UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

IRENE MONTEIRO DA FRANCA SOUZA

INFLUÊNCIA DO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE
NA ZONA DE CONTATO NA EFICIÊNCIA DE
CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO POR
FLOTAÇÃO

VERSÃO CORRIGIDA
São Carlos – SP
2012

IRENE MONTEIRO DA FRANCA SOUZA

Influência do gradiente médio de velocidade na zona de contato na eficiência de clarificação de água para abastecimento por flotação

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

Orientador: Professor Dr. Marco Antonio P. Reali

VERSÃO CORRIGIDA
São Carlos
2012

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

S719i Souza, Irene Monteiro da Franca
Influência do gradiente médio de velocidade na zona
de contato na eficiência de clarificação de água para
abastecimento por flotação . / Irene Monteiro da Franca
Souza; orientador Marco Antonio Penalva Reali. São
Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2012.

1. tratamento de água para abastecimento. 2.
flotação por ar dissolvido (FAD). 3. gradiente médio de
velocidade (G). 4. telas. 5. zona de contato. 6. zona
de separação. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **IRENE MONTEIRO DA FRANCA SOUZA**.

Título da dissertação: "Influência do gradiente médio de velocidade na zona de contato na eficiência de clarificação de água para abastecimento por flotação".

Data da defesa: 13/09/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **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. Titular **Denis Vinicius Coury**

**A Deus, toda a honra, toda a glória e
todo o louvor.**

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo;

À minha família pelo amor, carinho, dedicação, compreensão, apoio e incentivo;

A Ariano Novaes, a companhia eterna dada por Deus, que vive minhas angústias e vitórias;

A USP, EESC, SHS e LATAR;

Ao meu orientador, Marco Reali, pela oportunidade, orientação e ensinamentos durante a execução desse trabalho;

Aos professores Dr. José Roberto Campos e Dra. Lyda Patricia Sabogal Paz pelas sugestões dadas no exame de qualificação;

Aos pesquisadores Msc. André Pioltine, Msc. Aline Eléia Escher, Gabriel Dibbern Sacchi, Msc. Lucas Marcon, Msc. Narumi Abe pelas experiências e conhecimentos compartilhados e pelo auxílio na execução desse trabalho;

Ao técnico Alcino e a Márcio pela constante ajuda na execução desse trabalho e pela amizade;

Aos amigos de laboratório, Gabriel, Eloá, Lucas, Gabriela, Raphael, Marcos, Teresa, Natália pela convivência saudável.

Aos colegas de mestrados pela amizade;

Aos funcionários da USP, pela atenção e solicitude com que se dispuseram a me ajudar durante o tempo que realizei esse trabalho;

Aos amigos Débora e Davi por tornarem minha vida são-carlense mais agradável;

Aos amados amigos de João Pessoa, mais que irmãos, íntimos e insubstituíveis na minha vida;

A FAPESP, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

Afirmou-lhe Jesus: Quem beber desta água tornará a ter sede; aquele porém, que beber da água que eu lhe der nunca mais terá sede; pelo contrário, a água que eu lhe der será nele uma fonte para jorrar para a vida eterna.

João 4:13-14

SUMÁRIO

RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
LISTA DE FIGURAS	14
LISTA DE TABELAS	16
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	18
1 INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVO	24
3 REVISÃO DA LITERATURA	25
3.1 Flotação por ar dissolvido (FAD)	25
3.2 Fatores que influenciam a eficiência da FAD	30
3.2.1 Coagulação e floculação da água	30
3.2.2 Configuração do reator	35
3.2.3 Geração de microbolhas de ar	39
4 MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1 Considerações Iniciais	41
4.2 A unidade piloto de flotação por ar dissolvido	41
4.3 A água em estudo	47
4.4 A coagulação e a floculação da água bruta preparada	48
4.5 A configuração do reator FAD	49
4.6 Concentração de microbolhas de ar	50
4.7 Gradiente médio de velocidade na zona de contato	51
4.8 Programação dos Ensaios	58
4.9 Monitoramento dos ensaios	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 Influência do gradiente médio de velocidade (G_{zc}) associado ao tempo de detenção hidráulico (t_{zc}) e à taxa de aplicação superficial (TAS_{zc}) na zona de contato da unidade FAD	61
5.1.1 Considerações Iniciais	61

5.1.2	Resultados obtidos com a configuração A ($TAS_{zc} = 133 \pm 3$ m/h e $t_{zc} = 54 \pm 1$ s), G_{zc} de 1,8; 6,5 e 10,2 s^{-1} e A/V de 3,73; 4,90 e 6,31 g/m^3	62
5.1.3	Resultados obtidos com a configuração B ($TAS_{zc}=86 \pm 1$ m/h e $t_{zc}= 84\pm 1$ s), G_{zc} de 0,9; 4,7 e 6,3 s^{-1} e A/V de 3,73; 4,90 e 6,31 g/m^3	69
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	77
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

RESUMO

SOUZA, I. M. F. **Influência do gradiente médio de velocidade na zona de contato na eficiência de clarificação de água para abastecimento por flotação**. 2012. São Carlos – SP, 81p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Hidráulica e Saneamento.

O presente trabalho teve como objetivo estudar a influência do gradiente médio de velocidade (G_{zc}), associado ao tempo de detenção hidráulico (t_{zc}) e à taxa de aplicação superficial (TAS_{zc}), na zona de contato, na eficiência de clarificação de uma unidade retangular de flotação por ar dissolvido, em escala piloto, tratando água para abastecimento. Foram estudadas duas configurações da Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido (UPFAD) (A e B), as quais diferem no comprimento da zona de contato – A (90mm) e B (140mm). A TAS_{zc} - A (133 ± 3 m/h) e B (86 ± 1 m/h) - e o t_{zc} - A (54 ± 1 s) e B (84 ± 1 s) - são diferentes. Foram avaliados três valores do G_{zc} - A (1,8; 6,5; 10,2) e B (0,9; 4,7; 6,3), através da inserção de telas com características diferentes no interior da zona de contato. E, Para cada valor de G_{zc} , foram investigados três valores de A/V (3,73; 4,90; 6,41). Em todos os ensaios realizados, foram fixados os seguintes parâmetros: vazão da água bruta preparada (5,4 m³/h); temperatura da água bruta preparada ($26 \pm 1^{\circ}\text{C}$); pH de coagulação ($6,5 \pm 0,1$); tempo de floculação (17,2 min); gradiente médio de velocidade de floculação (110 s^{-1}); vazão de descarte após a floculação (0,8 m³/h); vazão de entrada para a flotação (Q_e) (4,6 m³/h); velocidade de entrada para a flotação (v_e) (180 m/h); velocidade *cross-flow* (45 m/h); TAS_{zs} ($14,6 \pm 0,2$ m/h); pressão de saturação ($4,5 \pm 0,1$ Kg/cm²). A unidade piloto FAD foi alimentada com água preparada, que apresentou turbidez em torno de $7,4 \pm 0,6$ UNT, e cor aparente, em torno de $39,4 \pm 4,3$ UH. A fração removida dos parâmetros analisados para cada G_{zc} é menos sensível a variações de A/V na configuração A que na configuração B. Na configuração A, a tela que apresentou G_{zc} em torno de $6,5 \text{ s}^{-1}$ gerou melhores resultados para cada A/V analisado. Na configuração B, a tela que gerou G_{zc} em torno de $4,7 \text{ s}^{-1}$ proporcionou melhor fração removida de turbidez e cor para cada A/V estudado. Além disso, na configuração B, a fração removida de turbidez e cor foi menos sensível a variações de A/V, para G_{zc} de $4,7 \text{ s}^{-1}$ que para os demais valores de G_{zc} . A tela que gerou resultados mais eficientes na configuração A foi a mesma para a configuração B. Portanto o uso da referida tela favoreceu o desempenho das configurações A e B. Comparando todas as situações estudadas nas duas configurações, o ensaio com a configuração A (com t_{zc} de 54s) com G_{zc} de $6,3 \text{ s}^{-1}$ e A/V de 4,9 g/m³, apresentou as maiores frações de remoção de cor e turbidez.

Palavras – chave: tratamento de água para abastecimento; flotação por ar dissolvido (FAD); gradiente médio de velocidade (G); telas; zona de contato e zona de separação.

ABSTRACT

SOUZA, I. M. F. **Influence of the velocity gradient in the contact zone in the efficiency of clarification of potable water by flotation.** 2012. Sao Carlos - SP, 81p. Dissertation (Master) - Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Hidráulica e Saneamento.

The present work aimed to study the influence of velocity gradient (G_{zc}) associated with the hydraulic detention time (t_{zc}) and the rate of surface application (TAS_{zc}) in the contact zone in the efficiency of clarification of a unit rectangular dissolved air flotation pilot scale, treating water supplies. Two different kinds of configurations of the reactor dissolved air flotation in pilot scale (UPFA) (A and B) were studied, which differ in the length of the contact zone - A (90mm) and B (140mm). The TAS_{zc} - A (133 ± 3 m / h) and B (86 ± 1 m / h) - and t_{zc} - A (54 ± 1 s) and B (84 ± 1 s) – were different. Three different values of G_{zc} were analysed - A ($1.8, 6.5, 10.2$ s⁻¹) and B ($0.9, 4.7, 6.3$ s⁻¹) by insertion of grilles with different characteristics within the zone contact. And for each value of G_{zc} , three values of A / V ($3.73, 4.90, 6.41$ g/m³) were investigated. In all trials, the following parameters were set: flow of synthetic raw water (5.4 m³ / h), synthetic raw water temperature (26 ± 10 °C), coagulation pH (6.5 ± 0.1); flocculation time (17.2 minutes), the speed gradient flocculation (110 s⁻¹); flow disposal after flocculation (0.8 m³ / h), input flow to the flotation (Q_e) ($4, 6$ m³ / h), input speed for flotation (v_e) (180 m / h), cross-flow velocity (45 m / h), TAS_{zs} (14.6 ± 0.2 m / h), saturation pressure (4.5 ± 0.1 kgf / cm²). The pilot plant was fed with synthetic water, which showed turbidity of approximately 7.4 ± 0.6 NTU, and apparent color, about 39.4 ± 4.3 HU. The removal efficiency of the analyzed parameters for each G_{zc} is less sensitive to variations in the A / V in the configuration A than in the configuration B. In configuration A, the grille that showed G_{zc} about 6.5 s⁻¹ gave better results for each A / V analysis. In configuration B, the grille that has generated G_{zc} around 4.7 s⁻¹ provided the best removal efficiency of turbidity and color for each A / V studied. Furthermore, in the configuration B, the removal efficiency of color and turbidity was less sensitive to variations in A / V for G_{zc} 4.7 s⁻¹ than for other values of G_{zc} . The grille that generated the best results in the configuration A was the same for the configuration B. Therefore the use of that grille favored the performance of configurations A and B. Comparing all the situations studied in two configurations, the test with the configuration A (with t_{zc} the 54s) with G_{zc} of 6.3 s⁻¹ and A / V of 4.9 g/m³, had the highest removal efficiencies of color and turbidity.

