UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ALINE ELÉIA ESCHER

INFLUÊNCIA DA TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL E DA CONCENTRAÇÃO DE AR
NA EFICIÊNCIA DE CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO EM UNIDADES
DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

São Carlos – SP

2011

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

ALINE ELÉIA ESCHER

**Influência da Taxa de Aplicação Superficial e da Concentração de Ar na
Eficiência de Clarificação de Água para Abastecimento em Unidades de
Flotação por Ar Dissolvido**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências: área de concentração Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Dr. Marco Antonio Penalva Reali.

SÃO CARLOS – SP
2011

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Escher, Aline Eléia.

E74i Influência da taxa de aplicação superficial e da
concentração de ar na eficiência de clarificação de água
para abastecimento em unidades de flotação por ar
dissolvido. / Aline Eléia Escher ; orientador Marco
Antonio Penalva Realí. São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em
Hidráulica e Saneamento)-- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **ALINE ELÉIA ESCHER**

Título da dissertação: **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.**

Data da defesa: 22/09/2011:

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADA

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

APROVADA

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

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:
Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

*A meus pais Acir e Elóia, por sempre
acreditarem em mim e pelo amor
incondicional, dedico.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Marco Antonio Penalva Reali pela dedicação, paciência, confiança depositada, pelos inúmeros ensinamentos e imprescindível orientação.

A meus pais, por sempre estarem ao meu lado e por terem me dado a oportunidade de correr atrás dos meus sonhos, pelos exemplos de caráter e de profissionais que são e pelo amor. Também pelos conselhos e broncas.

A toda minha família, por sempre acreditar em mim e vibrar comigo a cada conquista. Também pelos insubstituíveis domingos de churrasco na casa da “Vó Laura”, as melhores festas do mundo!

A Fernando Casale Neto, pela paciência, pelo apoio, pelos ensinamentos de engenheiro, pelas inúmeras vezes que leu este trabalho e principalmente por todo carinho.

À Dra. Leila J. Patrizzi e ao Prof. Rodrigo B. Moruzzi pelas contribuições no exame de qualificação e outros esclarecimentos no decorrer da pesquisa.

Aos Professores Luiz A. Daniel e João S. Cordeiro, membros da banca de defesa, pelas contribuições que com certeza engrandeceram este trabalho.

À Eloá, amizade de faculdade, de mestrado e com certeza da vida toda. Obrigada pela companhia nas noites em claro de estudo e de balada, os cuidados de irmã, os almoços deliciosos e por dividir o teto comigo por tanto tempo.

Às minhas amigas de sempre e para sempre Joine, Iara, Grazieli e Patrícia pela sincera amizade, por não deixarem a distância nos afastar e estarem sempre ao meu lado.

Aos amigos que fiz durante a graduação e que levarei para toda a vida Suelen, Lis, Marlon, Vaeza, Corbélia, Smeagol, Vivian, Helô, Carol, Gralha e Marcelo pelo incentivo, pela amizade e pelo companheirismo. Sim, nossas noites em claro valeram à pena: o conhecimento e nossa amizade ficarão para sempre! Também ao Marcon, que o período do mestrado deu oportunidade de conhecer melhor. Vocês com certeza tornaram os dias gelados de Irati muito mais agradáveis.

Aos Professores Hélio, Adelena, Cacá, Jeanette, Waldir e Rafaelo por todos os ensinamentos e incentivo a buscar sempre mais conhecimento. Vocês foram mais que professores, são também exemplos e amigos.

Ao meu amigo Pedro, um grande engenheiro mesmo sem diploma, por incentivar esta caminhada desde os primeiros passos.

Às amigas que fiz em São Carlos Solange e Ludimila, pela sempre agradável companhia e por serem sempre verdadeiras. Também ao Gabriel e à Irene, pela amizade e companheirismo.

À Maria Teresa, não só pela ajuda nas análises desta pesquisa, mas pela mãezona que foi muitas vezes.

Ao Narumi por me ajudar com a plotagem dos vetores resultantes dos trabalhos com microADV.

Aos colegas da unidade piloto André, Cláudio e Kisner pela paciência, os vários ensinamentos e sugestões.

Ao Alcino pela presteza e dedicação ao fazer as adaptações e resolver os probleminhas na unidade piloto independente do horário e do dia, sempre com eficiência e bom humor.

Aos funcionários do SHS em especial Pavi, Sá e Rose por toda ajuda prestada durante o período deste mestrado.

Ao CNPq pela bolsa de estudo e recursos concedidos à execução da pesquisa.

Àqueles que embora não citados aqui, contribuíram para a concretização desta importante etapa de minha vida.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO – CONCEITO E HISTÓRICO	4
3.2 FATORES INTERVENIENTES NA EFICIÊNCIA DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO	7
3.2.1 Configuração do Reator – Zona de Contato e Zona de Separação	7
3.2.2 Pré-Tratamento da Água Bruta	12
3.2.3 Tamanho das Micro-bolhas de Ar	14
3.2.4 Concentração das Micro-bolhas de Ar	16
4. MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
4.1.1 UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO	20
4.2 Etapa I	27
4.2.1 Água de Estudo da Etapa I – Composição	27
4.2.2 Coagulação e Floculação da Água de Estudo e demais Parâmetros Fixados	29
4.2.3 Concentração de micro bolhas de ar	31
4.2.4 Zona de Contato - Taxas de Aplicação Superficial e Tempos de Contato	32
4.2.5 Taxas de Aplicação Superficial na Zona de Separação	33
4.2.6 Etapa I - Monitoramento dos Ensaios	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Considerações Iniciais	41
5.2.1 Considerações Iniciais	41
5.1.2 Caracterização da Água Bruta dos Ensaios	42

5.2.4 Resultados obtidos com Taxa de Aplicação Superficial de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associada às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e às A/V de 4,90, 6,41 e $7,87 \text{ g ar.m}^{-3}$ de água.....	49
5.2.5 Resultados obtidos com Taxa de Aplicação Superficial de $14,9 \pm 0,3 \text{ m.h}^{-1}$ associada às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e às A/V de 4,90, 6,41 e $7,87 \text{ g ar.m}^{-3}$ de água.....	55
5.2.6 Apresentação Geral dos Resultados, quanto à turbidez e considerações finais....	58
5.3 ETAPA II - Caracterização do Escoamento na Zona de Separação.....	63
5.3.1 Considerações Iniciais	63
5.3.2 Caracterizações dos Padrões de Escoamento na Zona de Separação com TAS aproximada de $12,3 \text{ m.h}^{-1}$ com concentrações de ar fornecido para a flotação de 4,90; 6,41 e $7,87 \text{ g.m}^{-3}$ de água.....	64
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
APÊNDICE	78

RESUMO

Os objetivos deste trabalho foram verificar a influência das taxas de aplicação superficial das zonas de separação e de contato e da concentração de micro bolhas de ar na eficiência da remoção de partículas em unidades de flotação aplicadas ao tratamento de água para abastecimento público e, caracterizar a estrutura de escoamento no interior da zona de separação, com a utilização de uma planta piloto de flotação por ar dissolvido. Os trabalhos relativos à pesquisa foram divididos em duas etapas: a primeira delas contemplou a operação de unidade piloto alimentada com água sintética, utilizando três valores de taxa de aplicação superficial na zona de separação associadas a duas taxas de aplicação superficial na zona de contato, cada qual com três concentrações de ar fornecido à flotação. Foram mantidos fixos os parâmetros: tempo de contato na zona de contato, tempo de floculação, gradiente médio de floculação e velocidade *cross-flow*. Os resultados desta etapa foram monitorados com base na eficiência de remoção de cor e turbidez. As maiores eficiências de remoção, 87,5% para turbidez e 96,8% de cor aparente foram obtidos para as menores taxas de aplicação superficial nas zonas de contato e separação estudadas, associadas à concentração de ar de $4,90 \text{ g.cm}^{-3}$ de água. Este, entre outros resultados, levou à conclusão de que tal concentração de ar fornecida à flotação forneceu sempre os menores residuais de cor e turbidez nas condições investigadas. Quanto à taxa de aplicação superficial na zona de contato, $136,3 \text{ m.h}^{-1}$ resultou em maiores eficiências de clarificação, sendo que o aumento para $172,8 \text{ m.h}^{-1}$ causou ligeira queda na eficiência. Finalmente, quanto à taxa de aplicação superficial na zona de separação, a menor taxa ($9,8 \text{ m.h}^{-1}$) foi aquela onde as maiores eficiências de clarificação foram obtidas, as quais decresceram à medida que a taxa foi aumentada. Na segunda etapa utilizou-se a sonda microADV na caracterização do escoamento no interior da zona de separação. Foram realizadas caracterizações para as três concentrações de ar fornecidas para a flotação estudadas na etapa I, mantendo-se fixos a taxa de aplicação superficial e o tempo na zona de contato ($136,3 \text{ m.h}^{-1}$ e 53 s, respectivamente), a taxa de aplicação superficial na zona de separação ($12,3 \text{ m.h}^{-1}$), a vazão de entrada e a velocidade *cross-flow*, conforme a etapa I. Para as três condições estudadas, adotou-se uma malha virtual de coleta de dados de duas dimensões, composta por 98 pontos igualmente espaçados, sendo 14 na altura e 7 paralelos ao comprimento. O tempo de coleta de dados em cada ponto foi de 2 min com uma frequência de amostragem de 50 Hz. Os vetores de velocidade resultantes foram plotados em esquemas ilustrativos, afim de se comparar os três perfis obtidos. Observou-se em todos os casos um fluxo em curto-circuito na região superior da zona de separação e logo abaixo desta, um fluxo descendente no sentido dos coletores ao fundo da unidade. Quando comparadas, apenas pequenas diferenças quanto à espessura da região de curto circuito superior foram verificadas entre as três situações abordadas, as quais não explicam as diferentes eficiências de clarificação obtidas na etapa I da pesquisa, relacionadas à concentração de ar fornecida à flotação.

Palavras chave: FAD, Tratamento de Água para Abastecimento, Velocímetro Acústico de Efeito *Doppler*, Zona de Contato, Zona de Separação.

ABSTRACT

The objectives of this study were to determine the influence of hydraulic surface loading of contact and separation zones and of the air micro bubbles concentration in the particle removal efficiency in flotation units applied to water treatment for public supply and also characterize the flow structure into the separation zone. The works were divided into two stages: the first included the operation of the pilot plant fed with synthetic water, using three values of hydraulic surface loadings in the separation zone associated with two hydraulic surface loadings in the superficial zone of contact, each one with three concentrations of air supplied to the flotation. Were kept fixed parameters: contact time in the contact zone, flocculation time, mean flocculation gradient and cross-flow velocity. The results of this step were monitored based on the removal efficiency of color and turbidity. The higher removal efficiencies, 87.5% of turbidity and 96.8% apparent color were obtained for the lower hydraulic surface loading of contact and separation zones studied, associated with air concentration of 4.90 g.cm⁻³ of water. This, among other results, led to the conclusion that this air supplied to the flotation concentration always provided the lowest residual color and turbidity values, under the conditions investigated. As for the hydraulic surface loading in the contact zone, 136.3 m.h⁻¹ resulted in higher efficiencies for clarification and when increasing to 172.8 m.h⁻¹ slight drop in efficiency was caused. Finally, regarding separation zone hydraulic surface loading, the lowest rate (9.8 m.h⁻¹) was the one in which the highest efficiencies of clarification were obtained, which decreased, as the hydraulic surface loading was increased. In the second step, the probe microADV was used to characterize the flow inside the separation zone. Characterizations were carried out for the three air concentrations supplied to the flotation studied on the first step, fixing contact zone hydraulic surface loading and time (136.3 m.h⁻¹ and 53 s, respectively), the separation zone hydraulic surface loading (12.3 m.h⁻¹), the input flow and cross-flow velocity as step I. For the three conditions studied, we adopted a of two-dimensional virtual data collection grid with 98 equally spaced points, 14 in height and 7 parallel to the length. The data collection time at each point was 2 min with a sampling frequency of 50 Hz. The resulting velocity vectors were plotted on illustrative diagrams in order to compare the three profiles obtained. A short-circuit flow in the upper part of the separation zone and below this, a downward flow toward the bottom of the collector unit were observed in all cases. In comparison, only small differences in the thickness of the upper region of short circuit were observed between the three situations discussed, which do not explain the different efficiencies of clarification obtained in the first step of the research related to the air bubble concentration.

Key Words: Acoustical Doppler Velocimeter, Contact Zone, DAF, Separation Zone, Water Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Avanços na técnica de flotação por ar dissolvido ao longo dos anos – incrementos nas taxas de aplicação superficial e diminuição dos tempos de floculação. (Fonte: adaptado de Edzwald, 2010).....	7
Figura 3.2 - Fluxo Estratificado Padrão na Zona de Separação no Processo de FAD (Fonte: Adaptado de Edzwald, 2007)	10
Figura 4.1 - Diagrama dos Ensaio da Etapa I.....	19
Figura 4.2 - Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido	21
Figura 4.3 - Reservatórios de Coagulante e Alcalinizante e Bombas de Aplicação dos respectivos Produtos.....	22
Figura 4.4 - Local de Adição de Coagulante e Alcalinizante.....	22
Figura 4.5 - Válvulas Agulha para Despressurização da Vazão Recirculada	23
Figura 4.6 - Vertedor Final de Saída da PPFAD.....	24
Figura 4.7 - Câmara de Saturação e Manômetro (no detalhe)	25
Figura 4.8 - Corte transversal da PPFAD	25
Figura 4.9 - Aquecedores a Gás para Manutenção da Temperatura.....	26
Figura 4.10 - Tela de Entrada do <i>Software</i> de Controle da PPFAD.....	27
Figura 5.1 - Gráfico de Turbidez Residual (UNT): TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1 \text{ s}$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m ⁻³ de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$ e $Ve_{ZC} = 180,0 \text{ m.h}^{-1}$	46
Figura 5.2 – Gráfico de Cor Residual (UH): TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m ⁻³ de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$ e $Ve_{ZC} = 180,0 \text{ m.h}^{-1}$	47
Figura 5.3 – Gráfico de Turbidez Residual (UNT): TAS_{ZS} de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1 \text{ s}$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$)	

