas nesta pesquisa, que a modelação matemática proposta por Reali (1991) foi capaz de fornecer subsídios para uma adequada estimativa do número de microbolhas de ar aderidas aos flocos, bem como, das velocidades ascensionais dos aglomerados bolhas-floco;
- ❖ A partir dos resultados alcançados nesta pesquisa, recomendam-se para projetos futuros de unidades de flotação por ar dissolvido utilizadas no tratamento de águas para abastecimento com características similares à água sintética empregada nesta pesquisa, o emprego de valores de gradiente médio de velocidade de floculação compreendidos no intervalo entre 60 e 75s⁻¹ associados a tempos de floculação superiores a 10min e concentração em massa de ar de 4,8mg.L⁻¹.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, C. J. **Influência da velocidade cross-flow na câmara de flotação na eficiência de unidades de flotação por ar dissolvido tratando água para abastecimento**. 2010. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

AL-THYABAT, S.; MILES, N. J. An improved estimation of size distribution from particle profile measurements. **Powder Technology**, v. 166, p. 152–160, 2006.

BACHE, D. H.; RASOOL, E. Characteristics of alumino-humic flocs in relation to DAF performance. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 8, p. 203–208, 2001.

BONDELIND, M.; SASIC, S.; KOSTOGLU, M.; BERGDAHL, L.; PETTERSSON, T. J. R. Single- and two-phase numerical models of Dissolved Air Flotation: Comparison of 2D and 3D simulations. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, p. 1-8, 2010. doi:10.1016/j.colsurfa.2010.02.035.

BONDELIND, M.; SASIC, S.; BERGDAHL, L. A model to estimate the size of aggregates formed in a Dissolved Air Flotation unit. **Applied Mathematical Modeling**, p. 1-12, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.07.004>.

BRATBY, J. **Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment**. Second Edition. London: IWA Publishing, 2006. 407p. ISBN: 1843391066.

CASSEL, E. A.; KAUFMAN, K. M.; MATIJEVIC, E. The effects of bubble size on microflotation. **Water Research**, UK, v. 9, p. 1017 – 1024, 1975.

COSEGLIO, M. S. D. R. **Caracterização de partículas abrasivas segundo diferentes modelos de medição de fator de forma**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.

CROSSLEY, I.A.; HERZNER, J.; BISHOP, S.L.; SMITH, P.D. Going Underground – Constructing New York City’s First Water Treatment Plant, a 1,100ml/d Dissolved Air Flotation, Filtration and UV Facility. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater, 2007, Seoul. **Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems**, 2007, v.1, p.141-152.

EATON, A.D.; CLESCERI, L. S.; RICE, E. W.; GREENBERG, A.E. (Eds.), APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed., **American Public Health Association**, Washington, 2005.

EDZWALD, J. K.; MALLEY Jr., J. P.; YU, C. A conceptual model for dissolved air flotation in Water Treatment. **Water Supply**, USA, v.8, p. 141-150, 1990.

EDZWALD, J. K.; MALLEY Jr., J. P.; YU, C. A conceptual model for dissolved air flotation in Water Treatment. **Water Supply**, USA, v.8, p. 141-150, 1990.

EDZWALD, J. K.; WALSH, J. P.; KAMINSKI, G. S.; DUNN, H. J. Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. **Journal of American Water Works Association - AWWA**, USA, v.84, n. 3, p. 92-100, 1992.

EDZWALD, J. K. Principles and applications of dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 1-23, 1995.

EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E.; AMATO, T. MAGGI, L. J. Integrating high-rate DAF technology into plant design. **Journal of American Water Works Association - AWWA**, USA, v. 91, n. 12, p. 41-53, 1999.

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

EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation and me. **Water Research**, v. 44, p. 2077–2106, 2010.

ESCHER, A. E. **Influência da taxa de aplicação superficial e da concentração de ar na eficiência de clarificação de água de abastecimento em unidades de flotação por ar dissolvido**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

FUKUSHI, K.; TAMBO, N.; MATSUI, Y. A kinetic model for dissolved air flotation in water and wastewater treatment. **Water Science and Technology**, v. 31, n. 3-4, p. 37–47, 1995.