Keywords: treatment of potable water, dissolved air flotation (DAF), velocity gradient (G), grilles, contact zone and separation zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Diagrama esquemático do processo FAD	26
Figura 3-2 - Esquema ilustrativo da unidade de primeira geração	27
Figura 3-3 - Esquema ilustrativo da unidade de segunda geração ou convencional	28
Figura 3-4 - Esquema ilustrativo da unidade denominada de Flotofiltro	29
Figura 3-5 - Esquema ilustrativo da unidade de terceira de geração	30
Figura 3-6 - Comparação entre os tempos de floculação de 5 e 20 minutos.....	33
Figura 3-7- Ilustração das quatro opções de floculação: (a) floculação convencional, (b) sem floculação, (c) floculação na zona de contato e (d) floculação com fluxo regulado por anteparos estáticos	34
Figura 3-8 - Fluxo estratificado padrão na zona de separação no processo FAD.....	38
Figura 4-1 - A UPFAD em que foi desenvolvida a pesquisa	42
Figura 4-2 - Esquema simplificado da UPFAD em que foi desenvolvida a pesquisa	42
Figura 4-3 - Mistura rápida <i>in line</i>	43
Figura 4-4 - Câmaras de floculação em série.....	44
Figura 4-5 - Entrada para a unidade de flotação.....	44
Figura 4-6 - Unidade de Flotação.....	45
Figura 4-7 - Vertedor final de saída.....	45
Figura 4-8 - Câmara de saturação	46
Figura 4-9 - As telas intercaladas modelo Hobby. (a) Remoção na zona de contato e (b) Vista geral.....	57
Figura 4-10 - As telas intercaladas modelo Hobby-Casanet. (a) Vista geral, (b) Acomodação na zona de contato, (c)	

Inseridas na zona de contato e (d) Remoção da zona de contato.....	58
Figura 4-11 - Diagrama esquemático dos ensaios realizados na UPFAD.....	59
Figura 5-1 - Relação linear entre os ensaios I e II.....	62
Figura 5-2 – Fração removida de turbidez <i>versus</i> A/V para os valores de G_{zc} estudados, na configuração A, nos ensaios I e II	64
Figura 5-3 – Fração removida de turbidez <i>versus</i> G_{zc} para os valores de A/V estudados, na configuração A, nos ensaios I e II.....	65
Figura 5-4 - Fração removida de cor aparente <i>versus</i> A/V para os valores de G_{zc} estudados, na configuração A, nos ensaios I e II	67
Figura 5-5 – Fração removida de cor aparente <i>versus</i> G_{zc} para os valores de A/V estudados, na configuração A, nos ensaios I e II	68
Figura 5-6 – Fração removida de turbidez <i>versus</i> A/V para os valores de G_{zc} estudados, na configuração B, nos ensaios I e II	70
Figura 5-7 – Fração removida de turbidez <i>versus</i> G_{zc} para os valores de A/V estudados, na configuração B, nos ensaios I e II	71
Figura 5-8 – Fração removida de cor aparente <i>versus</i> A/V para os valores de G_{zc} estudados, na configuração B, nos ensaios I e II	73
Figura 5-9 – Fração removida de cor aparente <i>versus</i> G_{zc} para os valores de A/V estudados, na configuração B, nos ensaios I e II	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Parâmetros mantidos fixos em todos os ensaios realizados	47
Tabela 4-2 - Características da água bruta preparada.....	47
Tabela 4-3 - Características da zona de contato.....	50
Tabela 4-4 - Características da zona de separação.....	50
Tabela 4-5 - Concentração de microbolhas de ar para cada razão de recirculação estudada	51
Tabela 4-6 - Gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento de água na zona de contato da UPFAD (sem inserção de telas em seu interior) para cada configuração estudada	53
Tabela 4-7 - Especificações técnicas das telas usadas	55
Tabela 4-8 - Porosidade da tela (ε) e o seu coeficiente de perda de carga (K)	55
Tabela 4-9 - Perda de carga (h) da tela para cada configuração	55
Tabela 4-10 - Volume de líquido (V) entre as telas	56
Tabela 4-11 - Gradiente médio de velocidade (G_{zc}) na zona de contato decorrente da aplicação de telas intercaladas.....	56
Tabela 4-12 - Gradiente médio de velocidade (G_{zc}) na zona de contato decorrente do fluxo hidráulico e da aplicação de telas intercaladas	57
Tabela 4-13 - TAS_{zc} , t_{zc} e G_{zc} aplicados nos ensaios em que foi ou não inserido módulo com telas em seu interior	59
Tabela 4-14 - Monitoramento dos ensaios	60
Tabela 5-1 - Resultados de turbidez para a configuração A ($TAS_{zc} = 133 \pm 3$ m/h e $t_{zc} = 54 \pm 1$ s), G_{zc} de 1,8; 6,5 e $10,2 \text{ s}^{-1}$ e A/V de 3,73; 4,90 e $6,31 \text{ g/m}^3$	63
Tabela 5-2 - Resultados de cor aparente para a configuração A ($TAS_{zc} = 133 \pm 3$ m/h e $t_{zc} = 54 \pm 1$ s), G_{zc} de 1,8; 6,5 e $10,2 \text{ s}^{-1}$ e A/V de 3,73; 4,90 e $6,31 \text{ g/m}^3$	66

- Tabela 5-3 - Resultados de turbidez para a configuração B ($TAS_{zc} = 86 \pm 1$ m/h e $t_{zc} = 84 \pm 1$ s), G_{zc} de 0,9; 4,7 e $6,3 \text{ s}^{-1}$ e A/V de 3,73; 4,90 e $6,31 \text{ g/m}^3$ 69
- Tabela 5-4 - Resultados de cor aparente para a configuração B ($TAS_{zc} = 86 \pm 1$ m/h e $t_{zc} = 84 \pm 1$ s), G_{zc} de 0,9; 4,73 e $6,31 \text{ s}^{-1}$ e A/V de 3,73; 4,90 e $6,31 \text{ g/m}^3$ 72
- Tabela 5-5 - Resultados de turbidez e cor obtidos nos ensaios com as configurações A ($TAS_{zc} = 133$ m/h e $t_{zc} = 54$ s) e B ($TAS_{zc} = 86$ m/h e $t_{zc} = 84$ s), com A/V de $4,9 \text{ g/m}^3$ (valor ótimo) e diferentes valores de G_{zc} 75

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C: Grau Célsius, medida de temperatura;

µm: micrômetro, medida de comprimento;

$\frac{A}{V}$: concentração de microbolhas de ar na zona de contato após a mistura da vazão de recirculação com a vazão de água floculada (g de ar/ m³ de água);

ABS 254: Absorância medida em espectrofotômetro para comprimento de onda de 254 nm;

ADV: *Acoustic Doppler Velocimeter*;

Al₂(SO₄)₃ x (16,5)H₂O : fórmula química de Sulfato de Alumínio hidratado;

cm: centímetro, unidade de comprimento;

EESC: Escola de Engenharia de São Carlos;

ETA: Estação de Tratamento de Água;

FAD: Flotação por Ar Dissolvido;

G_{zc}: Gradiente médio de velocidade na zona de contato;

g/m³: grama por metro cúbico, unidade de concentração de microbolhas de ar;

Kgf/cm²: Quilograma-força por centímetro ao quadrado, unidade de pressão;

l: litro, unidade de volume;

LATAR: Laboratório de Tratamentos Avançados e Reúso de Águas;

Lzc : comprimento na zona de contato;

m: metro, unidade de comprimento;

m/h: metro por hora, unidade de velocidade de entrada (ve), de TAS e de velocidade *cross-flow*;

m³/h: metro cúbico por hora, unidade de vazão;

mg/l : miligrama por litro, unidade de dosagem de coagulante;

min: minuto, unidade de tempo;

mm: milímetro, unidade de comprimento;

mV: milivolt, unidade de medida de potencial zeta;

UNT: Unidade Nefelométrica de Turbidez, unidade de medida para turbidez;

UH: Unidade Hazen, unidade de medida para cor;

pH: Potencial Hidrogeniônico, escala compreendida entre 0 a 14 que permite inferência quanto a acidez ou alcalinidade de uma amostra;

Qe: vazão de entrada para a flotação;

r: correlação de Pearson

R : razão de recirculação.

s: segundo, unidade de tempo;

s^{-1} : segundo elevado a menos um, unidade de gradiente de velocidade;

SHS: Departamento de Hidráulica e Saneamento;

SST: Sólidos Suspensos Totais;

TAS: Taxa de aplicação superficial;

TAS_{ZC} : Taxa de aplicação superficial na zona de contato;

TAS_{ZS} : Taxa de aplicação superficial na zona de separação;

t_{ZC} : Tempo de detenção hidráulico na Zona de Contato;

t_{ZS} : Tempo de detenção hidráulico na Zona de Separação;

UPFAD: Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido;

USP: Universidade de São Paulo;

ve: velocidade de entrada para a flotação.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural muito abundante na Terra e é essencial para a vida. Ao longo da história da humanidade, as pessoas sempre buscaram se estabelecer próximo à água. Atualmente, as pessoas fazem diversos usos deste recurso natural, tais como geração de energia, navegação, irrigação, pesca, abastecimento urbano e outros. Por causa disso, a água é muito importante para o desenvolvimento econômico e social. A saúde pública também é afetada pela sua disponibilidade e pela sua qualidade. Doenças relacionadas à água podem ocorrer pela ingestão de água poluída ou pela falta de água. Isso provoca perdas financeiras com internações e com redução da produtividade no trabalho e é responsável pela morte de milhões de pessoas, incluindo crianças. Esta situação poderia ser revertida se água de boa qualidade fosse fornecida em quantidade suficiente para as pessoas.

Apesar das fontes de água serem abundantes no mundo, são mal distribuídas. No Brasil, que possui grande disponibilidade de recursos hídricos, esse fato é bastante evidente, uma vez que a Bacia Amazônica, que possui as maiores reservas de água (68%), situa-se em uma região com baixa densidade demográfica, enquanto que a disponibilidade hídrica é menor em bacias do Sul (7%) e Sudeste (6%), onde a densidade demográfica é mais elevada (CALIJURI *et al.*).

Além da má distribuição da água, existem problemas relacionados à sua qualidade. Atualmente as águas vêm sendo poluídas em um ritmo muito intenso, em função dos significativos impactos de origem antrópica. A poluição das águas pode ser definida como qualquer adição de matéria ou energia que altere as características naturais das águas de modo a limitar os seus usos previstos (BRASIL, 1981). A poluição da água pode indicar que um ou mais de seus usos preestabelecidos foram prejudicados.

Uma medida de contribuir para o controle da poluição hídrica depende de um sistema de informações da qualidade da água e de parâmetros químicos, físicos, microbiológicos e de radioatividades estabelecidos para cada uso, para garantir a compatibilidade entre o seu emprego e a sua qualidade.

O abastecimento para consumo humano é considerado o uso mais nobre associado aos recursos hídricos, pois requer diversos critérios de qualidade da água. Engloba o consumo de água para beber, para fins alimentares e para higiene pessoal, sendo usada também para lavagem de roupas e de utensílios domésticos, irrigação de jardins, combate a incêndios, lavagem de veículos e limpeza em geral.

No Brasil, a Portaria N° 2914/2011, do Ministério da Saúde define o padrão de potabilidade que a água destinada ao consumo humano deve atender, determinando os limites para as características químicas, físicas, microbiológicas e de radioatividade. Fixam também frequências de análises, entre outros aspectos.

Deve-se ressaltar que para a adequada gestão dos recursos hídricos é importante também investimentos em geração de conhecimento e aplicação de tecnologia.

A água das fontes de abastecimento, no Brasil, sofre degradação pela falta de saneamento, dificultando o seu tratamento para consumo humano. Assim, conhecer suas propriedades, características e risco à saúde são fundamentais para se decidir pela tecnologia a ser utilizada.

A flotação por ar dissolvido é usada para separar partículas sólidas e/ou líquidas de uma fase líquida. A separação é realizada pela introdução de bolhas de gás, geralmente o ar, na fase líquida. Essas bolhas se combinam com a partícula, resultando em um agregado, cuja densidade é menor que a do líquido e, portanto ascende à superfície do mesmo, podendo ser coletada em uma operação de raspagem superficial (METCALF & EDDY, 2003).

Existe uma variedade de técnicas para introduzir bolhas de gás necessárias para a separação de partículas sólidas e/ou líquidas de uma fase líquida por flotação e, exceto a flotação gravitacional natural, em que as partículas têm peso específico menor que o líquido que as contêm, os processos de flotação podem ser classificados de acordo com o método de produção de bolhas em: eletroflotação ou flotação eletrolítica, flotação por ar disperso e flotação por ar dissolvido (FAD).

O desenvolvimento do processo de FAD no tratamento de água de abastecimento já percorreu uma longa jornada. O primeiro relato de sua aplicação foi, na década de 20, na Escandinávia. Após sua aplicação pioneira,

foi aparentemente esquecido até que o interesse ressurgiu, na década de 60, na Suécia, na Finlândia, na África do Sul e no Reino Unido. Isso convergiu na primeira conferência de FAD em 1976 para unificar a agenda internacional de FAD. Encontros subsequentes em 1991 (Antuérpia), 1994 (Orlando), 1997 (Londres), 2000 (Helsinque) e 2007 (Seul) forneceram marcos importante para a análise comparativa da evolução e aceitação da FAD como um processo viável no tratamento de água potável (HAARHOFF, 2008). Apesar dos recentes avanços relacionados aos aspectos fundamentais da FAD no tratamento de água de abastecimento, muitas questões continuam sem respostas. Portanto, ainda há a necessidade de mais pesquisas, para desenvolver o processo e torná-lo mais eficiente.

Uma unidade FAD pode ser dividida em duas principais zonas: de contato e de separação. O propósito da zona de contato é favorecer a colisão e a aderência entre os flocos de partículas e as microbolhas. As microbolhas ligadas aos flocos são designadas de aglomerados flocos-microbolhas (de ar). O escoamento de água conduz a suspensão de aglomerados flocos-microbolhas, microbolhas livres e a eventual parcela de flocos sem (ou com número insuficiente de) microbolhas para a segunda parte da unidade, designada zona de separação. Nessa zona, as microbolhas livres e os aglomerados flocos-microbolhas podem subir à superfície da unidade, formando uma camada sobrenadante. Ao longo do tempo, essa camada se torna concentrada produzindo um lodo que é recolhido e removido da unidade. A água clarificada é retirada pela parte inferior dessa zona.

A FAD é particularmente eficaz no tratamento de água de abastecimento, que contém algas, cor ou matéria orgânica e que apresenta baixa turbidez mineral. É mais eficiente que a sedimentação na remoção de turbidez e de partículas para os tipos de água citados. Além disso, age com eficiência na remoção de cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* (EDZWALD, 2010).