com A/V de 3,33; 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m ⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T _F = 17,2 min; G _F = 110 s ⁻¹ ; V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹ e Ve _{ZC} = 180,0 m.h ⁻¹	51
Figura 5.4 – Gráfico de Cor Aparente Residual (UH): TAS _{ZS} de 12,3 ± 0,2 m.h ⁻¹ associado às TAS _{ZC} de 136,3 ± 2,5 (T _{ZC} 53 ± 1 s) e 172,8 ± 3,2 m.h ⁻¹ (T _{ZC} 35 ± 1 s) com A/V de 3,33; 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m ⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T _F = 17,2 min; G _F = 110 s ⁻¹ ; V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹ e Ve _{ZC} = 180,0 m.h ⁻¹	52
Figura 5.5 – Gráfico de Turbidez Residual (UNT): TAS _{ZS} de 14,9 ± 0,3 m.h ⁻¹ associado às TAS _{ZC} de 136,3 ± 2,5 (T _{ZC} 53 ± 1 s) e 172,8 ± 3,2 m.h ⁻¹ (T _{ZC} 35 ± 1 s) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m ⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T _F = 17,2 min; G _F = 110 s ⁻¹ ; V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹ e Ve _{ZC} = 180,0 m.h ⁻¹	56
Figura 0.6 – Gráfico de Cor Aparente Residual (UH): TAS _{ZS} de 14,9 ± 0,3 m.h ⁻¹ associado às TAS _{ZC} de 136,3 ± 2,5 (T _{ZC} 53 ± 1 s) e 172,8 ± 3,2 m.h ⁻¹ (T _{ZC} 35 ± 1 s) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m ⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T _F = 17,2 min; G _F = 110 s ⁻¹ ; V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹ e Ve _{ZC} = 180,0 m.h ⁻¹	57
Figura 5.7 - Gráficos de Turbidez Residual sob o ponto de vista das TAS _{ZS} , para cada TAS _{ZC} investigada	59
Figura 5.8 - Gráficos de Turbidez Residual sob o ponto de vista das TAS _{ZC} , para cada TAS _{ZS} investigada	60
Figura 5.9 - Perfil de Escoamento na Zona de Separação com TAS de 12,3 ± 0,2 m.h ⁻¹ com concentração de ar igual a 4,90 g.m ⁻³ de água (R = 6%). Parâmetros Fixos: Q _E = 4,6 m ³ .h ⁻¹ , P _{SAT} = 450 KPa, TAS _{ZC} = 136,3 ± 2,5 m.h ⁻¹ e V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹	65
Figura 5.10 - Perfil de Escoamento na Zona de Separação com TAS de 12,3 ± 0,2 m.h ⁻¹ com concentração de ar igual a 6,41 g.m ⁻³ de água (R = 8%). Parâmetros Fixos: Q _E = 4,6 m ³ .h ⁻¹ , P _{SAT} = 450 KPa, TAS _{ZC} = 136,3 ± 2,5 m.h ⁻¹ e V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹	66
Figura 5.11 - Perfil de Escoamento na Zona de Separação com TAS de 12,3 ± 0,2 m.h ⁻¹ com concentração de ar igual a 7,87 g.m ⁻³ de água (R = 10%). Parâmetros Fixos: Q _E = 4,6 m ³ .h ⁻¹ , P _{SAT} = 450 KPa, TAS _{ZC} = 136,3 ± 2,5 m.h ⁻¹ e V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Concentrações Estudadas de Ar Dissolvido fornecido para a Flotação (A/V) em g de ar.m ⁻³ de água bruta	32
Tabela 4.2 - Características da Zona de Contato para as TAS _{ZC} estudadas	33
Tabela 4.3 - Taxas de Aplicação Superficial na Zona de Separação.....	34
Tabela 4.4 - Monitoramento dos Ensaios	36
Tabela 5.1 - Parâmetros fixados na Etapa I	42
Tabela 5.2 - Caracterização da Água Bruta Sintética	43
Tabela 5.3 - Caracterização da Água Coagulada	43
Tabela 5.4 - Resultados de Turbidez, Cor Aparente, UV ₂₅₄ para TAS _{ZS} de 9,8 ± 0,2 m.h ⁻¹ associado às TAS _{ZC} de 136,3 ± 2,5 (T _{ZC} 53 ± 1 s) e 172,8 ± 3,2 m.h ⁻¹ (T _{ZC} 35 ± 1 s) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m ⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T _F = 17,2 min; G _F = 110 s ⁻¹ ; V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹	45
Tabela 5.5 - Resultados de Turbidez, Cor Aparente, UV ₂₅₄ para TAS _{ZS} de 12,3 ± 0,2 m.h ⁻¹ associado às TAS _{ZC} de 136,3 ± 2,5 (T _{ZC} 53 ± 1 s) e 172,8 ± 3,2 m.h ⁻¹ (T _{ZC} 35 ± 1 s) com A/V de 3,33; 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m ⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T _F = 17,2 min; G _F = 110 s ⁻¹ ; V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹	50
Tabela 5.6 - Resumo dos Resultados obtidos por Pioltine (2011).	54
Tabela 5.7 - Resultados de Turbidez, Cor Aparente, UV ₂₅₄ para TAS _{ZS} de 14,9 ± 0,3 m.h ⁻¹ associado às TAS _{ZC} de 136,3 ± 2,5 (T _{ZC} 53 ± 1 s) e 172,8 ± 3,2 m.h ⁻¹ (T _{ZC} 35 ± 1 s) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m ⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T _F = 17,2 min; G _F = 110 s ⁻¹ ; V _{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h ⁻¹ e Ve _{ZC} = 180,0 m. h ⁻¹	55

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

” – Polegada, medida de comprimento

$\mu\text{S.cm}^{-1}$ – Microsiemens por centímetro, medida de condutividade elétrica

A/V – Concentração de ar fornecida para flotação

C_{ZS} – Comprimento da zona de separação

DN – Diâmetro nominal

FAD – Flotação por ar dissolvido

g.cm^{-3} – Grama por centímetro cúbico, medida de concentração comum

G_{F} – Gradiente de floculação

G_{MR} – Gradiente de mistura rápida

K_{H} – Constante da Lei de Henry

kPa – Quilopascal, medida de pressão

L_{ZS} – Largura da zona de separação

m – metros, medida de comprimento

m.dia^{-1} – metros por dia, medida de taxa de aplicação superficial (velocidade)

m.h^{-1} – metros por hora, medida de taxa de aplicação superficial (velocidade)

mg.L^{-1} – miligramas por litro, medida de concentração comum

min – minutos, medida de tempo

mV – milivolt, medida de tensão elétrica

$N.A._{\text{ZS}}$ – Altura da lâmina d’água na zona de separação

$^{\circ}\text{C}$ – graus Celcius

P = Pressão relativa

P_{atm} = Pressão atmosférica local

PPFAD – Planta piloto de flotação por ar dissolvido

P_{SAT} – Pressão de saturação da câmara de saturação

PZ – Potencial zeta

Q_E – Vazão de entrada

Q_R – Vazão de recirculação

R – Razão de recirculação de água clarificada

SST – Sólidos suspensos totais

TAS_{ZC} – Taxa de aplicação superficial na zona de contato

TAS_{ZS} – Taxa de aplicação superficial na zona de separação

T_F – Tempo de floculação

T_{MR} – Tempo de mistura rápida

T_{ZC} – Tempo de Residência na Zona de Contato

UNT – Unidades Nefelométricas de Turbidez

UV_{254} – Absorbância em luz ultravioleta com comprimento de onda de 254 nm

V_{CF} – Velocidade *cross-flow*

Ve_{ZC} – Velocidade de entrada na zona de contato

ZC - Zona de contato

ZS – Zona de separação

1. INTRODUÇÃO

A flotação consiste num processo de separação de partículas líquidas ou sólidas de uma fase líquida pela aplicação de bolhas de gás, normalmente o ar. As partículas sólidas têm seu empuxo aumentado com a adesão das bolhas de gás, o que faz com que ascendam à superfície do líquido, de onde são removidas após atingirem concentração adequada. Entre as técnicas de flotação, a flotação por ar dissolvido (FAD) com recirculação pressurizada é a mais amplamente empregada no tratamento de águas para abastecimento (REALI, 1991).

A FAD vem sendo aplicada ao tratamento de água há quase um século e importantes avanços têm sido alcançados desde então, principalmente nos últimos 50 anos, os quais levaram à concepção de unidades de alta taxa. Ainda assim existem muitas lacunas a serem preenchidas, sendo consenso na indústria de água a necessidade de mais pesquisas para a otimização do processo de FAD, bem como obtenção de critérios confiáveis de projeto, aumento dos níveis de segurança e qualidade, aumento da eficiência na clarificação, diminuição do tempo de floculação e, ainda, redução dos custos de investimento e operação. Neste sentido, a falta de experiência e de pesquisas acerca das características hidrodinâmicas do processo é notável (LUNDH *et. al.*, 2001).

Quanto à taxa de aplicação superficial, ainda esperam-se alguns avanços para que se possa aliar a clarificação eficiente a unidades mais compactas, já que o tamanho de unidades FAD está ligado principalmente à taxa de aplicação superficial (TAS) em sua zona de separação, que depende principalmente da velocidade de ascensão do conjunto floco-bolha que, por sua vez, depende do tamanho e densidade dos flocos, além do número de micro bolhas de gás aderidas,

relacionados diretamente à eficiência do tratamento (REALI,1991). Os estudos existentes contemplam a TAS da unidade de flotação como um todo, porém ainda existem poucos estudos que avaliam separadamente as zonas de contato e separação.

Outro fator de grande importância ao processo é a concentração de micro bolhas de ar na zona de contato que, segundo Edzwald (2010), é a variável mais importante de controle e operação de uma unidade de FAD. A concentração de micro bolhas de ar é alterada principalmente pela vazão de recirculação e pela pressão no interior da câmara de saturação, tornando evidente a importância da otimização deste parâmetro, já que está diretamente relacionado aos custos de operação nas estações.

Neste contexto, a presente pesquisa buscou verificar a influência da taxa de aplicação superficial na zona de separação e da massa de ar dissolvido fornecida para o processo na eficiência da separação de partículas em suspensão de uma unidade piloto de FAD. A investigação experimental envolveu não só a caracterização do desempenho da unidade piloto no que se refere à eficiência da clarificação, mas também a caracterização da estrutura de fluxo na zona de separação com emprego de sonda ultrassônica (MicroADV) para as situações investigadas. Os resultados obtidos fornecem subsídios para o projeto de unidades FAD retangulares e elementos para uma melhor compreensão da dinâmica de formação dos aglomerados contendo micro bolhas de ar e material floculado em função da variação dos valores de taxa tanto na zona de contato quanto na zona de separação, para diferentes condições de fornecimento de ar dissolvido.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo verificar a influência das taxas de aplicação superficial na zona de separação e na zona de contato, da concentração de micro bolhas de ar na eficiência da remoção de partículas em unidades de flotação aplicadas ao tratamento de água para abastecimento público e, caracterizar a estrutura do escoamento no interior da zona de separação da unidade piloto de flotação por ar dissolvido utilizada nos ensaios.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO – CONCEITO E HISTÓRICO

A flotação pode ser definida como um processo de separação de partículas sólidas ou líquidas, de outra fase líquida através da utilização de bolhas de gás, comumente o ar. As bolhas aderem à superfície das partículas acarretando no aumento de seu empuxo, fazendo com que estas ascendam à superfície da fase líquida, de onde podem ser removidas. Existem três diferentes tipos de flotação, sendo elas: flotação por ar disperso, flotação eletrolítica e flotação por ar dissolvido (FAD). Na FAD, as bolhas de gás são geradas pela liberação de parcela de gás, previamente dissolvido em massa líquida, devido a uma redução da pressão a que este líquido é mantido. Pode-se promover a diminuição dessa pressão e liberação do gás dissolvido por pressurização, submetendo parcela do efluente já clarificado a uma câmara de pressurização, onde é promovida a dissolução do gás no líquido. Ao sair da câmara pressurizada, com a diminuição da pressão, ocorre a liberação das bolhas de gás.

A FAD é aplicada ao processo de clarificação de águas como alternativa ao processo de sedimentação, apresentando vantagens como: I. altas taxas de aplicação superficial (maiores que 10 m.h^{-1}), resultando em unidades compactas (SCHOFIELD, 2001; EDZWALD & WALSH, 1992); II. tempos de detenção hidráulica mais curtos em comparação à sedimentação (EDZWALD & WALSH, 1992); III. partida rápida e capacidade para resistir às obstruções periódicas (SCHOFIELD, 2001); IV. menor concentração de produtos químicos: não necessitando na maioria das vezes da assistência de polímeros (EDZWALD & WALSH, 1992; SCHOFIELD, 2001); V. efluente de alta qualidade química e biológica (SCHOFIELD, 2001); VI.

processo bastante resistente a variações hidráulicas e qualitativas da água (SCHOFIELD, 2001); VII. é mais eficiente na separação de partículas de baixa densidade, tais como algas, águas de baixa turbidez e cor elevada, quando comparada à sedimentação convencional (ZABEL, 1985); VIII. tanques menores de floculação são requeridos, com tempos curtos de retenção, já que necessita de flocos menores que a sedimentação (EDZWALD, 1995); IX. quando seguida de filtração, maiores taxas ou mais longas carreiras de filtração podem ser obtidas, quando comparadas com a sedimentação associada a filtros (EDZWALD & WALSH, 1992); X. o lodo produzido pela FAD é mais concentrado que aquele produzido na decantação, reduzindo o seu custo de disposição final (REALI, 1991); XI. promove a remoção por *stripping* de compostos orgânicos voláteis, sabor e odor (REALI, 1991; EDZWALD, 2009).

Schofield (2001) apresenta entre as desvantagens da FAD, o consumo de energia elétrica associado ao uso da bomba de recirculação. Contudo, tais custos podem ser total ou parcialmente compensados pela menor necessidade de aplicação de produtos químicos e pela geração de um lodo bastante espesso, reduzindo os custos ligados a sua disposição final.

O processo de flotação foi inicialmente utilizado na indústria mineradora há mais de 100 anos, sendo amplamente empregada no setor por ser um dos meios mais econômicos de separação de minérios. A flotação difundiu-se para diversas áreas: tratamento de esgotos industriais, tratamento de águas residuárias de refinarias, tratamento de resíduos de indústria papelreira, tratamento de esgotos domésticos, entre outras (SHAWWA, 1998). Porém, a modalidade “flotação por ar dissolvido”, teve sua patente registrada em 1924 quando aplicada à indústria papelreira (GREGORY, 1997).

Há registros de que a Finlândia tenha sido a pioneira no uso da FAD na clarificação de água, na década de 1920 (HAARHOFF, 2007), expandindo-se então para África do Sul, Reino Unido e Escandinávia nos anos 1960, países onde adquiriu grande importância. A tecnologia chegou à América do Norte nos anos 1980, sendo utilizada no tratamento de água com baixa alcalinidade, cor e algas; estando em grande expansão atualmente (EDZWALD, 2009).