GOCHIN, R. J.; SOLARI, J. The role of hydrophobicity in dissolved air flotation. **Water Res.**, v. 17, n. 6, p. 651-657, 1983.

GRAU, R. A.; HEISKANEN, K. Visual technique for measuring bubble size in flotation machines. **Minerals Engineering**, v. 15, p. 507–513, 2002.

HAHN, H. Wastewater Treatment. In: IVES, K. J. (ed.) **The Scientific Basis of Flotation**. Boston, USA: NATO ASI Series, Martinus Nijhoff, p. 379-413, 1984.

HAN, M.; KIM, W.; DOCKKO, S. Collision efficiency factor of bubble and particle (α_{bp}) in DAF: theory and experimental verification. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 8, p. 139–144, 2001.

HAN, M.; KIM, T.; KIM, J. Effects of floc and bubble size on the efficiency of the dissolved air flotation (DAF) process. **Water Science and Technology**, v. 56, n. 10, p. 109–115, 2007.

HAN, M.; KIM, T.; KIM, H.; PARK, S. Flocculation options in DAF. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seul, Korea. **Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems**, Seoul, 2007.

HAARHOFF, J.; EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation modeling: insights and shortcomings. **Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA**, Great Britain, v. 53, n. 3, p. 127-150, 2004.

IGATHINATHANE, C.; PORDESIMO, L. O.; COLUMBUS, E. P. ; BATCHELOR, W. D.; METHUKU, S. R. Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using Image. **Computers and electronics in agriculture**, v.63, p. 168–182, 2008.

JÖNSSON, L.; LJUNGGREN, M.; LUNDH, M. Characteristics of bubble/floc aggregates in DAF. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems**, Seoul, 2007.

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.

KWAK, D. H.; JUNG, H. J.; LEE, J. W.; KWON, S. B.; KIM, S. J.; YOO, S. J.; WON, C. H.; Rise velocity verification of bubble-floc agglomerates using population balance in the DAF process. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and

Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems**, 2007. v. 1. p. 121-134.

KWAK, D. H.; JUNG, H. J.; KWON, S. B.; LEE, E. J.; WON, C. H.; LEE, J. W.; YOO, S. J. Rise velocity verification of bubble-floc agglomerates using population balance in the DAF process. **Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA**, Great Britain, v. 58, n. 2, p. 85-94, 2009.

KIURU, H. J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). **Water Science and Technology**, Great Britain, v. 43, n. 8, p. 1-7, 2001.

LAPPONI, J. C. **Estatística usando o Excel**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005 – 5ª Reimpressão. ISBN: 85-352-1574-3.

LEE, B.; HA, J.; PARK, J.; YANG, H. Limiting Size of a Particle or a Floc for Flotation in the DAF (Dissolved Air Flotation) Process. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems**, 2007.

LEPPINEN, D.M.; DALZIEL, S. B. Bubble size distribution in dissolved air flotation tanks. **Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA**, Great Britain, v. 53, p. 531-543, 2004.

LEPPINEN, D. M.; DALZIEL, S. B.; LINDEN, P. Modeling the global efficiency of dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 8, p. 159–166, 2001.

LEPPINEN, D. M. Trajectory analysis and collision efficiency during microbubble flotation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 212, p. 431– 442, 1999.

LIERS, S.; BAEYENS, J.; MOCHTAR, J. Modeling dissolved air flotation. **Wat. Environ. Res.**, v. 68, n. 6, Sep./Oct. 1996.

MAIA, K. A. **Influência da velocidade de entrada na zona de contato na eficiência de clarificação de unidades retangulares de flotação por ar dissolvido aplicado no tratamento de águas para abastecimento**. 2010. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

MALVERN Innovative solutions in material characterization. Particle size and shape measurement using image analysis. Disponível em [http://www.malvern.com/malvern/kbase.nsf/allbyno/KB000809/\\$file/MRK664-01.pdf](http://www.malvern.com/malvern/kbase.nsf/allbyno/KB000809/$file/MRK664-01.pdf) Acesso em 24.fev.2011.