No Brasil, o estudo da FAD como etapa do tratamento de água para abastecimento iniciou na década de 80 por pesquisadores do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo (USP). Reali (1984) testou a primeira aplicação da FAD como etapa no tratamento de águas de abastecimento,

através de pesquisa desenvolvida em escala piloto, na Estação de Tratamento de Água de São Carlos (ETA São Carlos). O autor chegou à conclusão de que a FAD pode ser uma alternativa vantajosa em relação à sedimentação, para muitos casos. Em seguida, mais trabalhos foram desenvolvidos tanto em escala de laboratório quanto em escala piloto: Coelho, Reali e Campos (1991), Reali e Campos (1993), Reali e Gianotti (1993), Lobato, Reali e Faitanin (1995), Reali e Campos (1995), Dombroski, Reali e Marchetto (1996), Reali e Dombroski (1996), Reali e Santos (1996), Santos e Reali (1996), Marchetto e Reali (1997a), Marchetto e Reali (1997b), Marchioreto e Reali (1997), Reali e Sartori (1998), Patrizzi, Reali e Cordeiro (1999), Sartori e Reali (1999), Reali e Marchetto (2000), Reali e Sartori (2000), Reali, Patrizzi e Cordeiro (2000), Moruzzi, Patrizzi e Reali (2001), Moruzzi e Reali (2007), Reali, Moruzzi e Patrizzi (2007), Reali e Patrizzi (2007), Moruzzi e Reali (2008), Moruzzi e Reali (2010), Pioltine e Reali (2011).

Encontra-se, em desenvolvimento no Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo (USP), o projeto de pesquisa intitulado “Influência das características da zona de floculação, de contato e de separação, na formação de conjunto flocos microbolhas de ar adequados para a separação em unidades de flotação de última geração aplicados ao tratamento de água”. A pesquisa se inseriu no referido projeto, o qual já forneceu resultados que serviram de base para a elaboração de quatro trabalhos: Araújo (2010); Maia (2010); Escher (2011); Pioltine e Reali (2011).

Como parte importante da linha de pesquisa anteriormente citada, o presente trabalho tem como proposta principal a verificação da hipótese de que o gradiente médio de velocidade (G_{ZC}), na zona de contato, associado ao tempo de detenção hidráulico (t_{ZC}) e à taxa de aplicação superficial (TAS_{ZC}) nessa zona constituem parâmetros importantes para o projeto da zona de contato de unidades de flotação.

2 OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo precípua estudar a influência do gradiente médio de velocidade (G_{zc}), na zona de contato, associado ao tempo de detenção hidráulico (t_{zc}) e à taxa de aplicação superficial (TAS_{zc}) nessa zona na eficiência de clarificação de uma unidade retangular de flotação por ar dissolvido, em escala piloto, tratando água para abastecimento.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Flotação por ar dissolvido (FAD)

A flotação por ar dissolvido é usada para separar partículas sólidas e líquidas de uma fase líquida. A separação é realizada pela introdução de bolhas de gás, geralmente o ar, na fase líquida. Essas bolhas se combinam com a partícula, resultando em um agregado, cuja densidade é menor que a do líquido e, portanto ascende à superfície do mesmo, podendo ser coletada em uma operação de raspagem superficial (METCALF & EDDY, 2003).

Existe uma variedade de técnicas para introduzir bolhas de gás necessárias para a separação sólido-líquido por flotação e, exceto a flotação gravitacional natural, em que as partículas têm peso específico menor que o líquido que as contêm, os processos de flotação podem ser classificados de acordo com o método de produção de bolhas em: eletroflotação ou flotação eletrolítica, flotação por ar disperso e flotação por ar dissolvido (FAD).

Na flotação por ar dissolvido (FAD) com recirculação pressurizada, parcela do efluente já clarificado é conduzida à câmara de saturação. Nesta unidade, ocorre dissolução do ar na massa líquida, em valores elevados de pressão. A mistura segue para a unidade FAD, que opera em pressão atmosférica, provocando a precipitação do ar na forma de microbolhas. Seguidamente, as microbolhas são conduzidas através da massa líquida para a remoção dos flocos, que são formados na etapa de pré-tratamento.

A figura 3.1 é um diagrama esquemático do processo FAD com recirculação pressurizada, aplicado ao tratamento de água de abastecimento.

Figura 3-1 - Diagrama esquemático do processo FAD

Fonte: Edzwald (2007a)

A coagulação e a floculação são processos necessários para a flotação. Na coagulação, há a adição de produtos químicos – coagulante e alcalinizante. Os coagulantes mais utilizados no tratamento de água são os sais de alumínio e de ferro. A coagulação resulta de dois fenômenos: o primeiro, essencialmente químico, consiste nas reações do coagulante com a água, o que resulta na desestabilização das partículas coloidais; o segundo, fundamentalmente físico, consiste na agregação das partículas desestabilizadas. Esse processo é bastante rápido e é realizado na unidade de mistura rápida. Em seguida, é necessária a agitação relativamente lenta, para induzir colisões entre as impurezas, que se aglomeram formando partículas maiores, denominadas flocos. Essa etapa é a floculação.

Schofield (2001) relata as seguintes vantagens da FAD comparadas a outros processos: possibilidade de operação com altas taxas de aplicação superficial (>10 m/h) na zona de separação; unidades compactas; rápido arranque e capacidade de suportar paradas periódicas; captura de alto teor de sólidos, particularmente dos sólidos mais finos (80-90%); melhor remoção de algas (50-80%) em altas taxas de aplicação superficial na zona de separação;

uso de menores quantidades de coagulante, dispensando na maioria das vezes o uso de polímeros; efluente de alta qualidade química e biológica; processo relativamente resistente a variações hidráulicas e qualitativas da água; controle positivo sobre o processo de separação.

Como desvantagem, o mesmo autor cita: processo complexo e mecanicamente intenso; custos mais altos com energia elétrica; altos custos de serviços; requer floculador separado e a unidade FAD deve ser protegida (coberta); existência de muitas variáveis para o controle do processo.

Nos primeiros sistemas FAD utilizados, denominados de primeira geração, as unidades são longas, estreitas e rasas. Possui duas zonas distintas: zona de contato, onde se promove o contato entre as microbolhas e os flocos; zona de separação, onde o conjunto floco-microbolhas é conduzido à superfície para ser removido. Na zona de contato, o escoamento é turbulento e o fluxo é ascendente para a superfície da unidade. Na zona de separação, a direção do fluxo declina ligeiramente em relação à horizontal. As taxas de aplicação superficial na zona de separação (TAS_{ZC}) são da ordem de 2 a 3 m/h. Em consequência do emprego destas pequenas taxas, forma-se uma fina camada de microbolhas abaixo da superfície da água, no espaço de flotação, conhecida como manta de microbolhas. Esta manta branca não possui efeito de filtração (KIURU 2001).

A figura 3.2 ilustra a unidade de primeira geração em corte.

Figura 3-2 - Esquema ilustrativo da unidade de primeira geração

Fonte: Kiuru (2001)

Na segunda geração de FAD, os princípios fundamentais da FAD não foram alterados. As unidades continuaram semelhantes às da primeira geração

com zona de contato e zona de separação. Entretanto se tornaram mais largas, mais profundas e com menor comprimento e, por isso, a direção do fluxo apresenta maior declínio em relação à horizontal, com ângulos da ordem de 30° a 45° . Assim as TAS_{zs} passaram para 5 a 7 m/h podendo alcançar 10 m/h. Isso resultou no aumento da manta de microbolhas de ar com espessura de 30 a 50 cm no início do tanque declinando linearmente para valores de 10 a 20 cm no final do tanque. Esta manta de microbolhas, além de aumentar a agregação flocos/microbolhas, tem ligeira função de filtro (KIURU 2001).

A figura 3.3 ilustra a unidade de segunda geração ou convencional em corte.

Figura 3-3 - Esquema ilustrativo da unidade de segunda geração ou convencional

Fonte: Kiuru (2001)

O flotofiltro é combinação de flotação por ar dissolvido e filtração rápida. Na zona de contato, o fluxo é ascendente para a superfície da unidade. Enquanto que, na zona de separação, o fluxo é descendente da superfície do tanque para baixo, cobrindo a totalidade do fundo do espaço de flotação. Este fluxo de água vertical é igualmente distribuído ao longo da superfície do tanque. As TAS_{zs} podem ser da ordem de 10 a 15m/h, se a profundidade do espaço de flotação for suficientemente grande. Para estas TAS_{zs} , ocorre a expansão da manta de microbolhas, formando um leito filtrante. Esse leito possui camada espessa de 80 a 120 cm na parte superior da zona de

separação e o fluxo vertical de água é forçado a passar através desse leito filtrante (KIURU 2001).

A figura 3.4 ilustra a unidade denominada de Flotofiltro em corte.

Figura 3-4 - Esquema ilustrativo da unidade denominada de Flotofiltro

Fonte: Kiuru (2001)

As unidades FAD de terceira geração surgem a partir do flotofiltro e com o intuito de incrementar TAS_{zs} nas unidades. Para isso, substituíram os filtros por uma estrutura mecânica que desempenha o mesmo papel do filtro na zona de separação, no que se refere à equalização dos perfis de velocidade. Para aplicação de TAS_{zs} de 25 a 40m/h, os tanques devem ser mais profundos e as microbolhas, menores. O leito filtrante formado de microbolhas tem a função de filtro e sua espessura é da ordem de 1,5 a 2,5m (KIURU 2001).

A figura 3.5 ilustra a unidade de terceira geração em corte.

Figura 3-5 - Esquema ilustrativo da unidade de terceira de geração
 Fonte: Kiuru (2001)

3.2 Fatores que influenciam a eficiência da FAD

O desempenho da FAD depende principalmente dos seguintes fatores: coagulação e floculação da água, configuração do reator e geração de microbolhas de ar.

3.2.1 Coagulação e floculação da água

A coagulação e a floculação eficazes da água bruta devem ser promovidas com o objetivo de permitir a formação de flocos com características adequadas (distribuição de tamanho, carga superficial e grau de hidrofobicidade) (REALI & PATRIZZI, 2007).

Microbolhas de ar e partículas ou flocos apresentam potencial zeta negativo. Isso afeta a eficiência da colisão e adesão entre eles, devido à repulsão eletrostática existente. Portanto, devem-se reduzir as forças eletrostáticas repulsivas entre esses elementos. Flocos com potencial zeta próximo à neutralidade são produzidos pelo processo de coagulação. Sob essas condições, as forças atrativas (van der Waals ou hidrofóbica)

prevalecem, o que conduz a adesão dos flocos às microbolhas de ar (EDZWALD, 2010).

Uma possibilidade de aumentar a eficiência de colisão e adesão de partículas ou flocos às microbolhas de ar seria a modificação do potencial zeta das microbolhas de ar como alternativa ou como complemento ao processo de coagulação. Henderson, R. K., Parsons, S. A., Jefferson, B. (2008) investigaram a influência do uso de agentes tensoativos na superfície das bolhas na eficiência de remoção da alga *Microcystis aeruginosa* no processo de flotação por ar dissolvido. Foram estudados os efeitos da dosagem de agentes tensoativos de diferentes características na câmara de saturação da unidade FAD. A pesquisa revelou que a eficiência de remoção de algas pode ser comparada a de uma estação FAD convencional, no entanto, sem a exigência do processo de coagulação. A pesquisa não investigou o destino final dos agentes tensoativos, o que pode se constituir em limitação na aplicação de tratamento e água, pois se deve garantir que nenhum agente tensoativo esteja presente na água potável.

Lee, B. H. *et al.* (2007) investigaram o tamanho limite de partículas/flocos para serem removidos pela camada de bolhas. O experimento ocorreu em uma unidade FAD em escala de laboratório e, como materiais flutuantes, foram usados carvão ativado e areia. Ambos foram peneirados nas malhas #450, #200, #170 e #140 para variar as amostras em diversos tamanhos. O carvão ativado foi escolhido, porque apresenta densidade inferior a da areia.

As amostras foram coaguladas e floculadas em jarros e, em seguida, as amostras floculadas foram encaminhadas para testes de flotação. A pressão de saturação foi entre 4 e 5 Kgf/cm² e a taxa de recirculação, de 30 %. Após 1 minuto de flotação, a amostra foi retirada para analisar a distribuição de tamanhos dos materiais flutuantes.

Na investigação, foi descoberto que o tamanho limite de areia e de carvão ativado são similares. Os flocos de tamanho inferior a 30 µm são considerados menores que os espaços vazios da camada de microbolhas, portanto para melhorar a taxa de remoção de sólidos suspensos, estes devem ser floculados a dimensões mínimas de 30 µm, enquanto que os de tamanho

superior a 30 μm podem ser removidos, caso a camada de microbolhas esteja saturada.