O processo de desenvolvimento da tecnologia FAD, embora já venha sendo utilizado há cerca de 100 anos, tem visto maiores desenvolvimentos nos últimos 40 anos. Haarhoff (2008) afirma inclusive que a FAD passou de tecnologia em desenvolvimento na década de 1980 a uma tecnologia consolidada em 1990. Entre os principais desenvolvimentos tecnológicos tem-se o incremento das TAS, onde unidades convencionais, com TAS entre 10 e 15 m.h⁻¹ passaram aos poucos a dar lugar a unidades de alta taxa (de 15 a 30 m.h⁻¹ ou mais) atualmente. Neste contexto, o tempo de floculação foi reduzido de tempos próximos aos empregados na sedimentação (20 a 30 min) até cerca de 10 min ou menos, atualmente. A Figura 3.1 ilustra o desenvolvimento da FAD aplicada ao tratamento de água ao longo do tempo.

Figura 3.1 – Avanços na técnica de flotação por ar dissolvido ao longo dos anos – incrementos nas taxas de aplicação superficial e diminuição dos tempos de floculação. (Fonte: adaptado de Edzwald, 2010)

3.2 FATORES INTERVENIENTES NA EFICIÊNCIA DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

3.2.1 Configuração do Reator – Zona de Contato e Zona de Separação

Em uma unidade de flotação, o processo se dá em dois compartimentos: o primeiro deles, a zona de reação é onde há contato e adesão das bolhas com os flocos; o segundo, a zona de clarificação, promove condições para a ascensão do conjunto floco/bolha à superfície. A Zona de Reação (ou Zona de Contato) caracteriza-se como uma região de mistura visando a colisão e a agregação entre as microbolhas e os flocos. A Zona de Separação (ou Zona de Clarificação) por sua vez, é a região onde as condições de escoamento devem favorecer a manutenção

da ligação e propiciar a ascensão do conjunto micro-bolhas e flocos. (Lundh et al., 2002).

Segundo Haarhoff e Van Vuuren (1995) três parâmetros são considerados importantes para a flotação na Zona de Separação: a velocidade cross-flow, a geometria e o tamanho da zona de separação. Tais parâmetros possuem grande importância para a formação de um escoamento estratificado na zona de separação. Segundo Lundh et al. (2002), a estratificação do fluxo é um fator importante para que se tenha uma boa eficiência na FAD.

Lundh et al. (2002), a fim de verificar como as características do escoamento afetam o processo de clarificação, realizaram um estudo da estrutura de escoamento unidade retangular de FAD em escala piloto, variando comprimento, altura e inclinação da parede da zona de contato, testando TAS_{ZC} entre de 40 a 98 $m.h^{-1}$. Durante os ensaios, foi adotada recirculação de 10% e pressão de saturação de 5 bar. Para a caracterização do escoamento nas diferentes configurações da unidade, foi utilizado um velocímetro acústico de feixe Doppler (ADV). Os estudos demonstraram que o escoamento na ZC é caracterizado por uma região baixa de turbulência e uma outra de escoamento tipo *plug-flow* ao alto. As TAS_{ZC} maiores, função de menores áreas da ZC, diminuem a turbulência no local enquanto valores menores de TAS causam seu aumento. A partir dos resultados, o autor sugere o valor de 65 $m.h^{-1}$ como parâmetro de projeto para a ZC. Embora a altura e a inclinação da parede da ZC não tenham grande influencia na geração de região turbulenta, para garantir tanto o fluxo em pistão quanto a mistura no interior do compartimento, sugere-se altura maior que 0,81 m para a parede. Na zona de separação, o escoamento se caracterizou estratificado, sendo influenciado pelos valores da velocidade *cross-flow*, relativa à altura da lamina d'água sobre a parede

que separa o compartimento da ZC. Valores de velocidade *cross-flow* superiores a 37 m.h^{-1} resultaram em escoamentos de estratificação mais definida, a qual é tida como necessária à eficiente separação dos flocos. Além disso, aumentos na altura da parede aumentam a densa área de fluxo em pistão ao fundo da ZC.

Os estudos de Kiuru, (2000)¹; Lundh et. al., (2000)² *apud* Edzwald, (2007) apontam que unidades de flotação por ar dissolvido de alta taxa de aplicação superficial exibem um fluxo estratificado movendo-se horizontalmente próximo ao topo da Zona de Separação até o final da parede seguido de um retorno horizontal abaixo deste fluxo, antes de se dirigir ao fundo do tanque. Um esquema simplificado da estratificação do fluxo na Zona de Separação é apresentado na Figura 3.2. O fluxo estratificado padrão na Zona de Separação é o fator chave na remoção de agregados de flocos-bolhas, já que a área de clarificação é aumentada em cerca de três vezes. Esse aumento da área de clarificação faz com que a TAS requerida no processo seja reduzida. Desta forma, desde que se consiga um fluxo padrão estratificado, elevadas TAS podem ser aplicadas na Zona de Separação (EDZWALD, 2007).

¹ Kiuru, H.J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest or third one. 4th International Conference on DAF in Water and Wastewater Treatment, Helsinki, 2000.

² LUNDH, M.; JONSSON, L.; DAHLQUIST, J. Experimental Studies of the Fluid Dynamics in the Separation Zone in Dissolved Air Flotation. Water Research, v. 34, p. 21-30, 2000.

Figura 3.2 - Fluxo Estratificado Padrão na Zona de Separação no Processo de FAD
(Fonte: Adaptado de Edzwald, 2007)

Reali e Patrizzi (2007) realizaram estudo de caracterização da estrutura de fluxo no interior da zona de contato com oito diferentes configurações numa unidade piloto de flotação por ar dissolvido, utilizando a sonda microADV. Em todos os casos, a parede defletora que separa a zona de contato da zona de separação foi mantida em posição vertical, sendo avaliados diferentes valores de tempo de contato e taxa de aplicação superficial na zona de contato e, velocidade cross-flow. Além da caracterização do fluxo de escoamento, o trabalho abordou a influência das diferentes configurações de ZC estudadas na eficiência de clarificação da água sintética de estudo. Os resultados obtidos mostraram que tempos de contato entre 34 e 65 s associados a taxas de aplicação superficial entre 67 até 180 m.h⁻¹ proporcionaram remoção de turbidez a menos de 1 UNT e remoção de cor a níveis satisfatórios (cor menor ou igual a 7 UH ou eficiência maior igual 87,3%). Entre as condições estudadas, os melhores resultados (0,21 UNT de turbidez residual e cor inferior a 2UH) foram obtidos para a combinação da taxa de aplicação superficial na zona de contato igual a 180 m.h⁻¹, associada a 34 s de tempo de contato e velocidade *cross-flow* igual a 45 m.h⁻¹.

ARAUJO (2010), utilizando a mesma água sintética de MAIA (2010) e REALI e PATRIZZI (2007), avaliou a influência da velocidade *cross-flow* na eficiência da clarificação de água por FAD. Os trabalhos da pesquisa envolveram duas etapas, a primeira delas buscou determinar as condições de coagulação ideais para a água de estudo. Como resultado, duas condições de coagulação foram obtidas, uma com potencial zeta próximo a zero e outra de potencial positivo. Os resultados obtidos na etapa 1 foram aplicadas à segunda, sendo que a água coagulada nas duas condições diferentes foi aplicada a uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido com TAS_{ZC} de $180,0 \text{ m.h}^{-1}$ combinada com duas diferentes TAS_{ZS} : $7,67$ e 15 m.h^{-1} , e $8 V_{CF}$ foram estudadas: $40, 70, 100, 150, 200, 250, 350, 630 \text{ m.h}^{-1}$. Os resultados apontaram que TAS_{ZS} de $7,67 \text{ m.h}^{-1}$ confere maior eficiência ao tratamento quando comparado a 15 m.h^{-1} para a água em ambas as condições de coagulação. Quanto ao potencial zeta, o valor positivo foi capaz de apresentar maior remoção de cor e turbidez, principalmente nos maiores valores de V_{CF} . Para todos os casos, valores de V_{CF} de $40, 70$ e 100 m.h^{-1} apresentaram remoção satisfatória de cor e turbidez.

MAIA (2010) estudou a influência da velocidade de entrada da zona de contato (Ve_{ZC}) em unidades FAD retangulares, na eficiência da clarificação de água para abastecimento. Para o estudo, utilizou água sintética composta por $8,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de caulim e 1 mg.L^{-1} de ácido húmico. A primeira fase da pesquisa contemplou ensaios em escala de bancada utilizando equipamento de flotatestes com objetivo de determinar as condições ideais de coagulação da água de estudo. Os ensaios da primeira fase levaram à conclusão de que para a água sintética estudada, as doses do coagulante sulfato de alumínio de $22,5 \text{ mg.L}^{-1}$ e $42,5 \text{ mg.L}^{-1}$, eram capazes de tratar a água a valores satisfatórios de turbidez e cor. Utilizando PPFAD com TAS_{ZC} constante de 180 m.h^{-1} , variou a velocidade de entrada da zona de contato em 11

diferentes valores, chegando à conclusão de que na faixa de Ve_{ZC} entre 62,2 e 12.432,4 $m.h^{-1}$, incrementos no valor da velocidade não causaram quedas significantes na remoção de turbidez, sendo as maiores eficiência obtida no tratamento para a Ve_{ZC} na faixa de valores entre 124,3 e 180,2 $m.h^{-1}$.

3.2.2 Pré-Tratamento da Água Bruta

De acordo com Shawwa & Smith (2000), pode-se dividir o processo de FAD em dois sub-processos: o pré-tratamento e a flotação. O pré-tratamento consiste em desestabilizar e flocular as partículas presentes.

A água bruta geralmente contém diversas partículas coloidais, substâncias húmicas e microrganismos, os quais em sua maioria apresentam-se carregados negativamente. As partículas coloidais podem ainda ter polímeros adsorvidos em sua superfície. Em ambos os casos, é necessário que se altere a força iônica do meio, promovendo a desestabilização das partículas, num processo conhecido como coagulação. A coagulação é composta por dois fenômenos: um deles químico, em que o coagulante reage com a água formando espécies hidrolisadas com carga positiva, e dependente da concentração do metal e pH final da mistura; o outro, essencialmente físico, em que as espécies hidrolisadas são transportadas para que haja contato entre as impurezas presentes no meio líquido. (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

De acordo com Longhusrt & Graham (1987) *apud* Reali (1991), o tratamento químico eficiente é fundamental para a obtenção de uma floculação adequada, sendo de suma importância a existência de dose acurada de coagulante e pH adequado. Doses insuficientes de coagulante prejudicam a formação de flocos e

doses excessivas produzem grandes flocos, os quais tendem a sedimentar ao invés de flotar.

Realí (1991) sugere que as condições ótimas de coagulação para determinada água a ser tratada por flotação, devem ser previamente determinadas em escala de laboratório, em equipamentos denominados flotatestes.

Quando às condições de coagulação, Maia (2010) e Araujo (2010) realizaram estudo em escala de bancada para água de estudo preparada com água de poço profundo e adição de $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de ácido húmico e $8,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de Kaolin, como a utilizada no presente trabalho. Durante os ensaios, foram mantidos fixos os parâmetros pressão de saturação, razão de recirculação de água saturada, tempo de saturação, gradiente e tempo de mistura rápida. Foram obtidos dois pontos ideais de coagulação (dose de coagulante x pH de coagulação): um com PZ zero ($D_{\text{COAG}} = 22,5 \text{ mg.L}^{-1}$) e outro com PZ levemente positivo ($D_{\text{COAG}} = 42,5 \text{ mg.L}^{-1}$). Para ambos os casos, o pH ideal situava-se na faixa de 6,3 a 6,4.

A floculação, promovida pela mistura lenta, tem como objetivo principal transportar as partículas previamente desestabilizadas e promover colisões para a constituição dos flocos.

Inicialmente, os tempos e gradientes de floculação empregadas na flotação eram as mesmas da sedimentação. Com o desenvolvimento de pesquisas, tais condições foram otimizadas para emprego na FAD. Com base nos resultados destas pesquisas, os gradientes de floculação da ordem de 70 s^{-1} e tempos de até 10 min são empregados. O resultado são flocos menores que aqueles usualmente produzidos para a sedimentação (SCHOFIELD, 2001).

Pioltine (2011) estudou a influência do tempo de floculação na eficiência da clarificação por flotação por ar dissolvido e na distribuição dos tamanhos dos flocos

em uma unidade piloto de FAD, utilizando água sintética de turbidez $7,5 \pm 0,2$ UNT e cor 38 ± 1 UH. Foram estudados tempos de floculação entre 10 e 17 min cada qual com três concentrações de ar fornecido à flotação: 4,80, 6,30 e 7,80 g.m^{-3} , mantendo-se fixas as condições de coagulação e os parâmetros velocidade de entrada, tempo de contato e taxa de aplicação superficial da zona de contato e, pressão de saturação. Quanto à clarificação, os menores valores de turbidez (0,7 UNT), cor aparente (1UH) e SST ($1,5 \text{ mg.L}^{-1}$) foram obtidos quando T_F igual a 17 min e A/V de 4,80 g ar.m^{-3} de água. No entanto, os valores de tais parâmetros obtidos quando T_F de 10 min para mesmo A/V, embora um pouco mais elevados (1,1 UNT de turbidez, 2 UH de cor e $2,4 \text{ mg.L}^{-1}$ de SST), também foram produziram efluente de grande qualidade, o que leva à conclusão de que a clarificação por FAD a baixos tempos de floculação é eficiente. Para ambos os T_F aplicados, os menores valores residuais dos parâmetros avaliados foi obtido na menor concentração de micro bolhas de ar (4,80 g ar.m^{-3} de água), fato explicado pela aglutinação das bolhas de ar ocorrida quando os maiores valores de A/V foram aplicados.

3.2.3 *Tamanho das Micro-bolhas de Ar*

A principal função das micro-bolhas de ar no processo de flotação por ar dissolvido é diminuir a densidade dos conjuntos floco-bolha, para que esta seja menor que a da água. Assim, quanto maior o volume de bolhas associadas aos flocos, menor sua densidade relativa e maior a velocidade de ascensão dos conjuntos floco-bolha.

Edzwald (2010) cita que o tamanho das bolhas é uma propriedade importante no desempenho da FAD, pois está diretamente ligado ao sucesso das colisões entre flocos e bolhas e à sua velocidade ascensional.

Pequenas bolhas são mais interessantes à flotação que bolhas grandes, já que para uma mesma massa de ar, bolhas pequenas possuem maior superfície específica e ainda necessitam deslocar menor volume de água da superfície dos flocos a que vão aderir (DI BERNARDO & DANTAS, 2005). A geração de pequenas bolhas de ar (de até 100 μm) se dá pela injeção da água recirculada pressurizada no tanque de flotação usando bocais especiais ou válvulas do tipo agulha (Edzwald, 1995). O efeito é causado pela diferença entre a pressão atmosférica e a pressão entre a água pressurizada recirculada, inserida no tanque de flotação. Assim as bolhas se desprendem e entram em contato com os flocos existentes.