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.

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.

MIKLI, V.; KÄERDI, H.; KULU, P.; BESTERCI, M. Characterization of powder particle morphology. **Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.**, 2001, v. 7, n. 1, p. 22–34.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Investigação da coagulação e floculação adequadas para a FAD no tratamento de água com cor aparente moderada e baixa turbidez destinada ao abastecimento público. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 8, n. 11, p. 55-66, abr.2008. *Open Access*. Disponível em: <http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art6_N11.pdf>.

MORUZZI, R. B. **Flotação por ar dissolvido (FAD): Influência da distribuição de tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho do processo**. 2005. 240 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

OLIVEIRA, C.; RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. A new technique for characterizing aerated flocs in flocculation-microbubble flotation system. **International Journal of Mineral Processing**, v. 96, p. 36-44, 2010.

PABST, W.; BERTHOLD, C.; GREGOROVÁ, E. Size and shape characterization of polydisperse short-fiber systems. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, p. 1121–1130, 2005.

PARK, S.; KIM, T.; KIM, Y. Effects of particle properties and bubble size on the efficiency of dissolved air flotation. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems**, 2007.

PERNITSKY, S.; BREESE, S.; WOBMA, P.; GRIFFIN, D.; KJARTANSON, K.; SOROKOWSKY, R. From pilot tests to design on Canada's largest DAF water

treatment plant. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater, 2007, Seoul. **Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems**, 2007, v.1, p. 203-210.

REALI, M. A. P.; DOMBROSKI, S. A. G. Influência da floculação sobre a flotação por ar dissolvido. In: XXV Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental - 96, 1996, Cidade do México. **Anais do XXV Congresso da AIDIS/96**. Cidade do México: AIDIS, 1996. v. 1. p. disco.

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**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

REALI, M. A. P. ; PATRIZZI, L. J. The influence of contact zone configuration on the color and turbidity removal efficiencies of a dissolved air flotation pilot plant. In: The 5th International Conference in Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems**, 2007, v. 1, p. 135-142.

REYNOLDS, T. D.; RICHARDS, P. A. **Unit operations and processes in environmental engineering**. PWS Publishing Company, 2nd ed, 1996.

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.

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. 1ª edição. São Paulo. Editora Blucher, 2009. 340 p. ISBN: 978-85-212-0498-5

RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. **Minerals Engineering**, v. 16, p. 757 – 765, 2003.

SHAWWA, A. R.; SMITH, D. W. Dissolved air flotation model for drinking water treatment. **Can. J. Civ. Eng.**, v. 27, p. 373–382, 2000.

SHERGOLD, H. L. Flotation in mineral processing. In: IVES, K. J. (ed.) **The Scientific Basis of Flotation**. , Boston: NATO ASI Series, p. 229-287, 1984.

SOUZA, I. M. F. **Influência do gradiente médio de velocidade na zona de contato na eficiência de clarificação de água para abastecimento por flotação**. 2012. 85 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento)
- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SOHN, B. Y.; PARK, T. J.; KWON, S.B.; OH, B.S.; KANG, J.W. A case study for process optimization of a DAF plant in Korea. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater, 2007, Seoul. **Proceedings the 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems**, 2007, v.1, p.183-190.

SOHN, B. Y.; KWON, S.B.; MIN, J. H.; KANG, J.W. Characteristics of pretreatment parameters and bubble size influencing DAF efficiency. **Separation Science and Technology**, v. 44, p. 1941-1953, 2009.

VALADE, M. T.; EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E.; DAHLQUIST, J.; HEDBERG, T.; AMATO, T. Particle removal by flotation and filtration: pretreatment effects. **Journal of American Water Works Association**, USA, v. 88, n. 12, p. 35-47, 1996.