Pioltine e Reali (2011) investigaram a influência do tempo de floculação (10 e 17 min) na eficiência do processo de uma unidade FAD retangular (capacidade de até 7,5 m^3/h) em termos de remoção de turbidez, cor aparente, ABS 254nm e sólidos suspensos totais (SST). A distribuição do tamanho dos flocos foi caracterizada por um sistema de aquisição de imagem especial.

A unidade FAD foi alimentada com água preparada para se obter um controle mais rigoroso das condições experimentais. A água em estudo foi preparada com a adição de 8,5mg/l de caulinita e 1,0 mg/l de ácido húmico à água de poço profundo. Para cada tempo de floculação, foram investigados três diferentes valores de concentração de microbolhas de ar (4,8; 6,3; 7,8 mg/l).

Os resultados apontaram que a unidade FAD teve melhor desempenho, em termos de remoção de turbidez, cor aparente e SST, para tempo de floculação de 17 minutos e concentração em massa de microbolhas de 4,8 mg/l, contudo desempenho satisfatório foi alcançado para o tempo de floculação de 10 min e para a mesma concentração de ar referida anteriormente.

Valade *et al.*(1996)¹ *apud* Edzwald (2007b) estudaram o efeito do tempo de floculação (5 e 20 min) no desempenho de uma unidade piloto FAD (capacidade de até 10 m^3/h) em termos de remoção de turbidez e de quantidade de partículas com dimensões de 2 a 200 μm . Os dados mostraram que foram obtidos turbidez inferior a 1 UNT e quantidade de partículas inferior a 1500 partículas/ ml após a flotação para ambos os tempos de floculação adotados. Isso revela que tempo de floculação curto pode ser usado. Deve-se ressaltar que a base para a avaliação da eficiência do sistema foi o valor da turbidez e a quantidade de partículas da água floculada *versus* a água flotada, como revela a figura 3.6.

¹ VALADE *et al.* Particle removal by flotation and filtration: pretreatment effects. Journal of American Water Works – AWWA, USA, 1996, v. 88, n.12, p.25 – 47.

Figura 3-6 - Comparação entre os tempos de floculação de 5 e 20 minutos

FONTE: Edzwald (2007b)

Han, M. *et al.* (2007) comparou quatro opções de floculação (floculação convencional, sem floculação, floculação na zona de contato e floculação com fluxo regulado por anteparos estáticos). Segundo o mesmo autor, a alta turbulência na zona de contato pode funcionar como um floculador hidráulico e isso pode ser usado em substituição à floculação.

A figura 3.7 ilustra as quatro opções de floculação analisadas.

Figura 3-7- Ilustração das quatro opções de floculação: (a) floculação convencional, (b) sem floculação, (c) floculação na zona de contato e (d) floculação com fluxo regulado por anteparos estáticos

FONTE: Han, M. *et al.* (2007)

A pressão na câmara de saturação foi mantida em 5,17 Kgf/cm² e a razão de recirculação foi de 10%. Uma suspensão de caulim (20 UNT) foi usada para o ensaio.

Considerando que a taxa de aplicação superficial que atua é de 10 m/h, as quatro opções são capazes de produzir uma eficiência de remoção de turbidez superior a 80% e, nos casos da floculação convencional e da floculação na zona de contato, pode ser obtida eficiência de remoção de turbidez superior a 90%. De acordo com o mesmo autor, possivelmente a produção de flocos de tamanho apropriado para ser removido no processo FAD seja possível apenas com floculação na zona de contato, e que a eficiência de colisão entre bolha e partícula aumente através da instalação de um floculador nessa zona.

Pode-se optar pelo adequado pré-tratamento para obter eficiência de remoção de turbidez a partir de 80%, de acordo com a taxa de aplicação superficial. A floculação convencional deve ser usada para taxa de aplicação superficial superior a 17,1 m/h; aplica-se floculação na zona de contato para taxa de aplicação superficial na ordem de 17,1 a 12,7 m/h; usa-se floculação com fluxo regulado por anteparos estáticos, para taxa de aplicação superficial

na ordem de 12,7 a 10,5 m/h; e se escolhe a opção sem floculação para taxa de aplicação superficial inferior a 10,5 m/h.

3.2.2 Configuração do reator

Um reator de flotação por ar dissolvido é dividido em duas seções principais com diferentes funções: a zona de contato e a zona de separação.

Maia (2010) analisou a influência da velocidade de entrada na zona de contato sobre a eficiência de clarificação em uma unidade piloto FAD (capacidade máxima de 7,5 m³/h). A unidade piloto de grande escala foi alimentada com 4,6 m³/h de água preparada de turbidez em torno de $7 \pm 0,5$ UNT e de cor aparente em torno de $45 \pm 0,5$ UH. Foram realizados ensaios para diferentes valores de velocidade de entrada, variando a altura de entrada da zona de contato. Para cada valor de velocidade de entrada estudado, foram investigados dois valores de potencial zeta (10 mV e 0 mV). Os resultados mostraram que velocidade de entrada na faixa de 62,2 m/h e 12.432,4 m/h não influenciou significativamente a eficiência de clarificação do processo FAD para os dois valores de potencial zeta estudado. Entretanto, sugere-se a adoção de valores de velocidade de entrada na faixa de 124,3 a 180,2 m/h.

Reali e Patrizzi (2007) estudaram o escoamento na zona de contato de um reator FAD, com o objetivo de avaliar a influência desta na remoção de cor e turbidez no processo de clarificação da água.

Os ensaios ocorreram em uma unidade piloto de grande escala alimentada com 4,6 m³/h (capacidade de até 7,5 m³/h) de água preparada de cor aparente moderada (52 ± 3 UH) e baixa turbidez (11 ± 2 UNT). A parede da zona de contato foi mantida na vertical e oito diferentes configurações, em termos de altura e comprimento, foram investigadas. Assim, obtiveram-se diferentes valores de taxa de aplicação superficial na zona de contato (67; 90; 127 e 180 m/h), diferentes valores de tempo de detenção hidráulicos na zona de contato (16; 24; 34; 65 e 88 s) e diferentes valores de velocidade *cross-flow* (9 a 45 m/h).

O melhor desempenho em termos de eficiência de remoção de cor e turbidez ocorreu para taxa de aplicação superficial na zona de contato de 180 m/h, tempo de detenção hidráulico na zona de contato de 34s e velocidade

cross-flow de 45 m/h. Segundo os mesmos autores, é possível supor que existe um valor ótimo de tempo de detenção hidráulico na zona de contato para cada taxa de aplicação superficial nessa zona e que este valor diminui à medida que essa taxa aumenta.

Lundh, M., Jönsson, L., Dahlquist, J. (2002) realizaram um estudo experimental sobre a estrutura do fluxo na zona de contato de uma unidade FAD piloto retangular de 1,35m de altura, 1,70m de comprimento e 0,70m de largura e analisaram a influência da configuração da zona de contato na estrutura do fluxo da unidade FAD piloto. Foram examinados diferentes comprimentos dessa zona e diferentes alturas e inclinações do anteparo que separa a zona de contato da zona de separação. A taxa de aplicação superficial na zona de contato variou de 40 a 98 m/h. Foram realizadas medições da velocidade da água na seção longitudinal central utilizando um equipamento denominado ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*). Os resultados mostraram que a estrutura do fluxo na zona de contato é caracterizada por uma região turbulenta na parte inferior e por *plug-flow* na parte imediatamente superior e que, à medida que a taxa de aplicação superficial nessa zona aumentava, a região turbulenta diminuía. A taxa de aplicação superficial na zona de contato sugerida para o projeto foi de 65 m/h. As variações nas alturas e inclinações do anteparo que separa a zona de contato da zona de separação não influenciaram significativamente a região turbulenta da zona de contato. A zona de separação foi caracterizada por fluxo estratificado, o qual é influenciado principalmente pela velocidade *cross-flow*, que é função da altura da lâmina de água acima da parede que separa a zona de contato da zona de separação.

Araújo (2010) estudou a influência da velocidade *cross-flow* (40, 70, 100, 150, 350 e 600 m/h) na eficiência do processo FAD. Para cada valor de velocidade *cross-flow*, foram investigadas duas condições de taxa de aplicação superficial na zona de separação (7,7 m/h e 15 m/h) e sob dois valores de potencial zeta (10 mV e 0 mV). A unidade piloto de grande escala foi alimentada com 4,6 m³/h de água preparada de cor aparente moderada (52 ± 3 UH) e baixa turbidez (11 ± 2 UNT). O autor concluiu que, em todas as condições estudadas, a remoção de cor, turbidez e ABS 254 nm apresentou

boa eficiência e que não há diferenças significativas de clarificação entre as velocidades analisadas.

Na zona de separação, dá-se a remoção de microbolhas de ar e aglomerados flocos-microbolhas, os quais devem apresentar velocidade ascensional suficiente para exceder as linhas de corrente do escoamento. Isso acontece quando a velocidade de ascensão desses elementos é superior ou igual à taxa de aplicação superficial atuante na zona de separação. Lundh (2000) estudou o comportamento do escoamento na zona de separação de uma unidade piloto FAD (capacidade de até 30 m³/h) submetida a diferentes valores de taxa de aplicação superficial (10; 12,5; 15; 17,5 e 20 m/h) e de razões de recirculação (5, 10 e 15%). Uma sonda ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) foi usada para medir as velocidades da água em diversos pontos da zona de separação da unidade piloto para caracterizar o fluxo. A pressão aplicada na câmara de saturação foi de 5,17 Kgf/cm², o que favoreceu a formação de bolhas de tamanho de 40 µm.

O mesmo autor revelou que o escoamento na zona de separação foi estratificado, principalmente à medida que se aumentou a taxa de aplicação superficial. Na figura 3.8, há um esquema simplificado da estratificação do fluxo na zona de separação. Nesse escoamento, a água, que vem da zona de contato, segue pela camada superficial da zona de separação com maior intensidade até alcançar a parede à jusante dessa zona, e retorna para a parede a montante com menor intensidade. Assim, após o escoamento estratificado na camada menos densa da parte superior (grande quantidade de microbolhas), ocorre o escoamento tendendo a *plug-flow* na parte inferior (pouca quantidade de bolhas) também com menor intensidade.

Figura 3-8 - Fluxo estratificado padrão na zona de separação no processo FAD

FONTE: Edzwald (2007b)

Edzwald (2007b) constatou que o fluxo estratificado padrão na zona de separação verificado por Lundh (2000) triplica a área para clarificação, ou seja, a área para clarificação corresponde a três vezes a área da zona de separação. Isso reduz a taxa de aplicação superficial atuante na zona de separação em três vezes. Então em uma unidade de FAD, que possui taxa de aplicação superficial na zona de separação de 40 m/h, apresenta uma taxa de aplicação superficial atuante de 13,3 m/h. A estratificação do fluxo explica porque se pode obter bom desempenho no processo FAD com taxa de aplicação superficial superior a 20 m/h.

Lundh et al.(2001) caracterizaram a estrutura do escoamento na zona de separação e a sua relação com a concentração de ar em uma unidade piloto FAD de 1,70m de comprimento, 1,35m de altura e 0,70m de largura. Para isso, testou três valores de taxa de aplicação superficial na zona de separação (10, 15 e 20 m³/h), cada uma com três valores de razões de recirculação (5, 10 e 15%). Os perfis de velocidades foram medidos em três dimensões do escoamento em diversos pontos da zona de separação através de equipamento ADV. A pesquisa concluiu que as bolhas de ar impactam significativamente no escoamento e que duas estruturas de escoamento foram observadas: escoamento estratificado, caracterizado por um transporte horizontal de água até o final da parede seguido de um retorno horizontal abaixo deste fluxo, antes de se dirigir ao fundo do tanque, e curto-circuito, definido como um desvio descendente no sentido do fundo do tanque. Esse

comportamento do fluxo de água na zona de separação foi o mesmo verificado em pesquisa desenvolvida por Lundh (2000) e pode ser observado na figura 3.9.

Escher (2011) verificou a influência das taxas de aplicação superficial nas zonas de separação (9,8; 12,3 e 14,9 m/h) e de contato (136,3 m/h e 172,8 m/h) e da concentração de microbolhas de ar (4,90; 6,41 e 7,87 g/m³) na eficiência da remoção de partículas em uma unidade piloto FAD e caracterizou a estrutura de escoamento no interior da zona de separação dessa unidade, usando uma sonda microADV. A unidade piloto de grande escala foi alimentada com 4,6 m³/h de água preparada de turbidez em torno de 7,5 UNT e de cor aparente em torno de 38 UH. A concentração de ar fornecida à flotação de 4,90 g/m³ forneceu sempre os menores residuais de cor e turbidez nas condições investigadas. Quanto à taxa de aplicação superficial na zona de contato, o valor de 136,3 m/h resultou em maiores eficiências de clarificação e o aumento para 172,8 m/h causou ligeira queda na eficiência. Quanto à taxa de aplicação superficial na zona de separação, as maiores eficiências de clarificação foram obtidas para o menor valor estudado, 9,8 m/h. Na caracterização da estrutura do escoamento na zona de separação, observou-se para todas as condições analisadas, um fluxo em curto-circuito na região superior da zona de separação e, logo abaixo desta, um fluxo descendente em direção ao fundo da unidade.