De acordo com Edzwald (1995), tamanhos de bolhas razoáveis para a clarificação de água são da ordem de 40 μm de diâmetro. Para a obtenção de bolhas dessa dimensão, a diferença de pressão na câmara de saturação com relação à pressão atmosférica deve estar compreendida entre 4 e 6 bar. Na câmara de saturação o efeito sobre o tamanho das bolhas é muito pequeno em pressões acima de 5 bar (DE RIJK *ET AL.*³, 1994 *APUD* EDZWALD, 1995).

³ DE RIJK, S.E., VAN DER GRAAF, J., DEN BLANKEN, J.G. Bubble Size in Flotation Thickening. Water Research v.28, p.465-473, 1994.

3.2.4 Concentração das Micro-bolhas de Ar

Existem três medidas de concentração de bolhas de ar na FAD: massa, volume e número. A concentração em massa é utilizada para projetos e tem aplicação prática na avaliação da eficiência da injeção de ar. As concentrações em número e em volume são variáveis teóricas importantes na modelagem do desempenho da zona de contato e no cálculo das velocidades ascensionais dos conjuntos floco-bolhas. A concentração de ar pode ser variada pela alteração da pressão de saturação, ou seja, dissolvendo-se mais ou menos ar na vazão de recirculação ou ainda pela variação da parcela de vazão recirculada. Entretanto, a pressão de saturação não tem grandes variações, assim a maneira mais comum de se alterar a concentração de bolhas é alterando a vazão ou parcela de recirculação (EDZWALD, 2009).

Segundo Reali & Patrizzi (2007), deve ser fornecida concentração suficiente de micro-bolhas de ar da ordem de 0,01 a 0,1 mm de diâmetro, para que se forme uma nuvem de agregados floco-bolha, logo abaixo da camada de lodo flotado. A concentração usual de micro-bolhas de ar situa-se entre 6 a 8 g de ar.m⁻³ de água, mas pode variar de acordo com a qualidade da água e seu pré-tratamento.

Lundh *et al.* (2001) realizaram estudo para caracterizar a estrutura do escoamento e a relação com a concentração de ar, na zona de separação. Foram testados três diferentes valores de TAS na zona de separação, cada qual com três parcelas de recirculação, sendo estas variações comparadas com água que não continha bolhas. As medidas dos perfis de velocidade foram realizadas com equipamento ADV, que determinou os valores das velocidades em três dimensões do escoamento, em diversos pontos da zona de separação. A pesquisa concluiu que

as bolhas de ar impactam significativamente no escoamento, sendo duas estruturas de escoamento observadas. A primeira, o escoamento estratificado, que é definido por um transporte horizontal de água na camada superior, e abaixo, um transporte de água vertical, no sentido do fundo do reator. Entre tais camadas existe um fluxo de retorno de água. A segunda estrutura de escoamento é conhecida como curto-circuito sendo definido como um desvio descendente no sentido do fundo do tanque, o que certamente causa e diminuição da qualidade do efluente. Os autores concluem que certamente os diferentes gradientes de densidade, consequência das diferentes concentrações de ar no tanque, causam a estratificação da massa da água, fazendo com que a água seja transportada em camadas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS

Para o desenvolvimento da parte experimental da presente pesquisa foi utilizada uma planta piloto de flotação por ar dissolvido (PPFAD) existente nas dependências do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR), do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) na área I do Campus da Universidade de São Paulo (USP).

Os trabalhos experimentais da pesquisa foram divididos em duas etapas. A etapa I consistiu na operação da PPFAD, alimentada com água sintética, onde três diferentes valores de taxas de aplicação superficial na zona de separação (TAS_{zs}), associadas a duas taxas de aplicação superficial na zona de contato (TAS_{zc}), foram utilizadas. Para cada combinação TAS_{zs} - TAS_{zc} foram testadas três diferentes concentrações de ar dissolvido fornecida para a flotação (A/V), obtidas com três diferentes razões de recirculação de água clarificada (R). Os resultados desta etapa foram monitorados com base na eficiência de clarificação da água de estudo a partir da avaliação da redução de cor e turbidez. Na

Figura 4.1 está apresentado o fluxograma dos experimentos realizados na etapa I da pesquisa.

Figura 4.1 - Diagrama dos Ensaio da Etapa I

A etapa II contemplou a utilização da sonda microADV, capaz de determinar os vários perfis de velocidade da água, para caracterização do escoamento no interior da zona de separação (ZS) da PPFAD. Realizou-se o estudo com a sonda para a maior TAS_{ZS} capaz de produzir água efluente com turbidez igual ou menor que 1UNT, para as mesmas três concentrações de ar (razões de recirculação estudadas na etapa I).

Esse tipo de caracterização hidrodinâmica da unidade de flotação permite a determinação do padrão de escoamento dentro da zona de separação dessa unidade. A análise do padrão de escoamento para cada situação investigada, juntamente com os dados de eficiência de clarificação observados na instalação piloto, fornecem subsídios para a adequação das variáveis de interesse para o presente estudo (TAS_{ZC} , TAS_{ZS} , A/V).

4.1.1 UNIDADE PILOTO DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

A unidade piloto de flotação por ar dissolvido (PPFAD), na qual foram desenvolvidas as atividades de ambas as etapas desta pesquisa, é bastante versátil, pois permite alterações em diversos parâmetros e dimensões, entre as quais o comprimento das zonas de contato e separação, vazão de entrada da unidade, gradiente de floculação, vazão de entrada na zona de contato, altura do anteparo da zona de contato, altura da lâmina d'água e velocidade *cross-flow*. A imagem da Figura 4.2 mostra uma vista geral da instalação.

Figura 4.2 - Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido

A instalação piloto de FAD possui quatro tanques metálicos, cada um com 15 m³ de capacidade. Cada reservatório é equipado com agitador submerso, o que possibilita a homogeneização da água. A água é levada dos reservatórios para a unidade piloto de flotação através de uma bomba centrífuga acoplada a uma pequena caixa de nível constante. Essa caixa possui válvulas com bóias para controle de nível, permitindo que o sistema de recalque opere com carga hidráulica constante.

O sistema conta ainda com 2 reservatórios de 250 L cada para armazenagem e preparo das soluções de coagulante e alcalinizante. Os reservatórios possuem agitadores individuais que mantêm as soluções homogêneas para a utilização nos ensaios. Duas bombas de deslocamento positivo realizam a adição dos produtos destes reservatórios na água bruta (Figura 4.3). Desta maneira, durante os experimentos na PPFAD a mistura rápida é realizada *in line* (Figura 4.4). O coagulante é aplicado na água bruta através de unidade de mistura rápida tubular instalado logo antes da entrada da primeira câmara da planta piloto de flotação.

Figura 4.3 - Reservatórios de Coagulante e Alcalinizante e Bombas de Aplicação dos respectivos Produtos

Figura 4.4 - Local de Adição de Coagulante e Alcalinizante

A planta piloto é composta por quatro câmaras de floculação em série, cada qual com motores acoplados a pás que realizam a mistura lenta, promovendo a floculação com gradiente de velocidade adotado. Cada câmara de floculação possui

um volume de $0,515 \text{ m}^3$ para altura de lâmina d'água de 2,06 m, desprezando-se o volume ocupado pelos agitadores.

O processo de flotação por ar dissolvido ocorre após a floculação, iniciando-se na zona de contato. Na câmara de flotação a placa que separa a zona de contato da zona de separação é móvel, podendo ser alterada para que diferentes áreas e comprimentos da zona de contato, tempo de detenção e TAS_{ZC} sejam obtidos. A PPFAD possui uma comporta entre a saída do último floculador e a entrada da ZC que permite a alteração do nível de água e consequente variação da velocidade de entrada da ZC.

Entre a câmara de flotação e a unidade de floculação ocorre a inserção e mistura da vazão de recirculação na zona de contato do flotador. Na imagem da Figura 4.5 observam-se as três válvulas de agulha (DN 3/8"), as quais promovem a despressurização brusca de água saturada com ar dissolvido, gerando assim as micro bolhas de ar que atuam no processo de FAD. Logo após este ponto, na zona de contato, as bolhas formadas pela despressurização da água recirculada aderem aos flocos existentes, iniciando neste instante a ascensão do conjunto floco/bolha, que chega à região chamada de zona de separação.

Figura 4.5 - Válvulas Agulha para Despressurização da Vazão Recirculada

A zona de separação da planta piloto, caracterizada pela região onde ocorre efetivamente a flotação, permite a aplicação de uma ampla faixa de valores de TAS não só pela variação da vazão de entrada, mas também pelos diferentes comprimentos da ZS proporcionados pela posição de sua parede móvel. De acordo com a TAS_{ZS} requerida, pode-se variar seu comprimento até 1,65 m.

A câmara de flotação possui um “manifold” em sua parte inferior, o qual coleta parcela de água tratada a ser recirculada e a leva a um vertedor final de saída (Figura 4.6). Após o vertedor de saída, existe uma tubulação que promove a recirculação do efluente de forma a alimentar a câmara de saturação.

Figura 4.6 - Vertedor Final de Saída da PPFAD

A saturação da água a ser recirculada é realizada na câmara de saturação (Figura 4.7), que possui um manômetro, válvula e acessórios para controle da vazão afluyente e da pressão em seu interior. Além disso, tal câmara possui válvula de segurança (de alívio), visor de nível e sistema de eletrodos interligados à válvula solenóide para controle automático do nível da água em seu interior e da vazão de ar fornecida para a saturação da água pressurizada.

Figura 4.7 - Câmara de Saturação e Manômetro (no detalhe)

Um corte transversal da instalação piloto de FAD na qual serão concretizados os estudos referentes à segunda etapa da presente pesquisa é apresentado na Figura 4.8, onde estão destacadas as paredes móveis das zonas de contato e de separação.

Figura 4.8 - Corte transversal da PPFAD

Dois aquecedores de água à gás (Figura 4.9) estão presentes na unidade para possibilitar a manutenção da temperatura da água bruta afluyente à piloto praticamente constante durante todos os ensaios.

Figura 4.9 - Aquecedores a Gás para Manutenção da Temperatura

A planta piloto possui ainda um painel de controle associado a um software que, entre outros comandos, possibilita a aferição de parâmetros como vazão de entrada, vazão de recirculação, gradiente de velocidade de cada um dos floculadores. A tela de entrada do *software* de controle (Figura 4.10) é apresentado a seguir.

Form1

☒ **Bomba Entrada** Vazão Ent.2(m³/h): 5,46 Temp. água (°C): LabelTemp

☒ **Bomba Retorno** Vazão Ret.1(m³/h): 0,09 pH: Labelph

☒ **Bomba Saturação** Vazão Sat.3(m³/h): 0,23 Turb1 (NTU): 0,0

Setpoint RA (m³/h): 0 Turb2 (NTU): 0,0

Vel. Raspador (%): 0,0

T. Registro (s): 1

Bombas Dosadoras (l/h)

01: 0,0

02: 0,0

Agitadores

01: 1 03: 1

02: 148 04: 148

☐ Travar Todos

Coletores

T. Descarte (s): 1

T. Abertura (s): 1 Intervalo (s): 1

☐ Repetir Ciclo

Figura 4.10 - Tela de Entrada do *Software* de Controle da PPFAD

Para garantir o controle correto, tanto a vazão de entrada quanto a vazão de recirculação são aferidas simultaneamente por rotâmetros convencionais, através de leituras visuais realizadas pelo operador da instalação piloto.

4.2 Etapa I

4.2.1 Água de Estudo da Etapa I – Composição

A fim de garantir maior correlação entre os resultados da pesquisa, a PPFAD foi alimentada com água sintética composta por $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de ácido húmico comercial (Aldrich 675-2) e $8,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de Kaolin (Fluka 60609), conferindo cor aparente aproximada de 38 UH e turbidez próxima a 7,5 UNT, conforme resultados obtidos por Pioltine (2011). Preparou-se a água de estudo com água bruta extraída de poço profundo situado na área I do campus São Carlos da Universidade de São Paulo (USP). A água sintética deste trabalho é semelhante àquela utilizada por

REALI e PATRIZZI (2007), MAIA (2010) e ARAUJO (2010) em pesquisas na mesma PPFAD.

Para cada ensaio foram preparados 45 m³ de água sintética, divididos em três reservatórios de 15 m³ que armazenavam a água extraída do poço. A adição de Kaolin e Ácido Húmico aos reservatórios com água do poço era realizada da seguinte maneira:

1. Na data da realização de cada bateria de ensaios, adicionou-se inicialmente Kaolin e ácido húmico a cada reservatório, sob agitação permanente;
2. Mantinha-se a agitação da água durante 3 h;
3. Mantinha-se a agitação por 1 h antes de se iniciar os ensaios.

Para garantir a uniformidade da água durante cada ensaio, a água era mantida sob agitação constante durante toda a bateria de ensaios, e a PPFAD era alimentada simultaneamente pelos três reservatórios, sendo que a água bruta afluyente passava por uma caixa de equalização antes de chegar à mistura rápida. O conjunto de reservatórios d'água e a caixa de equalização são apresentados na Figura .

Figura 4.11 - Reservatórios de Água para Alimentação da PPFAD e Caixa de Equalização

4.2.2 Coagulação e Floculação da Água de Estudo e demais Parâmetros Fixados

A condição de coagulação adotada nos experimentos foi determinada a partir dos resultados obtidos por MAIA (2010) e ARAUJO (2010), que utilizaram água sintética de composição semelhante em ensaios em escala de bancada. Segundo os autores, a condição ideal de coagulação desta água, que confere potencial zeta próximo a zero, é a dose de $22,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de sulfato de alumínio, associado ao pH entre os valores de 6,3 e 6,4. Assim como tais autores, durante esta pesquisa utilizou-se como coagulante sulfato de alumínio PA, marca Vetec, e barrilha (Carbonato de Sódio), marca Genco, com pureza de 99,5%, para obtenção do pH adequado.

Quanto à floculação, os parâmetros foram adotados com base na pesquisa de PIOLTINE e REALI (2011), em que se utilizou a água de estudo com condições de

coagulação igual à deste trabalho, obtendo como tempo e gradiente de floculação ideais os valores de 17 min e 110 s^{-1} , respectivamente. Durante os ensaios, a vazão de floculação foi fixada em $5,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e apenas três das quatro câmaras de floculação existentes foram utilizadas, obtendo-se assim um tempo de floculação de 17,2 min.

Durante todos os ensaios desta pesquisa fixou-se a velocidade de entrada na ZC (V_{eZC}) em $180,2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ com base nos resultados de MAIA (2010). Na PPFAD, tal valor de V_{eZC} foi obtido regulando-se a abertura da entrada da ZC para em 69 mm, combinada com vazão de entrada da ZC de $4,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Vale ressaltar que o menor valor de vazão da câmara de flotação com relação ao de entrada da PPFAD foi proporcionado pelo descarte de $0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ imediatamente após a saída da terceira câmara de floculação. A Figura apresenta a comporta de entrada da ZC, com detalhe a abertura de 69 mm utilizada nos ensaios.