ZABEL, T. Flotation in Water Treatment. In: IVES, K. J. (ed.) **The Scientific Basis of Flotation**. , Boston: NATO ASI Series, p. 379-413, 1984.

Apêndice A - Determinação experimental do valor de gradiente médio de velocidade de floculação empregado em escala piloto (Fases 1 e 2)

Conforme mencionado nas *Considerações Iniciais* do item *Material e Métodos* da presente Tese, os valores de gradiente médio de velocidade de floculação (G) empregados nos ensaios realizados em escala piloto (Fases 1 e 2) foram determinados experimentalmente por meio de sensor de torque especialmente adquirido para esta pesquisa.

A Tabela 13 apresenta as principais informações a respeito do sensor de torque utilizado.

Tabela 13 - Principais informações a respeito do sensor de torque empregado nesta pesquisa.

<i>Principais Informações</i>	
Marca	Mackena
Modelo	STD – 5 // AFT - 5
Capacidade	5 N.m

A Figura 69 apresenta fotos do sensor de torque instalado em uma das câmaras de floculação da unidade piloto de flotação utilizada para a realização dos ensaios.

Figura 69 - Fotos do sensor de torque empregado nesta pesquisa.

Os valores de gradiente médio de velocidade de floculação (G) de cada condição de floculação investigada em escala piloto nesta pesquisa foram obtidos a partir da equação clássica proposta por Camp e Stein⁵ (1943, apud BRATBY, 2006, p. 245).

$$G = \sqrt{\frac{w}{\mu}} \quad (9)$$

em que,

w : potência total dissipada por unidade de volume da câmara de floculação (N.m/s.m^3)

μ : viscosidade absoluta do fluido para determinada temperatura (N.s/m^2)

Como,

$$w = \frac{2 \times \pi \times N_r \times T}{V} \quad (10)$$

em que,

N_r : velocidade de rotação (rps)

T : torque fornecido ao fluido (N.m)

V : volume do fluido (m^3)

A união das Equações 9 e 10, resulta:

$$G = \sqrt{\frac{2 \times \pi \times N_r \times T}{V \times \mu}} \quad (11)$$

Desta forma, a partir do emprego do sensor de torque adquirido especialmente para esta pesquisa, foi possível a obtenção dos valores de torque fornecidos ao fluido nas diferentes condições de floculação investigadas e, conseqüentemente, a obtenção dos valores reais de gradiente médio de velocidade de floculação.

⁵ CAMP, T. R.; STEIN, P. C. Velocity gradients and internal work in fluid motion. **J. Boston Soc. Civil Eng.**, v. 30, n. 4, p. 219-237, 1943.

Apêndice B – Cálculo da densidade de partículas floculadas (ρ_f) segundo equação proposta por Haarhoff e Edzwald (2004)

Os valores de densidade das partículas floculadas (ρ_f) utilizados na comparação dos resultados experimentais e teóricos foram calculados segundo a Equação (12) proposta por Haarhoff e Edzwald (2004), a qual estima a massa específica dos flocos a partir da dimensão fractal (D_{fr}) dos mesmos.

$$\rho_f = \rho_w + (\rho_p - \rho_w) \times \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{D_{fr}-3} \quad (12)$$

em que,

ρ_f : massa específica (densidade) da partícula floculada (kg.m^{-3})

ρ_w : massa específica da água (igual a $996,3 \text{ kg.m}^{-3}$ para $\Theta_{\text{água}} = 26^\circ\text{C}$)

ρ_p : massa específica da caulinita (igual a 2.650 kg.m^{-3})

d_f : diâmetro da partícula floculada (μm)

d_p : diâmetro da caulinita (igual a $0,3 \mu\text{m}$)

D_{fr} : dimensão fractal (igual a 2,2)

De acordo com Haarhoff e Edzwald (2004), os valores de dimensão fractal em águas de tratamento convergem normalmente para a faixa de 1,8 (característica de flocos “abertos”, os quais não sedimentam rapidamente) a 2,4 (característica de flocos “compactos”, que sedimentam rapidamente).