3.2.3 Geração de microbolhas de ar

O tamanho das bolhas é uma propriedade importante no desempenho da FAD, pois se relaciona tanto ao sucesso das colisões entre flocos e bolhas quanto à sua velocidade ascensional (EDZWALD, 2010). Na flotação por ar dissolvido, quanto menor o tamanho médio das microbolhas de ar geradas no interior do flotador, mais eficiente será o processo, pois maior será a probabilidade de colisão entre as bolhas e os flocos em suspensão e maior também a chance de se ter uma ligação mais estável entre as microbolhas e os flocos, pois bolhas maiores se desprendem mais facilmente da superfície dos flocos, após a colisão, devido às suas maiores velocidades ascensionais, que são diretamente proporcionais ao quadrado do diâmetro das microbolhas.

A formação de bolhas ocorre em duas etapas: nucleação e coalescência ou aglutinação. A nucleação é a etapa inicial de formação de bolhas, a qual ocorre muitas vezes em tempo inferior a 1s após o início da liberação da pressão na vazão de recirculação. Nessa etapa, as bolhas apresentam tamanho inferior a $1\mu\text{m}$ (EDZWALD, 2010). A distribuição de tamanho de bolhas presentes em uma unidade FAD depende do fato das bolhas, especialmente após a sua formação, colidirem e crescerem em um processo chamado coalescência ou aglutinação, que é influenciado por: tipo de dispositivo de liberação de ar, pressão de saturação, temperatura do líquido, pH da suspensão, concentração de agentes tensoativos presentes no líquido (REALI, 1991).

Zabel (1984) estudou dois tipos de dispositivos de liberação de ar: válvula de agulha e bocal Water Research Center (WRC). O tamanho das bolhas de acordo com os dispositivos estudados se situa na faixa de 10 a $120\mu\text{m}$. Para a válvula de agulha, a maioria das bolhas se encontra entre 40 a $90\mu\text{m}$, enquanto que para bocal WRC, entre 20 a $50\mu\text{m}$.

Han *et al.* (2002) também estudaram o efeito da pressão na câmara de saturação (2,07 a $6,20\text{ Kg/cm}^2$) na distribuição do tamanho das bolhas. O tamanho da bolha diminuiu com o aumento da pressão de saturação até o valor de $3,62\text{ Kg/cm}^2$, acima do qual o tamanho da bolha não diminuiu com o aumento da pressão. De acordo com os resultados apresentados, é desnecessário manter uma pressão acima de $3,62\text{ Kg/cm}^2$ e também é antieconômico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Considerações Iniciais

A presente pesquisa foi realizada no Laboratório de Tratamento Avançado e Reúso de Águas (LATAR) do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo (USP).

Os ensaios foram desenvolvidos em uma unidade piloto retangular de flotação por ar dissolvido, onde foram investigados a influência na eficiência do processo FAD i) do gradiente médio de velocidade associado ao tempo de detenção hidráulico(t_{zc}) e à taxa de aplicação superficial (TAS_{zc}) na zona de contato, e ii) da concentração de ar fornecida para a geração de microbolhas.

4.2 A unidade piloto de flotação por ar dissolvido

A unidade piloto de flotação por ar dissolvido (UPFAD), em que foi desenvolvida a presente pesquisa, associa em uma mesma estrutura os processos de coagulação, floculação e flotação e é operada de forma semi-automatizada. Nessa mesma UPFAD, foram desenvolvidos os trabalhos de Reali e Patrizzi (2007), Maia (2010), Araújo (2010), Pioltine e Reali (2011) e Escher (2011). A figura 4.1 corresponde a uma vista geral da UPFAD.

Figura 4-1 - A UPFAD em que foi desenvolvida a pesquisa

A figura 4.2 é um esquema simplificado da UPFAD em que foi realizada a pesquisa.

Figura 4-2 - Esquema simplificado da UPFAD em que foi desenvolvida a pesquisa

FONTE: Adaptado de Maia (2010)

A captação da água subterrânea é realizada em poço artesiano situado no Campus I da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos. Essa água é direcionada para três reservatórios que abastecem à UPFAD no LATAR. Cada reservatório tem capacidade de armazenamento de 15.000 l e agitador submersível para manter a homogeneização da água, que era preparada nesse local.

A água de estudo segue dos reservatórios para o tanque de equalização de pressão. Em seguida, a água preparada é direcionada para a UPFAD por uma bomba centrífuga.

A mistura rápida ocorre na linha da tubulação – *in line* (Figura 4.3). Foram adicionados alcalinizante e coagulante para promover o controle de pH e a coagulação respectivamente. As soluções de coagulante e de alcalinizante foram preparadas separadamente em reservatório de 250 l, cada qual com agitador de eixo vertical para uniformizar a mistura durante o ensaio. A dosagem de produtos químicos para a UPFAD é controlada por duas bombas de deslocamento positivo e ocorre através de injetores acoplados à tubulação.

Figura 4-3 - Mistura rápida *in line*

A floculação aconteceu em três câmaras em série, cada qual com motores acoplados a pás que realizam a mistura lenta para o gradiente de velocidade estabelecido (Figura 4.4). Durante os ensaios, a vazão na floculação foi fixada em 5,4 m³/h e o volume de cada câmara, em 0,515 m³, portanto o tempo de detenção resultou em 17 min.

Figura 4-4 - Câmaras de floculação em série

Deve-se ressaltar que o valor da vazão de entrada para a flotação (Q_e) corresponde a 4,6 m³/h, então 0,8 m³/h foi descartado após a floculação.

Da unidade de floculação para a de flotação por ar dissolvido, a água pré-tratada passa por uma seção transversal retangular, cuja altura é regulada por uma comporta (Figura 4.5). Isso possibilita que diferentes valores de velocidade de entrada na unidade de flotação por ar dissolvido sejam atingidos.

Figura 4-5 - Entrada para a unidade de flotação
FONTE: Maia (2010)

A unidade de flotação por ar dissolvido é retangular e é dividida em zona de contato e zona de separação (Figura 4.6). Essas zonas são separadas por anteparo, que pode ser alterado para que se obtenham diferentes valores de tempo de detenção hidráulico e taxa de aplicação superficial, na zona de contato. A zona de separação é delimitada pelo anteparo, pelas paredes

laterais e por uma parede móvel, que permite que diferentes valores de taxas de aplicação superficial sejam obtidos nessa zona.

Figura 4-6 - Unidade de Flotação

Da zona de separação da unidade de flotação, a água tratada segue para o vertedor final de saída, que controla o nível de água na UPFAD (Figura 4.7).

Figura 4-7 - Vertedor final de saída

Do vertedor final de saída, parcela da água tratada é direcionada para a câmara de saturação, para recircular e pressurizar o fluxo (Figura 4.8). Esta unidade possui manômetro, ventosa, válvula de segurança, controlador de nível, bomba centrífuga associada a medidores de vazão eletromagnético e rotâmetro. Nessa câmara, submetida à pressão de $4,5 \pm 0,1$ Kg/cm², ocorre dissolução do ar na massa líquida.

Figura 4-8 - Câmara de saturação

A câmara de saturação é conectada a três válvulas de agulhas instaladas na parte inferior da zona de contato, as quais promovem a despressurização brusca de água saturada com ar dissolvido, provocando a precipitação do ar na forma de microbolhas. Seguidamente, as microbolhas são conduzidas através da massa líquida para a remoção dos flocos, que são formados na etapa de pré-tratamento da água.

Em todos os ensaios realizados, foram mantidos fixos os parâmetros mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4-1 - Parâmetros mantidos fixos em todos os ensaios realizados

Parâmetro	Unidade	Valor
Vazão da água bruta preparada	m ³ /h	5,4
Temperatura da água bruta preparada	°C	26±1
pH de coagulação	-	6,5±0,1
Tempo de floculação	min	17,2
Gradiente médio de velocidade de floculação	s ⁻¹	110
Vazão de descarte após a floculação	m ³ /h	0,8
Vazão de entrada para a flotação (Q _e)	m ³ /h	4,6
Velocidade de entrada para a flotação (v _e)	m/h	180
Velocidade <i>cross-flow</i>	m/h	45
TAS _{zs}	m/h	14,6±0,2
Pressão de saturação	Kgf/cm ²	4,5±0,1

4.3 A água em estudo

A UPFAD foi alimentada com água preparada, com o objetivo de estabelecer um controle mais rigoroso das condições experimentais. A água foi preparada pela adição de caulinita (Fluka 60609) e de ácido húmico (ALDRICH 675-2) à água subterrânea extraída do poço artesiano situado no Campus I da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos. A água preparada apresentou concentrações de: 8,5 mg/l de caulinita, para obter turbidez em torno de 7,4±0,6 UNT, e de 1 mg/l de ácido húmico, para conferir cor aparente em torno de 39,4±4,3 UH.

Após o preparo, a água apresentou as características apresentadas na Tabela 4.2:

Tabela 4-2 - Características da água bruta preparada

Parâmetros	Valor
pH	6,6±0,1
Alcalinidade (mg/l CaCO ₃)	29,8±0,6
Condutividade (µs/cm)	59,3±0,8
Cor aparente (UH)	39,4±4,3
Turbidez (UNT)	7,4±0,6

Para cada ensaio, foram preparados 45.000 l de água da seguinte forma: i) em três reservatórios de 15.000 l, foram adicionados caulinita e ácido húmico à água subterrânea em um dia anterior ao ensaio; ii) mantinha-se essa mistura sob agitação por cerca de 12 h; iii) coletava-se uma amostra de água preparada bruta para análise; iv) adicionava-se carbonato de sódio (GENCO) em cada reservatório, para controle do pH; v) agitava por aproximadamente 1h para iniciar o ensaio; iv) mantinha-se a água preparada sob agitação até o final do ensaio.

A água preparada nesse trabalho foi similar à usada por Reali e Patrizzi (2007), Maia (2010), Araújo (2010), Pioltine e Reali (2011) e Escher (2011) em pesquisas desenvolvidas na mesma unidade piloto de flotação por ar dissolvido.

4.4 A coagulação e a floculação da água bruta preparada

A água foi coagulada com sulfato de alumínio hidratado $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot (16,5)\text{H}_2\text{O}$ (VETEC P.A. 277) e, para controlar o valor desejado de pH, foi utilizado carbonato de sódio (GENCO). Tanto o coagulante – sulfato de alumínio hidratado – quanto o alcalinizante – carbonato de sódio – foram os mesmos utilizados por Maia (2010), Araújo (2010), Pioltine e Reali (2011) e Escher (2011).

Uma série de ensaios foi realizada em equipamento de escala de laboratório denominado flotatestes para determinação das condições ótimas de coagulação – pH e dosagem de coagulante – para a água de estudo. Os resultados foram apresentados por Araújo (2010).

A dosagem do coagulante aplicada foi de 22,5 mg/l e a faixa ótima de pH se situou entre $6,5 \pm 0,1$. A temperatura da água foi fixada em 26 ± 1 °C.

Os parâmetros relativos à floculação (tempo de floculação e gradiente médio de velocidade) foram obtidos do trabalho desenvolvido por Pioltine e Reali (2011). O tempo de floculação foi de 17,2 min e o gradiente médio de velocidade, 110 s^{-1} .

4.5 A configuração do reator FAD

A UPFAD foi projetada de forma a permitir mudanças em diversos parâmetros e dimensões. Isso possibilitou que, nessa unidade, fossem desenvolvidos estudos sobre a influência de diferentes configurações do reator FAD na eficiência do processo FAD no tratamento de água de abastecimento.

Os estudos realizados foram: na configuração da zona de contato (Reali e Patrizzi, 2007), na entrada da zona de contato (Maia, 2010), na velocidade *cross-flow* (Araújo, 2010), no tamanho de partículas floculadas e na concentração de ar (Pioltine e Reali) e nas configurações das zonas de contato e de separação e na concentração de ar (Escher, 2011).

Diante da versatilidade da UPFAD e com base nos estudos anteriormente realizados, para o presente trabalho o reator foi montado em duas configurações diferentes da zona de contato: A e B.

Nas duas configurações foram mantidas fixas as seguintes condições: i) velocidade de entrada na zona de contato de 180 m/h (Maia, 2010); ii) largura da zona de contato (405 mm); iii) altura do anteparo que separa a zona de contato da zona de separação (2,01m); iv) velocidade *cross-flow* sobre o referido anteparo de 45 m/h (Araújo, 2010) e v) dimensões da zona de separação (825 X 405mm) e taxa de aplicação superficial na zona de separação (TAS_{zs}) em torno de 14,6 m/h (Escher, 2011).

Por sua vez, os seguintes valores de comprimento da zona de contato (L_{zc}) foram adotados em cada uma das duas configurações investigadas:

- i) Configuração A: L_{zc} igual a 0,14 m (t_{zc} em torno de 84 s);
- ii) Configuração B: L_{zc} igual à 0,09 m (t_{zc} em torno de 54 s).