Figura 4.12 - Altura de entrada da ZC igual correspondente à velocidade de $180 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$.

Fonte: adaptado de Maia (2010).

Além das condições de coagulação e floculação da água de estudo e velocidade de entrada da zona de contato, foram mantidas fixas a temperatura da água em 26 ± 1 °C e a pressão de saturação em 450 ± 5 KPa.

4.2.3 Concentração de micro bolhas de ar

Para cada configuração estudada da câmara de flotação (associação TAS_{zs}-TAS_{zc}), foram avaliados três diferentes valores de concentração de micro bolhas de ar, possibilitados por três razões de recirculação: 6%, 8% e 10%.

Neste trabalho, a concentração de micro bolhas de ar será apresentada sob a forma A/V, ou seja: massa de ar por volume de água. Calculam-se as concentrações de micro bolhas de ar geradas a partir da equação 1 proposta por Edzwald (2010) apresentada a seguir:

$$\frac{A}{V} = \left[\frac{f \times (p + 101,3)}{K_H} - \frac{Patm}{K_H} \right] \times \frac{R}{(1 + R)}$$

Equação 1

A/V = razão ar para água (g de ar.m⁻³ de água);

f = fator de eficiência da câmara de saturação;

p = pressão relativa (kPa);

$Patm$ = pressão atmosférica local (kPa);

K_H = constante de Henry (kPa.mg.⁻¹.L);

R = razão de recirculação.

Assim, os valores de concentração de micro bolhas de ar utilizados serão calculados com base em $T = 25$ °C onde $K_H = 4,531$ kPa.m⁻¹.L, $Patm$ para a cidade de São Carlos = 96 KPa e, a pressão da câmara de saturação ou pressão relativa

(p) utilizada em todos os ensaios foi de $4,5 \text{ kgf.cm}^{-2}$ o que equivale a $441,3 \text{ kPa}$. A Tabela 4.1 apresenta a concentração de micro bolhas de ar para cada uma das razões de recirculação estudada.

Tabela 4.1 – Concentrações Estudadas de Ar Dissolvido fornecido para a Flotação (A/V) em g de ar.m^{-3} de água bruta

R (%)	A/V (g.m^{-3})
6	4,90
8	6,41
10	7,87

4.2.4 Zona de Contato - Taxas de Aplicação Superficial e Tempos de Contato

Dois valores de TAS_{ZC} foram estudados: $136,3 \pm 2,5$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$. As TAS_{ZC} estudadas estão entre os valores de 127 e 180 m.h^{-1} apontados por Reali e Patrizzi (2007) como aqueles em que se obtêm as maiores eficiências no tratamento da água em condições de estudo semelhantes a esta pesquisa. Os tempos de detenção da zona de contato (T_{ZC}) utilizados também são próximo aos valores apontados no trabalho dos autores (entre 33 e 65 s) como sendo aqueles que proporcionaram maior remoção de turbidez de água tratada por FAD.

Para a obtenção de tais valores de TAS_{ZC} duas placas de diferentes comprimentos foram utilizadas na ZC para a largura constante de 405 mm e vazão

de entrada da câmara de flotação de $4,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Para ambos os casos, a altura do anteparo da Zona de Contato foi de 2,01 m.

A Tabela 4.2 apresenta comprimentos da ZC, as taxas de aplicação superficial geradas e tempos de detenção proporcionados por cada R estudada.

Tabela 4.2 - Características da Zona de Contato para as TAS_{ZC} estudadas

TAS_{ZC} ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	Comprimento ZC (m)	R (%)	Q_{AF+R} ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	$TAS_{ZC \text{ real}}$ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	T_{ZC} (s)
136,3	0,71	6	4,88	133,77	54,12
		8	4,97	136,30	53,09
		10	5,06	138,82	52,12
172,8	0,90	6	4,88	169,57	36,09
		8	4,97	172,87	35,42
		10	5,06	175,97	34,78

4.2.5 Taxas de Aplicação Superficial na Zona de Separação

Para cada uma das duas TAS_{ZC} aplicadas à unidade, três diferentes taxas de aplicação superficial na zona de separação foram estudadas. Com largura da PPFAD e vazão de flotação constantes, os valores de TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, $12,3 \pm 0,2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ e $14,9 \pm 0,3 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ foram obtidas com a adoção de comprimentos da ZS de 1,25 m, 1,00 m e 0,825 m, respectivamente. Vale lembrar que a parede que define a zona de separação da unidade piloto permite a obtenção de diferentes comprimentos dessa zona e, conseqüentemente, diferentes valores de TAS_{ZS} para uma mesma vazão de entrada. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de TAS_{ZS} para todas as condições estudadas.

Tabela 4.3 - Taxas de Aplicação Superficial na Zona de Separação

TAS_{ZS} média (m.h⁻¹)	R (%)	Q_{AF+R} (m³.h⁻¹)	TAS_{ZS} real (m.h⁻¹)
9,8	6	4,88	9,6
	8	4,97	9,8
	10	5,06	10,0
12,3	6	4,88	12,0
	8	4,97	12,3
	10	5,06	12,5
14,9	6	4,88	14,6
	8	4,97	14,9
	10	5,06	15,1

4.2.6 Etapa I - Monitoramento dos Ensaios

O monitoramento dos ensaios seguiu a mesma linha de Maia (2010), Araújo (2010) e Reali e Patrizzi (2007), realizados anteriormente utilizando a mesma PFAD. Após o início da operação da ETA piloto e estabilização do tratamento coletaram-se seis amostras de água clarificada e de água floculada, com intervalo de coleta de 10 min entre amostras. O ponto de amostragem adotado para a água tratada foi o vertedor de saída da PPFAD, já para a água floculada foi o ponto de descarte existente na saída dos floculadores.

Realizou-se a leitura dos valores de cor e turbidez de todas as amostras de água clarificada coletadas. Em seguida utilizavam-se as amostras com menores valores de turbidez e cor para comporem uma única amostra, a qual representa as condições obtidas após o período de estabilização operacional, e hidronamica da instalação piloto. Quando da não concordância entre os menores valores dos parâmetros de cor e turbidez, apenas o valor de turbidez foi utilizado como critério para a formação da amostra composta. A amostra única de água floculada foi obtida pela mistura de amostras coletadas após o período de estabilização operacional de mistura rápida e floculação.

Coletou-se ainda uma amostra de água bruta antes do início da operação da PPFAD. A coleta foi realizada na caixa de equalização dos reservatórios.

As amostras únicas floculada e clarificada de cada condição de operação da PPFAD foram monitoradas a partir da realização de análises e leituras que seguem os procedimentos descritos em *Standard Methods for the Examination of Wather and Wastewater* (2005), tendo sido realizadas no LATAR – Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas e BIOTACE – Laboratório de Biotoxicologia em Águas Continentais e Efluentes, ambos existentes no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP.

Na Tabela 4.4 são listadas as análises e leituras das amostras únicas (floculada, clarificada e bruta), realizadas para monitoramento da primeira etapa desta pesquisa.

Tabela 4.4 - Monitoramento dos Ensaio

Parâmetros	Unidade	Água Bruta	Água Floculada	Água Flotada
Temperatura	°C	X		
pH		X		
Cor	UC	X		X
Turbidez	UNT	X		X
SST	mg.L ⁻¹	X	X	X
Alcalinidade	mg CaCO ₃ L ⁻¹	X		
Condutividade	µS	X		
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	X		X

4.3 Etapa II – Caracterização do Escoamento na Zona de Separação

Os trabalhos da etapa II foram realizados com base nos resultados obtidos na etapa I. A caracterização do escoamento na ZS foi realizada para a maior TAS_{ZS} associada à maior TAS_{ZC} capaz de fornecer turbidez residual igual ou inferior a 1 UNT, para todas as concentrações de ar estudadas. A Figura mostra o esquema de trabalho da etapa II.

Figura 4.13 - Resumo dos Trabalhos da Etapa II

Para a execução da caracterização, utilizou-se a sonda microADV 16 MHz marca Sontek. O equipamento ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) é capaz de medir o fluxo de escoamento em três dimensões, sendo um aparelho composto basicamente por um emissor de ultra-som com três receptores e um módulo eletrônico de processamento. O emissor gera um sinal, que é refletido aos receptores pelas partículas presentes no líquido e é utilizado para computar o sinal Doppler, pelo qual são calculadas as componentes de velocidade. A microADV trabalha em uma frequência de amostragem máxima de 50 Hz, valor este adotado na presente pesquisa. A sonda microADV utilizada é adequada para trabalhar em velocidades entre 3 e 250 cm.s^{-1} , mas seu limite inferior pode ser programado para até 0,01 cm.s^{-1} . No caso desta sonda, o volume de amostragem situa-se a 5 cm do topo da haste (SONTEK, 2010). A Figura apresenta esquema ilustrativo e foto do equipamento.

Figura 4.14 - MicroADV: foto e esquema ilustrativo. Fonte: Sontek (2010)

Durante os ensaios desta etapa, a PPFAD foi alimentada apenas com água de poço, com vazão de entrada igual à etapa I.

Nesta pesquisa, não foram levados em conta os valores de velocidades obtidos, considerando-se apenas a direção de cada vetor resultante, já que o objetivo desta pesquisa é caracterizar apenas as linhas de escoamento. Adotou-se uma malha virtual de coleta de dados composta por 98 pontos: 7 pontos igualmente espaçados ao longo do comprimento de ZS (C_{ZS}) – eixo X - e, 14 na altura do nível d'água da ZS ($N.A._{ZS}$) – eixo Z. Tais medidas foram realizadas em $Y = 0,2$ m. A Figura apresenta a malha virtual de coleta de dados realizada pela sonda na PPFAD.

Figura 4.15 - Malha virtual de coleta de dados na Zona de Separação. Os encontros das linhas verticais (eixo Z) e linhas horizontais (eixo X) representam os pontos de coleta. A malha virtual está situada em $Y = 0,20$ m

A sonda microADV opera de maneira intrusiva, permanecendo submersa durante a coleta de dados. Na ZS da PPFAD, a sonda foi instalada com um suporte metálico móvel que permitiu o deslocamento da sonda dentro da unidade e sua fixação em cada um dos pontos da malha virtual. Na Figura tem-se a microADV presa ao suporte em um dos pontos de coleta.

Figura 4.16 - MicroADV em um dos Pontos de Coleta de Dados

A configuração dos parâmetros de coleta da sonda foi realizada pelo *software* ADVField, fornecido pelo fabricante. Na tela de entrada ou *Setup Mode* podem ser determinados a frequência de amostragem e o número de amostras de um determinado ponto de coleta, dentre outras configurações. No presente trabalho, adotou-se o valor de 50 Hz como a frequência de amostragem utilizada e 2 min como tempo de amostragem.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 *Considerações Iniciais*

Neste capítulo, os resultados serão apresentados em dois tópicos principais: o primeiro deles contempla a Etapa I desta pesquisa, na qual foram realizados ensaios de clarificação com a PPFAD a fim de verificar a influência das taxas de aplicação superficial nas zonas de contato e separação e da concentração de micro bolhas de ar na eficiência no tratamento da água de estudo; no segundo tópico são apresentados e discutidos os resultados da Etapa II que consistiu na caracterização do escoamento no interior da zona de separação da PPFAD com a utilização de um velocímetro acústico de efeito Doppler, conhecido como sonda microADV.

5.2 ***ETAPA I - Influência da TAS_{zs} e TAS_{zc} e concentração de micro bolhas de ar na eficiência da clarificação de água na unidade piloto de flotação por ar dissolvido***

5.2.1 *Considerações Iniciais*

Em todos os ensaios realizados a PPFAD foi alimentada com água bruta sintética de mesma composição. Três diferentes TAS_{zs} ($9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$; $12,3 \pm 0,2$ e $14,9 \pm 0,3$) foram aplicadas à PPFAD, cada qual associada a duas diferentes TAS_{zc} ($136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2$) e três diferentes valores de A/V (4,90, 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água).

Quando da obtenção de valores de turbidez residual igual ou inferior a 1 UNT, repetiu-se os ensaios para a referida combinação TAS_{ZS} - TAS_{ZC} , afim de confirmar os resultados obtidos.

Durante todos os ensaios realizados nesta etapa foram mantidos fixos os parâmetros apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Parâmetros fixados na Etapa I

Parâmetro	Valor
Vazão Afluente à Floculação ($m^3.h^{-1}$)	$5,4 \pm 0,1$
Tempo de Floculação (min)	17,2
Gradiente de Floculação (s^{-1})	110,0
Vazão de Descarte após Floculação ($m^3.h^{-1}$)	$0,8 \pm 0,1$
Vazão afluente à Flotação ($m^3.h^{-1}$)	$4,6 \pm 0,2$
Velocidade <i>Cross – Flow</i> ($m.h^{-1}$)	$47,2 \pm 0,9$
Velocidade de Entrada na ZC ($m.h^{-1}$)	180,0

5.1.2 Caracterização da Água Bruta dos Ensaios

Durante todos os ensaios foi utilizada água bruta sintética de mesma composição, a qual foi preparada a partir de água extraída de poço profundo com a adição de $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de ácido húmico e $8,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de Kaolin. A cada ensaio, após o

preparo e prévia agitação da água sintética em seus reservatórios, realizou-se a sua caracterização quanto à cor, turbidez, alcalinidade, pH, condutividade e UV_{254} . A caracterização da água sintética bruta é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Caracterização da Água Bruta Sintética

Parâmetro	Valor
pH	$6,2 \pm 0,4$
Alcalinidade ($\text{mg.L}^{-1} \text{CaCO}_3$)	$30,1 \pm 0,7$
Condutividade ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	$57,7 \pm 3,3$
Turbidez (UNT)	$5,6 \pm 0,3$
Cor (UH)	$30,9 \pm 2,8$
UV_{254} (cm^{-1})	$0,021 \pm 0,00$
COT (mgC.L^{-1})	$0,344 \pm 0,038$

Imediatamente após a mistura rápida, realizada *in line* na PPFAD, foram coletadas amostras da água coagulada de cada ensaio para sua caracterização. A caracterização da água bruta coagulada está apresentada na Tabela 5.3 a seguir.

Tabela 5.3 - Caracterização da Água Coagulada

Parâmetro	Valor
Potencial Zeta (mV)	$-1,9 \pm 0,9$

Temperatura (°C)	26 ± 1
pH	6,4 ± 1,0
Condutividade (µS.cm⁻¹)	103,7

5.1.2 *Resultados obtidos com Taxa de Aplicação Superficial de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associada às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e às A/V de 4,90, 6,41 e $7,87 \text{ g ar.m}^{-3}$ de água*

Todos os ensaios desta seção foram realizados em duplicata, para que suas reprodutibilidades fossem verificadas. A Tabela 5.4 apresenta as leituras de turbidez, cor aparente e UV_{254} das amostras compostas obtidas nos ensaios (ensaios “1” e réplicas, chamados de ensaios “2”) realizados para a taxa de aplicação superficial de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$, combinada com $136,3 \pm 2,5$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ de taxa de aplicação superficial na zona de contato e três concentrações de micro bolhas de ar: 4,90; 6,41 e $7,87 \text{ g ar.m}^{-3}$ de água. O Gráfico da Figura 5.1 apresenta os resultados das leituras de turbidez das amostras compostas flotadas dos ensaios na PPFAD para TAS_{Zs} fixada em $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$, já os valores das amostras poUNTais flotadas dos mesmos ensaios estão apresentados no Apêndice deste trabalho.

Tabela 5.4 - Resultados de Turbidez, Cor Aparente, UV_{254} para TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1 \text{ s}$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m^{-3} de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$

		Turbidez			Cor		UV ₂₅₄	
TAS _{ZC}		A/V	Residual	Eficiência	Residual	Eficiência	Residual	Eficiência
(m.h ⁻¹)		(g.m ⁻³)	(UNT)	%	(UH)	%	(cm ⁻¹)	%
Ensaio 1	136,3 ± 2,5	4,90	0,7	87,5	1	96,8	<0,003	>85,7
		6,41	1,0	82,6	1	96,8	<0,003	>85,7
		7,87	1,1	80,4	2	93,5	<0,003	>85,7
	172,8 ± 3,2	4,90	0,9	83,9	2	93,5	<0,003	>85,7
		6,41	1,0	82,1	3	91,0	<0,003	>85,7
		7,87	1,1	80,4	3	90,3	<0,003	>85,7
Ensaio 2	136,3 ± 2,5	4,90	0,8	86,5	1	96,8	<0,003	>85,7
		6,41	0,9	84,1	2	93,5	<0,003	>85,7
		7,87	1,2	78,4	2	93,5	<0,003	>85,7
	172,8 ± 3,2	4,90	0,9	83,9	2	93,5	<0,003	>85,7
		6,41	1,0	81,8	3	90,3	<0,003	>85,7
		7,87	1,1	80,4	3	90,3	<0,003	>85,7

Figura 5.1 - Gráfico de Turbidez Residual (UNT): TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1 \text{ s}$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$ e $Ve_{ZC} = 180,0 \text{ m.h}^{-1}$

Pela análise dos resultados de turbidez residual das amostras compostas de todos os ensaios em que a TAS_{ZS} foi de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ apresentados no Gráfico 5.2, pode-se verificar que valores de turbidez residual inferiores a 1,0 UNT foram obtidos para ambas as TAS_{ZC} estudadas quando foi aplicado o menor valor de A/V (4,9 g/m³), representando eficiência de remoção de até 87,5% (0,7 UNT para TAS_{ZC} igual a $136,3 \text{ m.h}^{-1}$ no primeiro ensaio). Para valor de A/V de 6,41 g.m⁻³ e TAS_{ZC} de $136,3 \text{ m.h}^{-1}$ obteve-se um residual de turbidez de 0,9 UNT, já para a maior TAS_{ZC}, este valor foi elevado a 1,0 UNT. Para 7,87 g ar.m⁻³ de água, obteve-se turbidez residual igual a 1,1 UNT (80,4% de eficiência de remoção) para ambas as TAS_{ZC} estudadas, exceto na réplica do ensaio, quando este foi de 1,2 UNT (78,4% de eficiência), para $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$.

O Gráfico da Figura 5.2 traz os valores das leituras de cor residual das amostras compostas tratadas por FAD para os ensaios de TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associada às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e aos valores de 4,90, 6,41 e 7,87 g ar.cm^{-3} de água. Os resultados de cor das amostras poUNTais de tais ensaios estão contidos no Apêndice.

Figura 5.2 – Gráfico de Cor Residual (UH): TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m^{-3} de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$ e $Ve_{ZC} = 180,0 \text{ m.h}^{-1}$

Os resultados do gráfico anterior mostram que 1UH (96,8% de eficiência) de cor residual foi obtido para os dois ensaios com menor valor de A/V para ambos os ensaios de TAS_{ZC} $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e apenas o primeiro ensaio de mesma TAS_{ZC} associada a 6,41 g ar.m^{-3} de água, não sendo este resultado repetido em sua réplica, quando a eficiência foi reduzida para 93,5% (2 UH). Para $9,8 \text{ m.h}^{-1}$ de TAS_{ZS} , as combinações TAS_{ZC} igual a $136,3 \text{ m.h}^{-1}$ e (T_{ZC} em torno de 53 s) e 7,87 g de ar.m^{-3} de água e, TAS_{ZC} igual a $172,8 \text{ m.h}^{-1}$ (e T_{ZC} em torno de 35 s) e 6,41 g de ar.m^{-3} de água produziram um efluente com mesmo valor residual de cor: 2UH. Para 172,8

m.h^{-1} , a maior TAS_{ZC} estudada, as duas maiores concentrações de ar removeram 90,3% de cor aparente (residual de 3UH).

Todas as amostras compostas foram ainda submetidas à leitura de absorvância em UV_{254} , a qual mede de forma indireta a concentração de matéria orgânica. Para todos os ensaios em que TAS_{ZS} aplicada foi de $9,8 \text{ m.h}^{-1}$, o valor residual de absorvância obtido foi inferior ao limite de detecção do equipamento utilizado, o que representa uma remoção de pelo menos 85,7% em relação à água bruta.

De maneira geral, pode-se notar que, para TAS_{ZS} de $9,8 \text{ m.h}^{-1}$, o aumento do valor de TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ para $172,8 \text{ m.h}^{-1}$, causou ligeira queda na eficiência de remoção de turbidez e cor. No entanto, deve-se salientar que os resultados de todos os ensaios de TAS_{ZS} de $9,8 \text{ m.h}^{-1}$ promoveram uma remoção satisfatória dos parâmetros estudados, mesmo aquela onde a combinação A/V e TAS_{ZC} resultou na menor eficiência de clarificação. A esse respeito, vale lembrar que, no caso de estações para tratamento de água para abastecimento público, a etapa FAD é normalmente seguida de unidade de filtração, a qual complementarará o processo de clarificação, aumentando a eficiência do sistema como um todo. Em suma, essa etapa do estudo mostrou que para o valor de TAS_{ZS} de $9,8 \text{ m.h}^{-1}$, o menor entre os investigados neste trabalho, o aumento do valor de TAS_{ZC} de $136,3 \text{ m.h}^{-1}$ (e T_{ZC} em torno de 53 s) para $172,8 \text{ m.h}^{-1}$ (e T_{ZC} em torno de 35 s), causou apenas ligeira queda no desempenho da unidade FAD.

5.2.4 Resultados obtidos com Taxa de Aplicação Superficial de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associada às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e às A/V de 4,90, 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água

A Tabela 5.5 apresenta as leituras de turbidez, cor aparente e UV_{254} das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados para a taxa de aplicação superficial de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$. Para a TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ além dos ensaios com as concentrações de ar de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água, as quais correspondem às razões de recirculação de 6, 8 e 10%, respectivamente, foi estudada ainda a razão de recirculação de 4%, o que corresponde a uma concentração de ar igual a 3,33 g de ar.m⁻³ de água, afim de confirmar a concentração de ar ótima dentre as condições estudadas para da PPFAD . Para tal TAS_{ZC} , os ensaios foram realizados em duplicada para as três maiores concentrações de ar (na Tabela, os ensaios originais são denominados ensaio 1 e quando da duplicada, denominados ensaio 2). Para TAS_{ZC} de $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ foram estudadas as concentrações de micro bolhas de ar: 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água em ensaio único.

Tabela 5.5 - Resultados de Turbidez, Cor Aparente, UV_{254} para TAS_{ZS} de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1 \text{ s}$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$) com A/V de 3,33; 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m^{-3} de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$

	Turbidez				Cor		UV ₂₅₄	
	TAS _{ZC} (m.h ⁻¹)	A/V (g.m ⁻³)	Residual (UNT)	Eficiência %	Residual (UH)	Eficiência %	Residual (cm ⁻¹)	Eficiência %
Ensaio 1	136,3 ± 2,5	4,90	0,8	85,0	1	96,8	<0,003	>85,7
		6,41	1,0	82,7	2	93,5	<0,003	>85,7
		7,87	1,7	69,1	3	90,3	<0,003	>85,7
	172,8 ± 3,2	4,90	1,0	83,0	2	93,5	<0,003	>85,7
		6,41	1,2	78,8	3	90,3	<0,003	>85,7
		7,87	1,8	67,9	4	87,1	<0,003	>85,7
Ensaio 2	136,3 ± 2,5	3,33	1,5	73,2	3	90,3	<0,003	>85,7
		4,90	0,8	85,7	1	96,8	<0,003	>85,7
		6,41	1,1	80,4	2	93,5	<0,003	>85,7
		7,87	1,6	71,4	3	90,3	<0,003	>85,7

No gráfico da Figura 5.3 são apresentados os resultados das leituras das amostras compostas clarificadas por FAD quando da taxa de aplicação superficial próxima à $12,3 \text{ m.h}^{-1}$, associada aos valores de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ de taxa de aplicação superficial na zona de contato, com valores de A/V: 4,90; 6,41 e $7,87 \text{ g de ar.m}^{-3}$ de água para todos ensaios e $3,33 \text{ g de ar.m}^{-3}$ apenas para TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$.

Figura 5.3 – Gráfico de Turbidez Residual (UNT): TAS_{ZS} de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1 \text{ s}$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$) com A/V de 3,33; 4,90; 6,41 e $7,87 \text{ g ar.m}^{-3}$ de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$ e $Ve_{ZC} = 180,0 \text{ m.h}^{-1}$

Pode-se verificar que quando da TAS_{ZS} igual a $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$, valor de turbidez residual de 0,8 UNT foi obtido para a concentração de $4,90 \text{ g de ar.m}^{-3}$ de água no ensaio 1 e em sua réplica, em TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$. Para a mesma TAS_{ZC} , com concentração de ar de $6,41 \text{ g.m}^{-3}$ de água, obteve-se residual de

turbidez de 1 UNT no ensaio 1 e 1,1 UNT na réplica. Para as concentrações de ar de 7,87 e 3,33 g.m⁻³ de água, obteve-se uma queda significativa na qualidade do efluente quanto à turbidez residual, obtendo-se respectivamente os valores de 1,5 e 1,6 UNT. Para os ensaios onde a TAS_{ZC} utilizada foi de 172,8 ± 3,2 m.h⁻¹, foram obtidos efluentes com residuais de turbidez de 1 UNT para 4,90 g ar.m⁻³ de água, 1,2 UNT para 4,90 g ar.m⁻³ de água e, 1,8 UNT para 7,87 g ar.m⁻³ de água.

Os resultados das leituras de cor aparente para os mesmos ensaios são apresentados no gráfico da Figura 5.4. Os valores residuais de cor aparente e turbidez para as amostras poUNTais desta seção estão contidas no Apêndice.

Figura 5.4 – Gráfico de Cor Aparente Residual (UH): TAS_{ZS} de 12,3 ± 0,2 m.h⁻¹ associado às TAS_{ZC} de 136,3 ± 2,5 (T_{ZC} 53 ± 1 s) e 172,8 ± 3,2 m.h⁻¹ (T_{ZC} 35 ± 1 s) com A/V de 3,33; 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47,2 ± 0,9 m.h⁻¹ e V_{ZC} = 180,0 m.h⁻¹

Para a TAS_{ZS} estudada nesta seção, pode-se verificar que a remoção de cor aparente seguiu a mesma tendência que a turbidez: crescendo à medida que os

valores estudados de concentração de ar decrescem, para 4,90; 6,41 e 7,87 g de ar.m^{-3} de água para cada TAS_{ZC} estudada. O menor valor de residual de cor para a TAS_{ZS} , 1 UH (96,6% de eficiência) foi obtido para TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ quando associada a 4,90 g de ar.m^{-3} de água. Nota-se que os residuais de cor aparente obtidos para 4,90 e 6,41 g de ar.m^{-3} de água, na maior TAS_{ZC} são iguais aos obtidos para 6,41 e 7,87 g de ar.m^{-3} , respectivamente, na menor TAS_{ZC} . 89% (3 UH) foi a menor eficiência obtida para $12,3 \text{ m.h}^{-1}$, quando da TAS_{ZC} igual a $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e A/V igual a 7,87 g. de ar.m^{-3} .

Com os resultados obtidos, pode-se verificar que o tratamento mais eficiente da água de estudo para ambas as TAS_{ZC} estudadas, tanto para o parâmetro turbidez quanto para cor aparente, ocorre para a concentração de ar de 4,90 g de ar.m^{-3} de água (eficiência de 85% para $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e 83% para $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$). Pode-se verificar ainda que com o aumento da concentração de ar utilizada, ocorre o decréscimo da eficiência de remoção dos parâmetros. Quando da utilização de 3,33 g de ar.m^{-3} de água, obteve-se também uma eficiência menor (73,2%) quando comparada à concentração de 4,90 g de ar.m^{-3} . Assim, verifica-se que para tal TAS_{ZS} , para ambas as TAS_{ZC} estudadas, a concentração de 4,90 g de ar.m^{-3} (correspondente a uma razão de recirculação de 6% com pressão de saturação de 450 kPa) foi aquela capaz de produzir água efluente de melhor qualidade.

Quanto ao parâmetro UV_{254} , todos os residuais obtidos foram inferiores a $0,003 \text{ cm}^{-1}$ (eficiência > 85,7%), o qual corresponde ao limite de detecção do equipamento utilizado para as leituras.

Os resultados obtidos podem ser comparados aos obtidos por Pioltine (2011), que utilizou água de composição e condição de coagulação semelhantes às desta

pesquisa, com utilização da mesma PPFAD. Durante os ensaios, foram mantidos fixos os parâmetros: $T_F = 17 \text{ min}$, $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$, $Ve_{ZC} = 84,0 \text{ m.h}^{-1}$, $P_{SAT} = 450 \text{ kPa}$, $TAS_{ZC} = 106,7 \pm 2,0 \text{ m.h}^{-1}$, $T_{ZC} = 67,9 \pm 1,3 \text{ s}$, $V_{CF} = 38,4 \pm 0,7$ e $TAS_{ZS} 11,6 \text{ m.h}^{-1}$. Os resultados obtidos pelo autor estão resumidos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Resumo dos Resultados obtidos por Pioltine (2011).