Foram avaliados três valores de razões de recirculação (R): 4,5%; 6% e 8%, para cada situação investigada.

Nas tabelas 4.3 e 4.4, estão as características das zonas de contato e de separação respectivamente.

Tabela 4-3 - Características da zona de contato

Configuração	Comprimento (m)	R (%)	Q _e + R (m³/h)	TAS _{zc} (m/h)	t _{zc} (s)
A	0,09	4,5	4,81	132,00	54,8
		6,0	4,88	133,90	54,1
		8,0	4,97	136,40	53,1
B	0,14	4,5	4,81	84,83	85,3
		6,0	4,88	86,07	84,1
		8,0	4,97	87,65	82,6

Tabela 4-4 - Características da zona de separação

Comprimento (m)	Altura do anteparo (m)	R (%)	Q _e + R (m³/h)	TAS _{zs} (m/h)	t _{zs} (min)
0,825	2,01	4,5	4,81	14,40	8,38
		6,0	4,88	14,61	8,26
		8,0	4,97	14,87	8,12

4.6 Concentração de microbolhas de ar

Para cada configuração estudada da UPFAD, foram investigados três valores da concentração de ar, descritos anteriormente como porcentagens de recirculação (R), dentre os quais se determinou o valor que apresentou melhor desempenho na eficiência do processo FAD.

A partir do parâmetro designado porcentagem de recirculação (R), sabendo-se o valor da pressão de saturação (P) adotado, é possível se obter estimativa da concentração de microbolhas de ar (A/V) com o emprego da equação (1) aplicada em Edzwald (2010):

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

Em que:

$\frac{A}{V}$: concentração de microbolhas de ar na zona de contato após a mistura da vazão de recirculação com a vazão de água floculada (g de ar/ m³ de água);

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

P : pressão relativa (KPa)(igual a 441,3 KPa);

P_{atm} : pressão atmosférica local (KPa) (igual a 96 KPa para a cidade de São Carlos);

K_H : constante de Henry (KPa/mg.l) (igual a 4,531 KPa/mg.l para a $T=25^{\circ}\text{C}$);

R : razão de recirculação.

Na tabela 4.5, está o valor da concentração de microbolhas de ar para cada valor de razão de recirculação estudada.

Tabela 4-5 - Concentração de microbolhas de ar para cada razão de recirculação estudada

R(%)	A/V (g de ar/m ³ de água)
4,5	3,73
6	4,90
8	6,41

4.7 Gradiente médio de velocidade na zona de contato

Foram investigados três valores do gradiente médio de velocidade na zona de contato (G_{zc}), para cada configuração da UPFAD, e para cada valor de razão de recirculação (R) estudados.

O valor do gradiente médio de velocidade (G_{zc}) foi variado através da instalação de módulos contendo telas superpostas com aberturas distintas no interior da zona de contato, conforme será descrito mais adiante.

O valor do gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento da água na zona de contato da UPFAD, sem a inserção de telas em seu interior, foi determinado pela equação (2) proposta por Ritcher (2009):

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \times \frac{TAS_{zc}^{1,5}}{Rh^{0,67}} \times \eta \quad (2)$$

Em que:

γ : peso específico da água (N/m³) (igual a 9777,58 N/m³ para T= 25⁰C);

μ : viscosidade dinâmica (Ns/m²) (igual a 0,000868 Ns/m² para a água de estudo a T = 25⁰C);

TAS_{zc} : taxa de aplicação superficial (m/s) (igual a: 133 $\pm$ 3 m/h na zona de contato da configuração A e 86 $\pm$ 1m/h na mesma zona da configurações B);

Rh : raio hidráulico (m);

η : coeficiente de rugosidade de Manning (igual a 0,01 para o material que contorna a zona de contato – metal liso).

O raio hidráulico Rh é dado pela equação (3):

$$Rh = \frac{A}{P_{molhado}} \quad (3)$$

Em que:

A : área perpendicular ao fluxo (m²) (igual a: 0,03645 m² na zona de contato da configuração A e 0,0567 m² na mesma zona das configurações B e C);

$P_{molhado}$: perímetro molhado da área perpendicular ao fluxo (m) (igual a: 0,99m na zona de contato da configuração A e 1,09m na mesma zona da configuração B).

Na tabela 4.6, estão os valores do gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento da água no interior da zona de contato da UPFAD, para as configurações estudadas.

Tabela 4-6 - Gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento de água na zona de contato da UPFAD (sem inserção de telas em seu interior) para cada configuração estudada

Configuração	R_h (m)	TAS_{zc} (m/h)	G (s ⁻¹)
A	0,037	133 ± 3	1,8
B	0,052	86 ± 1	0,9

Para variar o valor do gradiente médio de velocidade na zona de contato, foram instalados (no interior da zona de contato) módulos contendo telas intercaladas com diferentes medidas de aberturas, que não só aumentam o valor de G_{zc} , como também proporcionam uma distribuição mais uniforme do gradiente de velocidade na massa líquida.

A estimativa do valor do gradiente médio de velocidade em uma tela é função da taxa de aplicação superficial no interior da zona de contato e das características geométricas da tela – espaçamento e diâmetro dos fios da malha.

Richter (1991) propôs a equação (4) para o cálculo dos valores de gradiente médio de velocidade induzidos pela presença das telas.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \times TAS_{zc} \times A \times h}{\mu \times V}} \quad (4)$$

Em que:

G : gradiente médio de velocidade na tela (s⁻¹) ;

γ : peso específica da água (N/m³) (igual a 9777,58 N/m³ para T= 25^oC);

TAS_{zc} : taxa de aplicação superficial (m/s) (igual a: 132,98 ± 2,70 m/h na zona de contato da configuração A e 86,13 ± 1,42 m/h na mesma zona da configuração B);

A : área perpendicular ao fluxo (m²) (igual a: 0,03645 m² na zona de contato da configuração A e 0,0567 m² na mesma zona da configuração B);

h : perda de carga na passagem através da tela (m);

μ : viscosidade dinâmica (Ns/m²) (igual a 0,000868 Ns/m² para a água de estudo a T = 25⁰C);

V : volume de líquido onde é dissipada a energia hidráulica (m³) (é correspondente ao plano da tela por uma distância a jusante do fluxo aproximadamente igual a quatro vezes o espaçamento entre os fios).

A perda de carga (h) é dada pela equação (5):

$$h = K \times \frac{TAS^2}{2 \times g} \quad (5)$$

Em que:

K : coeficiente de perda de carga;

g : aceleração gravitacional (m/s²) (igual a 9,807m/s²).

O coeficiente de perda de carga (K) é dado pela equação (6):

$$K = 0,55 \times \frac{1 - \varepsilon^2}{\varepsilon^2} \quad (6)$$

Em que:

ε : é a porosidade da tela.

A porosidade da tela (ε) é dada pela equação (7):

$$\varepsilon = (1 - n \times d)^2 \quad (7)$$

Em que:

n : é o número de fios de diâmetro (d) por unidade de comprimento de tela.

As especificações técnicas das telas usadas são mostradas na tabela

Tabela 4-7 - Especificações técnicas das telas usadas

Modelo	Dimensões da malha (mm)	Diâmetro dos fios (mm)	Material
Hobby – Casanet	12,5 x 12,5	0,89	Aço galvanizado
Hobby	25 x 25	1,24	Aço galvanizado

A porosidade de cada tela (ε) e o seu coeficiente de perda de carga (K) são apresentados na tabela 4.8.

Tabela 4-8 - Porosidade da tela (ε) e o seu coeficiente de perda de carga (K)

Dimensões da malha (mm)	Diâmetro dos fios (mm)	ε	K
12,5 x 12,5	0,89	0,8627	0,1890
25 x 25	1,24	0,9056	0,1206

A perda de carga (h) da tela para cada configuração é mostrada na tabela 4.9.

Tabela 4-9 - Perda de carga (h) da tela para cada configuração

Configuração	TAS _{zc} (m/h)	K	h (m)
A	133 ± 3	0,1890	1,381E-06
		0,1206	8,813E-06
B	86 ± 1	0,1890	8,782E-06
		0,1206	3,642E-06

O volume de líquido (V), em que a energia hidráulica é dissipada, é correspondente ao plano da tela por uma distância a jusante do fluxo aproximadamente igual a quatro vezes o espaçamento entre os fios. Na tabela 4.10, encontram-se os valores de V.

Tabela 4-10 - Volume de líquido (V) entre as telas

Configuração	A (m ²)	Dimensões da malha (mm)	V (m ³)
A	0,03645	12,5 x 12,5	0,001823
		25 x 25	0,003645
B	0,05670	12,5 x 12,5	0,002835
		25 x 25	0,005670

O gradiente médio de velocidade (G_{ZC}) na zona de contato decorrente da aplicação de telas intercaladas é apresentado na tabela 4.11.

Tabela 4-11 - Gradiente médio de velocidade (G_{ZC}) na zona de contato decorrente da aplicação de telas intercaladas

Configuração	A (m ²)	TAS _{ZC} (m/h)	h (m)	V (m ³)	G (s ⁻¹)
A	0,03645	133 ± 3	1,381E-06	0,001823	8,4
			8,813E-06	0,003645	4,7
B	0,05670	86 ± 1	8,782E-06	0,002835	5,4
			3,642E-06	0,005670	3,8

Os valores do gradiente médio de velocidade (G_{ZC}) na zona de contato decorrentes do escoamento e da aplicação de telas intercaladas são apresentados na tabela 4.12.

Tabela 4-12 - Gradiente médio de velocidade (G_{zc}) na zona de contato decorrente do fluxo hidráulico e da aplicação de telas intercaladas

	Modelo	Dimensões da malha (mm)	Diâmetro dos fios (mm)	Espaçamento entre telas (mm)	G (s^{-1})
A	-	-	-	-	1,8
	Hobby	25x25	1,24	4* 25=100	6,5
	Hobby-Casanet	12,5x12,5	0,89	4*12,5=50	10,2
B	-	-	-	-	0,9
	Hobby	25x25	1,24	4* 25=100	4,7
	Hobby-Casanet	12,5x12,5	0,89	4*12,5=50	6,3

O espaçamento entre as telas foi determinado de acordo com o volume de líquido (V), em que a energia hidráulica é dissipada, o qual correspondente ao plano da tela por uma distância a jusante do fluxo aproximadamente igual a quatro vezes o espaçamento entre os fios.

As figuras 4.9 (a) a (b) mostram as telas intercaladas do modelo Hobby.

Figura 4-9 - As telas intercaladas modelo Hobby. (a) Remoção na zona de contato e (b) Vista geral.

As figuras 4.10 (a) a (d) mostram as telas intercaladas do modelo Hobby - Casanet.

Figura 4-10 - As telas intercaladas modelo Hobby-Casanet. (a) Vista geral, (b) Acomodação na zona de contato, (c) Inseridas na zona de contato e (d) Remoção da zona de contato.

4.8 Programação dos Ensaio

Para cada configuração da UPFAD – TAS_{zc} e t_{zc} - e para cada valor de razão de recirculação (R) estudados, foram investigados três valores do gradiente médio de velocidade na zona de contato (G_{zc}), decorrentes da vazão e da aplicação de telas intercaladas.

A tabela 4.13 apresenta a programação dos ensaios realizados.

Tabela 4-13 - TAS_{zc} , t_{zc} e G_{zc} aplicados nos ensaios em que foi ou não inserido módulo com telas em seu interior

Configuração	TAS_{zc} (m/h)	t_{zc} (s)	R (%)	G_{zc} (s^{-1})	G_{zc} (s^{-1})	G_{zc} (s^{-1})
A	133 ± 3	54 ± 1	4,5	1,8 (sem tela)	6,5 (tela #12,5mm)	10,2 (tela #25mm)
			6			
			8			
B	86 ± 1	84 ± 1	4,5	0,9 (sem tela)	4,7 (tela #12,5mm)	6,3 (tela #25mm)
			6			
			8			

A figura 4.11 é um diagrama esquemático dos ensaios realizados na UPFAD.

Figura 4-11 - Diagrama esquemático dos ensaios realizados na UPFAD

4.9 Monitoramento dos ensaios

Para o monitoramento dos ensaios realizados na UPFAD, foram coletadas amostras de água bruta e água flotada.

Antes de acionar a UPFAD, coletou-se uma amostra de água bruta preparada, na caixa de equalização de pressão dos reservatórios.

Iniciou-se a operação na UPFAD e esperou a sua estabilização.

As amostras de água flotada tiveram seus valores de cor e turbidez medidos. Aquelas que apresentaram valores aproximados desses parâmetros foram utilizadas para comporem uma única amostra, que então representou o período de estabilização da UPFAD.

O procedimento aplicado nesse trabalho foi usado por Reali e Patrizzi (2007), Maia (2010), Araújo (2010), Pioltine e Reali (2011) e Escher (2011) em pesquisas desenvolvidas na mesma unidade piloto de flotação por ar dissolvido.