Parâmetro	A/V	4,80 g.m ⁻³	6,3 g.m ⁻³	7,8 g.m ⁻³
	Turbidez (UNT)	0,7	0,9	1,2
Cor Aparente (UH)		1	2	2

Mesmo com um pequeno acréscimo de cerca de 8% no valor de TAS_{ZS} (de $11,6 \text{ m.h}^{-1}$ no estudo de Pioltine, para $12,3$ no caso presente) e de 21% no valor de TAS_{ZC} (de 107 m.h^{-1} no caso do autor citado, para $133,6 \text{ m.h}^{-1}$ no presente estudo), os resultados obtidos quanto à clarificação da água de estudo são muito próximos àqueles para as concentrações de $4,90$ e $6,41 \text{ g ar.m}^{-3}$ de água, os quais correspondem aos menores valores estudados em ambos os trabalhos. Tais resultados mostram que, para a água de estudo utilizada, a PPFAD opera com eficiência muito semelhante, com produção de efluente de turbidez inferior a 1 UNT , na faixa de $104,7$ e $138,8 \text{ m.h}^{-1}$ de TAS_{ZC} associada a valores entre $11,6$ e $12,5 \text{ m.h}^{-1}$ para concentrações de ar de $4,90$ a $6,41 \text{ g.m}^{-3}$.

5.2.5 Resultados obtidos com Taxa de Aplicação Superficial de $14,9 \pm 0,3 \text{ m.h}^{-1}$ associada às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e às A/V de 4,90, 6,41 e 7,87 g ar.m^{-3} de água

A Tabela 5.7 apresenta as leituras das amostras compostas de turbidez, cor aparente e UV_{254} obtidos nos ensaios realizados para a taxa de aplicação superficial fixa em torno de $14,9 \text{ m.h}^{-1}$.

Tabela 5.7 - Resultados de Turbidez, Cor Aparente, UV_{254} para TAS_{ZS} de $14,9 \pm 0,3 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1 \text{ s}$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m^{-3} de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$ e $Ve_{ZC} = 180,0 \text{ m. h}^{-1}$

TAS_{ZC} (m.h^{-1})	A/V (g.m^{-3})	Turbidez		Cor		UV_{254}	
		Residual (UNT)	Eficiência (%)	Residual (UH)	Eficiência (%)	Residual (cm^{-1})	Eficiência (%)
$136,3 \pm 2,5$	4,90	1,2	79,1	4,1	86,9	<0,003	>85,7
	6,41	1,4	74,6	5,5	82,2	<0,003	>85,7
	7,87	2,0	64,6	6,3	79,6	<0,003	>85,7
$172,8 \pm 3,2$	4,90	1,2	79,3	5,5	82,2	<0,003	>85,7
	6,41	1,5	73,0	7,1	77,0	<0,003	>85,7
	7,87	3,4	39,8	9,9	68,0	<0,003	>85,7

O gráfico da Figura 5.5 traz os valores residuais de turbidez das amostras compostas coletadas em todos os ensaios em que TAS_{ZS} fixo em $14,9 \pm 0,3 \text{ m.h}^{-1}$. Os resultados das amostras poUNTais dos mesmo ensaios são apresentados no Apêndice.

Figura 5.5 – Gráfico de Turbidez Residual (UNT): TAS_{ZS} de $14,9 \pm 0,3 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ ($T_{ZC} 53 \pm 1 \text{ s}$) e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($T_{ZC} 35 \pm 1 \text{ s}$) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$ e $Ve_{ZC} = 180,0 \text{ m.h}^{-1}$

Para esta, que é a maior TAS_{ZS} entre as estudadas, pode-se verificar que os valores de turbidez residual são maiores quando comparados às TAS_{ZS} anteriormente apresentadas. 1,2 UNT, o menor valor de turbidez residual entre os ensaios realizados para a TAS_{ZS} , foi obtido para 4,90 g ar.m⁻³ de água tanto para TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ quanto para $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$, o que representa uma eficiência de remoção de pouco mais de 79%. Nota-se que assim como nos resultados anteriores, a maior concentração de ar associada à maior TAS_{ZC} estudada foi a

combinação que ofereceu a menor eficiência de clarificação, neste caso 39,8% (3,4 UNT).

Os valores de cor residual das amostras compostas flotadas dos ensaios da TAS_{ZS} em questão estão no gráfico da Figura 0.6 e seus resultados poUNTais encontram-se no Apêndice.

Figura 0.6 – Gráfico de Cor Aparente Residual (UH): TAS_{ZS} de $14,9 \pm 0,3$ m.h⁻¹ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ (T_{ZC} 53 ± 1 s) e $172,8 \pm 3,2$ m.h⁻¹ (T_{ZC} 35 ± 1 s) com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47,2 $\pm$ 0,9 m.h⁻¹ e Ve_{ZC} = 180,0 m.h⁻¹

Quanto ao parâmetro cor aparente, nota-se que todos os valores obtidos para esta TAS_{ZS} foram superiores àqueles obtidos em todas as condições anteriormente apresentadas. Para $136,3 \pm 2,5$ m.h⁻¹ de TAS_{ZC} , a cor aparente residual cresceu com o aumento da concentração de ar, sendo respectivamente de 4, 6 e 10 UH para 4,90; 6,41 e 7,87 g.m⁻³ de água. Para a maior TAS_{ZC} avaliada, não houve variação

significativa da cor aparente residual, sendo de 6 UH para 4,90 e 7,87 g de ar.m⁻³ de água e 7 UH para o valor intermediário estudado.

5.2.6 Apresentação Geral dos Resultados, quanto à turbidez e considerações finais

Os gráficos tridimensionais da Figura 5.7 e da Figura 5.8 permitem uma comparação global dos resultados de turbidez residual obtidos em função dos valores de A/V, TAS_{ZS} e de TAS_{ZC} estudados.

Figura 5.7 - Gráficos de Turbidez Residual sob o ponto de vista das TAS_{zs} , para cada TAS_{zc} investigada

Figura 5.8 - Gráficos de Turbidez Residual sob o ponto de vista das TAS_{zc} , para cada TAS_{zs} investigada

Pela observação dos gráficos anteriores, e pelos demais aqui apresentados, observa-se que o valor de concentração de micro bolhas de ar de $4,90 \text{ g de ar.m}^{-3}$ de água forneceu sempre os maiores valores de eficiência de remoção de turbidez e cor aparente independente do valor de TAS_{ZC} na faixa de valores estudados (entre $133,8$ e $175,9 \text{ m.h}^{-1}$) e dos valores de TAS_{ZS} (entre $9,6$ e $15,2 \text{ m.h}^{-1}$). Tal valor de A/V pode ser considerado baixo quando comparado à literatura. Reali e Patrizzi (2007), por exemplo, apresentam a concentração de micro bolhas de ar ideal na faixa de 6 a 8 g.m^{-3} de água. Este fato reafirma a importância da otimização dos parâmetros de projeto de estações FAD para obtenção de unidades de alto desempenho e baixo consumo de energia, já que o valor de A/V está diretamente relacionado com a vazão de recirculação e pressão de saturação da instalação.

Pela Figura 5.7, dentre os demais resultados apresentados, pode-se verificar que para uma mesma TAS_{ZC} estudada, a menor TAS_{ZS} apresentou o menor residual de turbidez, o qual cresceu à medida que a TAS_{ZS} foi aumentada. Os resultados aqui apresentados evidenciam que a unidade mesmo operada com valores de TAS_{ZC} mais elevados que 65 m.h^{-1} , apontado por Lundh et. al. (2002) como parâmetro a ser adotado em projetos de unidades FAD.

Os gráficos da Figura 5.8 evidenciam o fato de que para todas as TAS_{ZS} investigadas, os menores residuais de turbidez (assim como ocorre com a cor, cujos resultados foram apresentados anteriormente), os menores residuais foram obtidos para $136,3 \text{ m.h}^{-1}$, a menor TAS_{ZC} estudada. De maneira geral, mesmo quando submetida a valores de TAS_{ZS} tão elevados quanto $15,2 \text{ m.h}^{-1}$ ($364,8 \text{ m.dia}^{-1}$), a instalação piloto de FAD objeto do presente estudo, desde que operada em condições adequadas de A/V ($4,90 \text{ g.m}^{-3}$), TAS_{ZC} ($133,6 \text{ m.h}^{-1}$) e T_{ZC} de cerca de 53 s foi capaz de produzir água efluente com turbidez residual na faixa de $1,2 \text{ UNT}$,

valor que pode ser considerado baixo quando em escala real houver uma unidade de filtração à jusante da FAD.

É importante destacar ainda, que sempre que se operou o flotador piloto com valores elevados de TAS_{ZC} e de TAS_{ZS} , verificou-se influência crescente do valor de A/V na eficiência da flotação. A análise dos gráficos das Figuras 5.8 e 5.9 permite verificar que valores de A/V abaixo ou acima do valor adequado, conduziram a resultados cada vez piores à medida que se elevou os valores de TAS_{ZC} e de TAS_{ZS} . Daí é possível concluir que as unidades FAD retangulares de média profundidade (2,10m), do tipo da utilizada no presente estudo, são capazes de operar com alta eficiência sob taxas elevadas na zona de separação (até 15 m/h) e na zona de contato (até próximo a 180 m.h⁻¹, associada a valores de T_{ZC} , na faixa de 35 a 55 s, concordando com Reali e Patrizzi, 2007), desde que seja fornecido o valor adequado de A/V , o qual pode variar de acordo com a qualidade da água a ser tratada. Alterações do valor de A/V abaixo ou acima do ótimo causam maiores quedas no desempenho da unidade quanto maiores forem os valores de TAS_{ZC} e de TAS_{ZS} utilizados. Assim, em projetos de estações de tratamento de água contendo unidades FAD do tipo da utilizada no presente estudo, a adoção de valores elevados de taxas na ZC e na ZS deve levar em conta o nível dos operadores do sistema.

Assim, a partir dos resultados obtidos para a água utilizada no presente estudo observa-se que a adequação dos parâmetros TAS_{ZC} , TAS_{ZS} , e A/V investigados foi importante para a obtenção de valores elevados de eficiência de remoção por FAD de cor aparente e turbidez.

5.3 ETAPA II - Caracterização do Escoamento na Zona de Separação

5.3.1 Considerações Iniciais

A partir dos resultados obtidos na etapa I, definiu-se como TAS_{ZS} a ser estudada nesta etapa a de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$, maior entre as estudadas que forneceu residual de turbidez menor que 1 UNT, isto quando associada a valor de A/V próximo a $4,9 \text{ g.m}^{-3}$ e à TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$. Os trabalhos correspondentes à caracterização do escoamento no interior da zona de separação foram realizados para três concentrações de ar: 4,90; 6,41 e $7,87 \text{ g.m}^{-3}$ de água. Em todos os ensaios utilizou-se a mesma vazão de entrada: $4,6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ e V_{CF} : $47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$, assim como nos ensaios da etapa I.

Para as três caracterizações, as medições foram realizadas seguindo a mesma malha virtual, esta composta por 98 pontos: 7 igualmente espaçados (0,125 m entre pontos) no eixo X, correspondente ao comprimento da ZS na planta da piloto e 14 igualmente espaçados (0,13 m entre pontos) em Z (correspondente à profundidade da ZS da PPFAD), para Y igual a 0,20 m (correspondente à largura da ZS da PPFAD).

Levando-se em conta a imprecisão da quantificação da velocidade de escoamento em água contendo bolhas de ar, conforme relato de Lundh et. al. (2002), os resultados serão apresentados por esquemas ilustrativos e discutidos sob o aspecto visual dos perfis de velocidade. Vale lembrar que os resultados foram obtidos e estão apresentados em duas dimensões.

5.3.2 Caracterizações dos Padrões de Escoamento na Zona de Separação com TAS aproximada de $12,3 \text{ m.h}^{-1}$ com concentrações de ar fornecido para a flotação de 4,90; 6,41 e $7,87 \text{ g.m}^{-3}$ de água

A Figura 5.9 ilustra o perfil de escoamento obtido com a sonda micro ADV para TAS_{ZS} de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associada à TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ com concentração de ar de $4,90 \text{ g.m}^{-3}$ de água (razão de recirculação de 6%). A Figura 5.10 ilustra o perfil para as mesmas condições de TAS_{ZS} e TAS_{ZC} , quando da PPFAD operada com $6,41 \text{ g de ar.m}^{-3}$ de água ($R = 8\%$). Por fim, a Figura 5.11 apresenta o perfil para a PPFAD operada com $7,47 \text{ g de ar.m}^{-3}$ de água.

Figura 5.9 - Perfil de Escoamento na Zona de Separação com TAS de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ com concentração de ar igual a $4,90 \text{ g.m}^{-3}$ de água ($R = 6\%$). Parâmetros Fixos: $Q_E = 4,6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, $P_{\text{SAT}} = 450 \text{ KPa}$, $TAS_{\text{ZC}} = 136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $V_{\text{CF}} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$

Figura 5.10 - Perfil de Escoamento na Zona de Separação com TAS de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ com concentração de ar igual a $6,41 \text{ g.m}^{-3}$ de água ($R = 8\%$). Parâmetros Fixos: $Q_E = 4,6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, $P_{\text{SAT}} = 450 \text{ KPa}$, $\text{TAS}_{\text{ZC}} = 136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $V_{\text{CF}} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$

Figura 5.11 - Perfil de Escoamento na Zona de Separação com TAS de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ com concentração de ar igual a $7,87 \text{ g.m}^{-3}$ de água ($R = 10\%$). Parâmetros Fixos: $Q_E = 4,6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, $P_{\text{SAT}} = 450 \text{ KPa}$, $\text{TAS}_{\text{ZC}} = 136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $V_{\text{CF}} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$

Com base nos dados mostrados nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, verifica-se que, para as três situações investigadas, na parte superior da zona de separação não é observado padrão de estratificação horizontal semelhante ao descrito por Edzwald (2007 e 2010) e apresentado na Figura 1. Segundo Edzwald (2007 e 2010), o padrão de escoamento na zona de separação depende de sua TAS, da velocidade *cross-flow*, da razão comprimento largura da unidade, da quantia de água retirada pelos coletores e da concentração da suspensão de microbolhas de ar no topo da ZS. Segundo o referido autor, ocorre um fluxo estratificado horizontal na parte superior da ZS que se dá devido à diferença de densidade do líquido (ou mistura bolhas de ar – água) ao longo da profundidade da zona de separação: já que há uma alta concentração de bolhas em movimento na superfície da ZS, a qual decresce ao longo da profundidade do tanque. Provavelmente este fato se deve à TAS_{ZS} aqui estudada ser menor àquelas por ele estudadas. Vale lembrar que TAS_{ZS} maiores não foram investigadas nesta pesquisa devido à baixa profundidade da ZS da unidade piloto (2,10m). Sabe-se que a aplicação de taxas maiores que 15 m.h^{-1} são possíveis apenas em unidades com ZS de grande profundidade (usualmente entre 4,5 e 5,0 m) ou em unidades FAD rasas contendo lamelas (Reali e Marchetto, 2001).