Na tabela 4.14, observam-se os parâmetros analisados para caracterização das amostras de água bruta preparada, água floculada e água flotada.

Tabela 4-14 - Monitoramento dos ensaios

Parâmetro	Unidade	Água bruta preparada	Água floculada	Água flotada
Temperatura	°C	X		
pH	-	X		
Cor Aparente	UH	X		X
Turbidez	UT	X		X
Alcalinidade	mg/l CaCO ₃	X		
Condutividade	µS/cm	X		

As análises propostas foram desenvolvidas no LATAR/SHS/EESC/USP, seguindo os procedimentos descritos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Influência do gradiente médio de velocidade (G_{zc}) associado ao tempo de detenção hidráulico (t_{zc}) e à taxa de aplicação superficial (TAS_{zc}) na zona de contato da unidade FAD

5.1.1 Considerações Iniciais

Os ensaios foram realizados em duplicata. A seguir, a primeira carreira (grupo) de ensaios será designada de ensaios I, e a segunda carreira, de ensaios II (repetição das condições da carreira dos ensaios I).

Os resultados foram relacionados linearmente através do coeficiente de correlação de Pearson (r) dado pela equação (8).

$$r = \frac{\text{cov}(\text{ensaioI}, \text{ensaioII})}{S(\text{ensaioI}) \times S(\text{ensaioII})} \quad (8)$$

Em que:

$\text{cov}(\text{ensaioI}, \text{ensaioII})$: covariância dos resultados dos ensaios I e II;

$S(\text{ensaioI})$: desvio-padrão dos resultados dos ensaios I;

$S(\text{ensaioII})$: desvio-padrão dos resultados dos ensaios II.

O valor do coeficiente de correlação de Pearson (r) para todos os resultados obtidos foi de 0,9, em termos de eficiência de remoção dos parâmetros analisados. O valor de r encontrado revela que existe uma forte correlação entre os ensaios I e II.

A figura 5.1 mostra graficamente a relação linear entre os resultados obtidos nos ensaios I e II.

Figura 5-1 - Relação linear entre os ensaios I e II

5.1.2 Resultados obtidos com a configuração A ($TAS_{zc} = 133 \pm 3$ m/h e $t_{zc} = 54 \pm 1$ s), G_{zc} de 1,8; 6,5 e $10,2 \text{ s}^{-1}$ e A/V de 3,73; 4,90 e $6,31 \text{ g/m}^3$

Na tabela 5.1, estão as leituras de turbidez das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração A ($TAS_{zc} = 133 \pm 3$ m/h e $t_{zc} = 54 \pm 1$ s).

Tabela 5-1 - Resultados de turbidez para a configuração A ($TAS_{zc} = 133 \pm 3$ m/h e $t_{zc} = 54 \pm 1$ s), G_{zc} de 1,8; 6,5 e $10,2 \text{ s}^{-1}$ e A/V de 3,73; 4,90 e 6,31 g/m^3

t_{zc} (s)	TAS_{zc} (m/h)	Especificações técnicas das telas		G_{zc} (s^{-1})	A/V (g/m^3)	Carreira de Ensaio	Turbidez	
		Dimensões da malha (mm)	Diâmetro dos fios (mm)				Residual (UT)	Fração removida
54	133	-	-	1,8	6,41	I	1,7	0,74
54	133	-	-	1,8	4,90	I	1,2	0,83
54	133	-	-	1,8	3,73	I	1,3	0,81
54	133	25x25	1,24	6,5	6,41	I	2,4	0,64
54	133	25x25	1,24	6,5	4,90	I	0,9	0,86
54	133	25x25	1,24	6,5	3,73	I	1,2	0,82
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	6,41	I	2,5	0,68
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	4,90	I	1,1	0,86
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	3,73	I	1,4	0,82
54	133	-	-	1,8	6,41	II	1,8	0,76
54	133	-	-	1,8	4,90	II	1,3	0,82
54	133	-	-	1,8	3,73	II	1,5	0,80
54	133	25x25	1,24	6,5	6,41	II	1,9	0,79
54	133	25x25	1,24	6,5	4,90	II	0,99	0,89
54	133	25x25	1,24	6,5	3,73	II	1,3	0,86
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	6,41	II	2	0,73
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	4,90	II	1,1	0,85
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	3,73	II	1,4	0,82

A figura 5.1 é o gráfico da fração removida de turbidez *versus* A/V para os valores de G_{zc} estudados na configuração A nas carreiras de ensaios I e II com a instalação piloto.

Figura 5-2 – Fração removida de turbidez versus A/V para os valores de G_{zc} estudados, na configuração A, nos ensaios I e II

Na figura 5.2, nota-se que o valor da fração removida de turbidez aumentou ligeiramente em cada G_{zc} (1,8; 6,5; 10,2 s⁻¹) quando A/V passou de 3,73 g/m³ para 4,90 g/m³, e que houve decréscimo, nessa fração, quando A/V subiu de 4,90 g/m³ para 6,41 g/m³ em cada G_{zc} . Esse comportamento revela que, na configuração A, a fração removida de turbidez em cada G_{zc} foi pouco susceptível a variações de A/V, principalmente para A/V entre 3,73 g/m³ e 4,90 g/m³, e que o valor de A/V ótimo se encontra entre 3,73 g/m³ e 6,41 g/m³ (em torno de 4,9 g/m³, quando se obteve residuais de turbidez na faixa de 0,90 a 0,99 UT).

A figura 5.3 apresenta os resultados da fração removida de turbidez versus G_{zc} para os valores de A/V estudados na configuração A nos ensaios I e II.

Figura 5-3 – Fração removida de turbidez *versus* G_{zc} para os valores de A/V estudados, na configuração A, nos ensaios I e II

Na figura 5.3, observa-se que o módulo de telas que gerou G_{zc} de 6,5 s⁻¹ apresentou resultados mais eficientes para cada A/V testado (3,73; 4,90; 6,41 g/m³), exceto na carreira de ensaios I quando foi aplicado A/V de 6,41 g/m³.

Na figura 5.4, vê-se que, para A/V de 4,90 g/m³, os resultados foram melhores para todos os valores de G_{zc} estudados (1,8; 6,5; 10,2 s⁻¹), enquanto que, para A/V de 6,41 g/m³, ocorreram os piores resultados para cada G_{zc}.

Isso provavelmente aconteceu pela distribuição do tamanho das bolhas que variou para cada condição estudada (concentração de microbolhas e inserção de tela). A distribuição do tamanho das bolhas depende do fato das bolhas, especialmente após a sua formação, colidirem e crescerem em um processo chamado coalescência ou aglutinação.

O tamanho das bolhas é uma propriedade importante no desempenho da FAD, pois se relaciona tanto ao sucesso das colisões entre flocos e bolhas quanto à sua velocidade ascensional (EDZWALD, 2010).

O ar (distribuição do tamanho das microbolhas e a concentração de microbolhas de ar) provavelmente influenciou no gradiente médio de velocidade na zona de contato. Entretanto, o estudo dessa influência envolve muitos fatores, tais como o princípio da incerteza de Heisenberg e física

quântica. O modelo mais famoso para estudar essa influência se chama *Openfoam*.

Na tabela 5.2, estão as leituras de cor aparente das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração A ($TAS_{zc} = 133 \pm 3$ m/h e $t_{zc} = 54 \pm 1$ s).

Tabela 5-2 - Resultados de cor aparente para a configuração A ($TAS_{zc} = 133 \pm 3$ m/h e $t_{zc} = 54 \pm 1$ s), G_{zc} de 1,8; 6,5 e 10,2 s^{-1} e A/V de 3,73; 4,90 e 6,31 g/m^3

t_{zc} (s)	TAS_{zc} (m/h)	Especificações técnicas das telas		G_{zc} (s^{-1})	A/V (g/m^3)	Carreira de Ensaio	Cor aparente	
		Dimensões da malha (mm)	Diâmetro dos fios (mm)				Residual (UH)	Fração removida
54	133	-	-	1,8	6,41	I	3,4	0,89
54	133	-	-	1,8	4,90	I	2,2	0,93
54	133	-	-	1,8	3,73	I	2,8	0,91
54	133	25x25	1,24	6,5	6,41	I	3,4	0,91
54	133	25x25	1,24	6,5	4,90	I	1,2	0,97
54	133	25x25	1,24	6,5	3,73	I	2,2	0,94
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	6,41	I	4,8	0,89
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	4,90	I	2,2	0,95
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	3,73	I	2,8	0,94
54	133	-	-	1,8	6,41	II	4,1	0,88
54	133	-	-	1,8	4,90	II	2,8	0,92
54	133	-	-	1,8	3,73	II	3,4	0,90
54	133	25x25	1,24	6,5	6,41	II	2,8	0,92
54	133	25x25	1,24	6,5	4,90	II	1,2	0,97
54	133	25x25	1,24	6,5	3,73	II	2,2	0,94
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	6,41	II	2,8	0,91
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	4,90	II	1,7	0,95
54	133	12,5x12,5	0,89	10,2	3,73	II	2,2	0,93

A figura 5.4 é o gráfico fração removida de cor aparente *versus* A/V para os valores de G_{zc} estudados, na configuração A, nos ensaios I e II.

Figura 5-4 - Fração removida de cor aparente *versus* A/V para os valores de G_{zc} estudados, na configuração A, nos ensaios I e II

A figura 5.4 mostra que o comportamento da fração removida de cor aparente *versus* A/V é semelhante ao da turbidez. A remoção de cor aparente foi pouco susceptível a variações de A/V em cada G_{zc}. O valor de A/V ótimo se situa entre 3,73 g/m³ e 6,41 g/m³ (em torno de 4,9 g/m³ quando se obteve residuais de cor aparente na faixa de 1,0 a 2,0 UH).

A figura 5.5 é o gráfico da fração removida de cor aparente *versus* G_{zc} para os valores de A/V estudados (3,73; 4,90; 6,41 g/m³), na configuração A, nos ensaios I e II.

Figura 5-5 – Fração removida de cor aparente *versus* G_{zc} para os valores de A/V estudados, na configuração A, nos ensaios I e II

Na figura 5.5, verifica-se que a tela que apresentou G_{zc} de 6,5 s⁻¹ gerou melhores resultados de remoção de cor aparente em ambos os ensaios para cada A/V analisado. Isso indica que o melhor valor de G_{zc} está entre 1,8 e 10,2 s⁻¹ para a configuração A (em torno de 6,5 s⁻¹).

É importante destacar que, no conjunto de ensaios na configuração A (TAS_{zc} = 133 m.h⁻¹ e t_{zc} = 54s), para todos os valores de A/V aplicados, verificaram-se diferentes frações removidas de cor e turbidez com a variação do valor do G_{zc}, indicando que: i) o valor de TAS_{zc}, por si só não foi capaz de caracterizar as condições mais adequadas de agitação (promotora de contato entre microbolhas e flocos) no interior da zona de contato, sendo talvez mais apropriado para isso a adoção do parâmetro G_{zc} associado ao t_{zc}; ii) o valor de G_{zc} mais indicado para os ensaios com a configuração A, com aplicação de A/V de 4,9 g/m³ (valor ótimo obtido nessa carreira de ensaios), ficou em torno de 6,5 s⁻¹.

5.1.3 Resultados obtidos com a configuração B ($TAS_{zc}=86 \pm 1\text{m/h}$ e $t_{zc}= 84\pm 1\text{s}$), G_{zc} de 0,9; 4,7 e 6,3 s^{-1} e A/V de 3,73; 4,90 e 6,31 g/m^3

A tabela 5.3 apresenta as leituras de turbidez das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração B ($TAS_{zc} = 86 \pm 1 \text{ m/h}$ e $t_{zc} = 84 \pm 1\text{s}$).

Tabela 5-3 - Resultados de turbidez para a configuração B ($TAS_{zc} = 86 \pm 1 \text{ m/h}$ e $t_{zc} = 84 \pm 1\text{s}$), G_{zc} de 0,9; 4,7 e 6,3 s^{-1} e A/V de 3,73; 4,90 e 6,31 g/m^3

t_{zc} (s)	TAS_{zc} (m/h)	Especificações técnicas das telas		G_{zc} (s^{-1})	A/V (g/m^3)	Carreira de Ensaio	Turbidez	
		Dimensões da malha (mm)	Diâmetro dos fios (mm)				Residual (UT)	Fração removida
84	86	-	-	0,9	6,41	I	4,80	0,29
84	86	-	-	0,9	4,90	I	1,20	0,82
84	86	-	-	0,9	3,73	I	4,60	0,32
84	86	25x25	1,24	4,7	6,41	I	2,20	0,71
84	86	25x25	1,24	4,7	4,90	I	0,90	0,88
84	86	25x25	1,24	4,7	3,73	I	1,20	0,85
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	6,41	I	3,80	0,48
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	4,90	I	2,26	0,69
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	3,73	I	1,41	0,81
84	86	-	-	0,9	6,41	II	4,60	0,36
84	86	-	-	0,9	4,90	II	1,30	0,82
84	86	-	-	0,9	3,73	II	2,10	0,70
84	86	25x25	1,24	4,7	6,41	II	2,60	0,65
84	86	25x25	1,24	4,7	4,90	II	0,96	0,87
84	86	25x25	1,24	4,7	3,73	II	1,30	0,83
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	6,41	II	4,07	0,50
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	4,90	II	2,65	0,67
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	3,73	II	1,71	0,79
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	3,73	III	1,51	0,80

A figura 5.6 é o gráfico de fração removida de turbidez versus A/V para os valores de G_{zc} estudados (0,9; 4,7; 6,3 s^{-1}), na configuração B, nos ensaios I e II.