No caso em tela, as três situações encontram-se bem parecidas. Observa-se apenas uma pequena diferença no padrão de escoamento entre as três concentrações de ar estudadas, principalmente quanto à espessura da região superior. Além disso, para as três situações, observa-se a existência de curto circuito, ou seja porcentagem de fluxo de retorno.

Os resultados de Ludh et. al. (2000) mostram que a TAS e a concentração de ar fornecida para a flotação influenciam na formação do fluxo estratificado na ZS.

Segundo os autores, baixas concentrações de ar (ou R) associadas a altas TAS_{zs} transformam o fluxo estratificado em curto circuito, como observado no presente estudo.

Embora pequenas diferenças nos padrões de escoamento tenham sido observadas entre as três condições estudadas, provavelmente tais diferenças não explicam as diferentes eficiências de clarificação encontradas na PPFAD, quando da realização dos ensaios da etapa I desta pesquisa. Possivelmente, tais diferenças estejam mais relacionadas ao padrão de escoamento no interior na zona de contato do que na zona de separação, onde esta investigação foi realizada.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos com a realização do presente estudo em estação piloto de flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento de água para abastecimento permitem as seguintes conclusões:

- A concentração de ar fornecido para flotação, expressa em termos da relação A/V , igual a $4,90$ (g de ar. m^{-3} de água) foi aquela que apresentou as maiores eficiências na clarificação da água de estudo, para os dois valores de taxa de aplicação superficial na zona de contato ($136,3 \pm 2,5$ e $172,8 \pm 3,2$ $m.h^{-1}$, com os T_{ZC} respectivos 53 ± 1 s e 35 ± 1 s) e para os três valores de taxa de aplicação superficial na zona de separação ($9,8 \pm 0,2$ $m.h^{-1}$, $12,3 \pm 0,2$ $m.h^{-1}$ e $14,9 \pm 0,3$ $m.h^{-1}$) estudados;
- No que se refere à taxa de aplicação superficial na zona de contato, dentre os dois valores estudados, o valor de $136,3 \pm 2,5$ foi aquele que resultou em maiores eficiências de clarificação (turbidez residual de $0,7$ UNT), sendo que o aumento da TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ para $172,8 \pm 3,2$ $m.h^{-1}$ ocasionou ligeira queda na eficiência (aumento do residual de turbidez para $0,9$ UNT);
- Para uma mesma TAS_{ZC} , dentre os valores de taxas de aplicação superficial na zona de separação estudados, mesmo quando o menor valor de TAS_{ZC} foi adotado, houve ligeira queda na eficiência quando a taxa passou de $9,8 \pm 0,2$ $m.h^{-1}$ para $12,3 \pm 0,2$ $m.h^{-1}$ e desta para $14,9 \pm 0,3$ $m.h^{-1}$. Embora os melhores resultados tenham sido obtidos para TAS_{ZS} próxima a $9,8$ $m.h^{-1}$, os resultados obtidos mostram que para a

melhor concentração de ar, a planta piloto de flotação por ar dissolvido foi capaz de suportar um aumento de 50% na TAS_{ZS} com queda de apenas 8,4% na eficiência;

- Sempre que se operou o flotador piloto com valores elevados de TAS_{ZC} e de TAS_{ZS} , verificou-se influência crescente do valor de A/V na eficiência da flotação. Valores de A/V abaixo ou acima do valor adequado, conduziram a resultados cada vez piores à medida que se elevou os valores de TAS_{ZC} e de TAS_{ZS} . Daí conclui-se que as unidades FAD retangulares de média profundidade (2,10 m), do tipo da utilizada no presente estudo, são capazes de operar com alta eficiência sob taxas elevadas na zona de separação (até 15 m.h^{-1}) e na zona de contato (até próximo a 180 m.h^{-1} , associada a valores de T_{ZC} na faixa de 35 a 55 s), desde que seja fornecido o valor adequado de A/V , aqui igual a $4,90 \text{ g.m}^{-3}$, mas que pode variar de acordo com a qualidade da água a ser tratada. Alterações do valor de A/V para baixo ou para cima do ótimo causam maiores quedas no desempenho da unidade quanto maiores forem os valores de TAS_{ZC} e de TAS_{ZS} utilizados. Assim, em projetos de estações de tratamento de água contendo unidades FAD do tipo utilizada no presente estudo, a adoção de valores elevados de taxas na ZC e na ZS deve levar em conta o nível dos operadores do sistema e,
- Quanto à caracterização do perfil de escoamento no interior da zona de separação pôde-se concluir que para todas as situações investigadas não foi observada uma estratificação horizontal do escoamento, havendo uma região de curto circuito na superfície e outra, abaixo

desta, na qual parte da massa de água se desloca no sentido ascendente, contrário ao sentido do fundo da unidade, onde é coletada.

A partir dos resultados obtidos, para a realização de trabalhos posteriores recomenda-se:

- Realização de estudos com características diferentes deste, quanto à composição da água de estudo a fim de verificar se os resultados obtidos na presente pesquisa são aplicáveis a águas de diferentes teores de cor e turbidez. Ainda, tanto para a água utilizada nesta pesquisa quanto para águas de diferentes composições, mais valores de TAS_{zs} devem ser avaliados e,
- Quanto à caracterização do escoamento no interior da unidade, recomenda-se a realização de ensaios com espaçamento menor entre pontos àquele utilizado neste trabalho. Também, recomenda-se a realização de caracterização de escoamento no interior da zona de contato para as mesmas condições aqui avaliadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

DI BERNARDO, LUIZ; DANTAS, ÂNGELA DI BERNARDO. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água – segunda edição / volume 1 – São Carlos: RiMa, 792p., 2005.

EDZWALD, JAMES K. Principles and Applications of Dissolved Air Flotation. *Water Science and Technology*, v.31, n.3-4, p.1-23, 1995.

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

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

HAARHOFF, J. Dissolved Air Flotation: Progress and Prospects for Drinking Water Treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, p. 555-567, 2008.

HAARHOFF, J; VAN VUUREN, L. R. J. Design Parameters for Dissolved Air Flotation in South África. *Water Science and Technology*, p. 203-212, 1995.

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

LUNDH, M.; JONSSON, L.; DAHLQUIST, J. The Influence of Contact Zone Configuration on the Flow Structure in a Dissolved Air Flotation Pilot Plant. *Water Research*, v. 36, p. 1585-1595, 2002.

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

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

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

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

REALI, M. A. P. Concepção e Avaliação de um Sistema Compacto para Tratamento de Águas de Abastecimento Utilizando o Processo de Flotação por Ar Dissolvido e Filtração com Taxa Declinante. 1991. 373 f. Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991. 2 v.

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

SCHOFIELD, T. Dissolved air flotation in drinking water production. Water Science and Technology., v.43, n.8, p.9-18, 2001.

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

SONTEK. Micro ADV Acoustic Doppler Velocimeter, optimal instrument for lab work, 3D Current meter. Disponível em: < <http://www.sontek.com/microadv.php> > . Acesso em 24 Fev. 2010.

ZABEL, T. The Advantages of Dissolved Air Flotation for Water Treatment. Journal of American Water Works Association, p. 42-46, 1985.

APÊNDICE

Resultados de Cor e Turbidez das Amostras PoUNTais dos Ensaio com Taxa de Aplicação Superficial de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associada às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e às A/V de 4,90, 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água

Tabela A. 1- Resultados de Turbidez e Cor Aparente das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47,2 \pm 0,9 \text{ m.h}^{-1}$

$TAS_{ZC} \text{ (m.h}^{-1}\text{)}$		$136,3 \pm 2,5$				$172,8 \pm 3,2$			
A/V (g ar.m ⁻³ água)	Amostra	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 1		Ensaio 2	
		Turbidez (UNT)	Cor (UH)	Turbidez (UNT)	Cor (UH)	Turbidez (UNT)	Cor (UH)	Turbidez (UNT)	Cor (UH)
4,90	1	0,7	2	0,8	1	0,9	1	1,0	1
	2	0,8	2	0,7	2	1,0	2	0,9	2
	3	0,8	2	0,8	2	1,0	1	1,0	1
	4	0,7	3	0,8	2	0,8	1	1,0	2
	5	0,8	2	0,8	2	0,9	2	0,9	2
	6	0,8	2	0,8	2	0,9	2	1,0	1

6,41	1	1,0	3	1,0	2	1,0	2	1,0	2
	2	1,0	3	1,1	2	0,9	3	1,0	3
	3	0,9	3	0,9	2	1,1	3	1,1	3
	4	0,9	3	0,9	2	1,0	3	0,9	3
	5	0,9	4	0,9	2	1,0	2	1,1	2
	6	0,9	3	0,9	2	1,1	3	1,1	3
7,87	1	1,0	3	1,3	5	1,2	4	1,2	4
	2	1,0	3	1,3	4	1,1	3	1,2	3
	3	1,1	3	1,2	3	1,0	4	1,1	4
	4	1,0	3	1,2	2	1,0	3	1,1	3
	5	1,0	4	1,2	3	1,0	3	1,1	3
	6	0,9	3	1,1	2	1,0	3	1,1	3

Gráfico A. 1 - Resultados de Turbidez Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de 9,8 ± 0,2 m.h⁻¹ associado à TAS_{ZC} de 136,3 ± 2,5 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Gráfico A. 2 - Resultados de Turbidez Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de 9,8 ± 0,2 m.h⁻¹ associado à TAS_{ZC} de 172,8 ± 3,2 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Gráfico A. 3 - Resultados de Cor Aparente Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado à TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Gráfico A. 4 - Resultados de Cor Aparente Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de $9,8 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado à TAS_{ZC} de $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Resultados de Cor e Turbidez das Amostras PoUNTais dos Ensaio com Taxa de Aplicação Superficial de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associada às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e às A/V de 4,90, 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água

Tabela A. 2 - Resultados de Turbidez e Cor Aparente das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de $12,3 \pm 0,2 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47 \text{ m.h}^{-1}$

$TAS_{ZC} (\text{m.h}^{-1})$		$136,3 \pm 2,5$				$172,8 \pm 3,2$	
		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio Único	
A/V (g ar.m ⁻³ água)	Amostra	Turbidez (UNT)	Cor (UH)	Turbidez (UNT)	Cor (UH)	Turbidez (UNT)	Cor (UH)
3,33	1	-	-	1,4	3	-	-
	2	-	-	1,5	3	-	-
	3	-	-	1,5	4	-	-
	4	-	-	1,6	3	-	-
	5	-	-	1,5	4	-	-
	6	-	-	1,4	3	-	-
4,90	1	1,2	2	1,3	1	1,0	3
	2	1,0	1	1,1	2	0,8	2
	3	1,0	1	0,9	1	0,9	2
	4	1,0	1	0,9	1	0,9	2
	5	0,8	1	0,8	1	1,0	1
	6	0,9	1	0,9	1	1,0	1
6,41	1	1,4	3	1,0	2	1,2	3
	2	1,3	3	1,1	3	1,3	3
	3	1,1	3	1,0	2	1,3	3
	4	1,0	2	1,0	3	1,1	3
	5	1,0	2	1,1	2	1,1	2
	6	1,0	2	1,0	2	1,1	3
7,87	1	1,6	3	1,5	3	1,7	4
	2	1,7	3	1,6	3	1,7	5
	3	1,6	3	1,5	4	2,0	4
	4	1,8	4	1,7	3	2,0	4
	5	1,6	4	1,5	4	1,6	3
	6	1,7	3	1,6	3	1,5	3

Gráfico A. 5 - Resultados de Turbidez Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{zs} de 12,3 ± 0,2 m.h⁻¹ associado à TAS_{zc} de 136,3 ± 2,5 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Gráfico A. 6 - Resultados de Turbidez Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{zs} de 12,3 ± 0,2 m.h⁻¹ associado à TAS_{zc} de 172,8 ± 3,2 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Gráfico A. 7 - Resultados de Cor Aparente Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de 12,3 ± 0,2 m.h⁻¹ associado à TAS_{ZC} de 136,3 ± 2,5 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Gráfico A. 8 - Resultados de Turbidez Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de 12,3 ± 0,2 m.h⁻¹ associado à TAS_{ZC} de 172,8 ± 3,2 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Resultados de Cor e Turbidez das Amostras PoUNTais dos Ensaio com Taxa de Aplicação Superficial de $14,9 \pm 0,3 \text{ m.h}^{-1}$ associada às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5 \text{ m.h}^{-1}$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ e às A/V de 4,90, 6,41 e 7,87 g ar.m^{-3} de água.

Tabela A. 3 - Resultados de Turbidez e Cor Aparente das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de $14,9 \pm 0,3 \text{ m.h}^{-1}$ associado às TAS_{ZC} de $136,3 \pm 2,5$ e $172,8 \pm 3,2 \text{ m.h}^{-1}$ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m^{-3} de água. Parâmetros Fixos: $T_F = 17,2 \text{ min}$; $G_F = 110 \text{ s}^{-1}$; $V_{CF} = 47 \text{ m.h}^{-1}$

$TAS_{ZC} (\text{m.h}^{-1})$		$136,3 \pm 2,5$		$172,8 \pm 3,2$	
A/V (g ar.m^{-3} água)	Amostra	Turbidez (UNT)	Cor (UH)	Turbidez (UNT)	Cor (UH)
4,90	1	1,3	4	1,3	5
	2	1,2	4	1,5	5
	3	1,4	5	1,2	6
	4	1,3	4	1,2	5
	5	1,1	3	1,1	6
	6	1,2	4	1,2	5
6,41	1	1,5	6	2,4	9
	2	1,4	5	2,0	7
	3	1,4	6	1,6	6
	4	1,2	5	1,5	6
	5	1,4	5	1,5	6
	6	1,4	6	1,5	7
7,87	1	2,1	7	2,6	9
	2	2,1	6	3,6	10
	3	2,0	6	3,5	9
	4	2,4	7	3,5	10
	5	2,0	6	3,4	10
	6	2,0	6	2,4	9

Gráfico A. 9 - Resultados de Turbidez Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de 14,9 ± 0,3 m.h⁻¹ associado à TAS_{ZC} de 136,3 ± 2,5 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Gráfico A. 10 - Resultados de Turbidez Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de 14,9 ± 0,3 m.h⁻¹ associado à TAS_{ZC} de 172,8 ± 3,2 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Gráfico A. 11 - Resultados de Cor Aparente Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de 14,9 ± 0,3 m.h⁻¹ associado à TAS_{ZC} de 136,3 ± 2,5 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹

Gráfico A. 12 - Resultados de Cor Aparente Residual das Amostras PoUNTais para TAS_{ZS} de 14,9 ± 0,3 m.h⁻¹ associado à TAS_{ZC} de 172,8 ± 3,2 m.h⁻¹ com A/V de 4,90; 6,41 e 7,87 g ar.m⁻³ de água. Parâmetros Fixos: T_F = 17,2 min; G_F = 110 s⁻¹; V_{CF} = 47 m.h⁻¹