Figura 5-6 – Fração removida de turbidez versus A/V para os valores de G_{zc} estudados, na configuração B, nos ensaios I e II

Na figura 5.6, nota-se que os resultados da fração removida de turbidez para G_{zc} de 0,9 s⁻¹ e A/V de 4,90 g/m³ (0,82 e 0,81) foram próximos aos encontrados no ensaio com G_{zc} de 4,7 s⁻¹ e A/V de 4,90 g/m³ (0,88 e 0,88), sendo essa última condição a que forneceu os melhores resultados de fração removida de turbidez. Entretanto a aplicação desse valor mais baixo de G_{zc} (0,9 s⁻¹) demonstrou não ser adequada, pois apresenta maior sensibilidade a variações de A/V comparado aos outros valores aplicados de G_{zc} . Isso significa que a fração removida de turbidez pode ser afetada de forma significativa, caso a quantidade de ar inserida varie não-intencionalmente durante a operação desse tipo de unidade alimentada com esse tipo de água bruta. Essa sensibilidade à variação de A/V apresentou comportamento não-linear, ou seja, valores de A/V inferiores ou superiores a 4,90g/m³ resultaram na queda da eficiência de remoção de turbidez.

Na figura 5.6, verifica-se que, para G_{zc} de 4,7 s⁻¹ a fração removida de turbidez foi menos sensível a variações de A/V do que para os demais G_{zc} .

A figura 5.7 mostra o gráfico de fração removida de turbidez versus G_{zc} para os valores de A/V estudados na configuração B nos ensaios I e II.

Figura 5-7 – Fração removida de turbidez versus G_{zc} para os valores de A/V estudados, na configuração B, nos ensaios I e II

Na figura 5.7, constata-se que a fração removida de turbidez para cada A/V investigado (3,73; 4,90; 6,41 g/m³) foi melhor na tela que gerou G_{zc} de 4,7 s⁻¹. Essa mesma tela também produziu G_{zc} que forneceu resultados mais eficientes de fração removida de turbidez e de cor para a configuração A. O valor de G_{zc} ótimo se encontra entre 0,9 e 6,3 s⁻¹ (provavelmente próximo de 4,7 s⁻¹, quando se obteve o maior valor de fração removida de turbidez, em torno de 0,88).

Na figura 5.7, observa-se que, para G_{zc} de 0,9 s⁻¹ e 4,7 s⁻¹, os resultados foram melhores para A/V de 4,90 g/m³.

Enquanto que, para G_{zc} de 6,31 s⁻¹, o melhor resultado ocorreu para A/V de 3,73 g/m³. Isso provavelmente aconteceu porque, para G_{zc} de 6,31 s⁻¹, na configuração B, há mais aglutinação de microbolhas de ar que para os demais G_{zc} estudados. Para A/V de 3,73 g/m³, que representa o menor valor de A/V analisado, ocorre menos aglutinação de microbolhas de ar, para G_{zc} de 6,31 s⁻¹, devido a menor quantidade de ar inserido no sistema.

Em todos os G_{zc} estudados, os piores resultados aconteceram em A/V de 6,41 g/m³.

Na flotação por ar dissolvido, quanto menor o tamanho médio das microbolhas de ar geradas no interior do flotador, mais eficiente será o processo, pois maior será a probabilidade de colisão entre as bolhas e os flocos em suspensão e maior também a chance de se ter uma ligação mais estável entre as microbolhas e os flocos, pois bolhas maiores se desprendem mais facilmente da superfície dos flocos, após a colisão, devido às suas maiores velocidades ascensionais, que são diretamente proporcionais ao quadrado do diâmetro das microbolhas.

Na tabela 5.4, estão os valores de cor aparente das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração B ($TAS_{zc}=86 \pm 1$ m/h e $t_{zc}=84 \pm 1$ s).

Tabela 5-4 - Resultados de cor aparente para a configuração B
($TAS_{zc} = 86 \pm 1$ m/h e $t_{zc} = 84 \pm 1$ s), G_{zc} de 0,9; 4,73 e 6,31 s^{-1} e A/V de 3,73; 4,90 e 6,31 g/m^3

t_{zc} (s)	TAS_{zc} (m/h)	Especificações técnicas das telas		G_{zc} (s^{-1})	A/V (g/m^3)	Carreira de Ensaio	Cor	
		Dimensões da malha (mm)	Diâmetro dos fios (mm)				Residual (UH)	Fração removida
84	86	-	-	0,9	6,41	I	15,7	0,60
84	86	-	-	0,9	4,90	I	2,2	0,94
84	86	-	-	0,9	3,73	I	17,0	0,57
84	86	25x25	1,24	4,7	6,41	I	5,6	0,86
84	86	25x25	1,24	4,7	4,90	I	2,2	0,94
84	86	25x25	1,24	4,7	3,73	I	3,4	0,91
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	6,41	I	9,1	0,77
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	4,90	I	6,4	0,84
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	3,73	I	3,4	0,91
84	86	-	-	0,9	6,41	II	17,0	0,57
84	86	-	-	0,9	4,90	II	3,4	0,91
84	86	-	-	0,9	3,73	II	5,6	0,86
84	86	25x25	1,24	4,7	6,41	II	4,8	0,88
84	86	25x25	1,24	4,7	4,90	II	2,2	0,94
84	86	25x25	1,24	4,7	3,73	II	2,2	0,94
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	6,41	II	12,2	0,69
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	4,90	II	9,1	0,77
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	3,73	II	4,1	0,90
84	86	12,5x12,5	0,89	6,3	3,73	III	3,4	0,91

Na figura 5.8, está o gráfico de fração removida de cor aparente *versus* A/V para os valores de G_{zc} estudados na configuração B nos ensaios I e II.

Figura 5-8 – Fração removida de cor aparente *versus* A/V para os valores de G_{zc} estudados, na configuração B, nos ensaios I e II

A figura 5.8 indica que o comportamento da fração removida de cor aparente *versus* A/V é semelhante ao apresentado na remoção de turbidez.

A figura 5.9 mostra o gráfico de fração removida de cor aparente *versus* G_{zc} para os valores de A/V estudados na configuração B nos ensaios I e II.

Figura 5-9 – Fração removida de cor aparente *versus* G_{zc} para os valores de A/V estudados, na configuração B, nos ensaios I e II

A figura 5.9 revela que o comportamento da fração removida de cor aparente *versus* G_{zc} foi similar ao exibido na remoção turbidez.

É importante destacar que o conjunto de ensaios na configuração B, em que o valor de TAS_{zc} se manteve fixo em 86 m.h⁻¹ (e t_{zc} de 84s), para todos os valores de A/V aplicados, verificaram-se diferentes valores de frações removidas de cor e de turbidez com a variação do valor do G_{zc}, indicando que: i) o valor de TAS_{zc}, por si só não foi capaz de caracterizar as condições mais adequadas de agitação (promotora de contato entre microbolhas e flocos) no interior da zona de contato, sendo talvez mais apropriado para isso a adoção do parâmetro G_{zc} associado ao t_{zc}; ii) o valor de G_{zc} mais indicado para os ensaios com a configuração B (t_{zc} de 84s), com aplicação de A/V de 4,9 g/m³ (valor ótimo obtido nessa carreira de ensaios), ficou em torno de 4,7s⁻¹.

Finalmente, considerando os resultados dos ensaios com aplicação de 4,9 g de ar/m³ de água, nos quais foram obtidos os melhores desempenhos da unidade FAD nas duas configurações investigadas, foi construída a tabela 5.5. Nessa tabela, é indicada também a média dos valores de remoção de cor e

turbidez considerando as repetições de cada ensaio (carreiras de ensaios I e II). Na tabela também são destacados (em letra marrom) qual o módulo de telas forneceu os melhores resultados de remoção de cor e turbidez para cada configuração investigada.

Tabela 5-5 - Resultados de turbidez e cor obtidos nos ensaios com as configurações A ($TAS_{zc} = 133$ m/h e $t_{zc} = 54$ s) e B ($TAS_{zc} = 86$ m/h e $t_{zc} = 84$ s), com A/V de $4,9$ g/m³ (valor ótimo) e diferentes valores de G_{zc} .

A/V (g/m³)	Tipo de tela	Gzc (s ⁻¹)	Carreira de ensaio	Turbidez		COR	
				Residual (UT)	Fração removida	Residual (UH)	Fração removida
Configuração A (TAS:133 m/h e t _{zc} de 54 s)							
4,9	Sem tela	1,7	I	1,20	0,83	2,20	0,93
4,9	Sem tela	1,7	II	1,30	0,82	2,80	0,92
Média dos ensaios das carreiras I e II:				1,25	0,825	2,5	0,925
4,9	Tela #12,5mm	6,5	I	0,90	0,86	1,20	0,97
4,9	Tela #12,5mm	6,5	II	0,99	0,89	1,20	0,97
Média dos ensaios das carreiras I e II:				0,945	0,875	1,20	0,97
4,9	Tela # 25 mm	10,1	I	1,10	0,86	2,20	0,95
4,9	Tela # 25mm	10,1	II	1,10	0,85	1,70	0,95
Média dos ensaios das carreiras I e II:				1,10	0,855	1,95	0,95
Configuração B (TAS:86 m/h e t _{zc} de 84 s)							
4,9	Sem tela	0,9	I	1,20	0,82	2,20	0,94
4,9	Sem tela	0,9	II	1,30	0,82	3,40	0,91
Média dos ensaios das carreiras I e II:				1,25	0,82	2,80	0,925
4,9	Tela #12,5mm	4,7	I	0,90	0,88	2,20	0,94
4,9	Tela #12,5mm	4,7	II	0,96	0,87	2,20	0,94
Média dos ensaios das carreiras I e II:				0,930	0,875	2,20	0,94
4,9	Tela # 25 mm	6,3	I	2,26	0,69	6,40	0,84
4,9	Tela # 25mm	6,3	II	2,65	0,67	9,10	0,77
Média dos ensaios das carreiras I e II:				2,45	0,68	8,20	0,805

Verifica-se que o módulo com tela #12,5mm (fios com 0,89mm de diâmetro) forneceu os melhores resultados nas duas configurações estudadas. Sendo que tal tela proporcionou G_{zc} de $6,5s^{-1}$ na condição A (t_{zc} de 54s) e G_{zc} de $4,7 s^{-1}$ na condição B (t_{zc} de 84s). É importante observar que quando foi aplicado um valor de G_{zc} próximo a $6,5 s^{-1}$ (melhor resultado na configuração A com t_{zc} de 54s) na configuração B (mais precisamente $6,3s^{-1}$), houve expressiva queda no valor da fração removida de turbidez (com o residual médio subindo de 0,93UT para 2,45 UT) e de cor (com o residual médio subindo de 2,2UH para 8,2UH). Isso demonstra que o valor de G_{zc} na faixa de 6,3 a $6,5s^{-1}$, mostrou ser adequado para um valor de t_{zc} de 54s (na configuração A) e excessivo quando o valor de t_{zc} subiu para 84s na configuração B.

Multiplicando-se os valores de t_{zc} e G_{zc} em cada situação, resultam os seguintes valores para o adimensional "Gt" : i) próximo a 350 na melhor situação da configuração A; e, ii) próximo a 400 na melhor situação da configuração B.

Assim, uma sugestão interessante para o projeto desse tipo de unidade FAD retangular é a adoção de valores de t_{zc} menores (ou em torno) de 60s, associados a valores de G_{zc} próximo a $6,3s^{-1}$, resultando em valor do adimensional "Gt" em torno de 350. Caso as condições de projeto conduzam forçosamente à adoção de valores de t_{zc} maiores que 60s, é recomendável que sejam adotadas condições que conduzam a valores de "Gt" não maiores, ou em torno de 350.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa e para as condições em que os ensaios foram realizados, conclui-se que:

- A fração removida dos parâmetros analisados para cada G_{zc} é menos sensível a variações de A/V na configuração A ($TAS_{zc} = 133 \pm 3$ m/h e $t_{zc} = 54 \pm 1$ s) que na configuração B ($TAS_{zc} = 86 \pm 1$ m/h e $t_{zc} = 84 \pm 1$ s). Logo a configuração A, com menor tempo de detenção hidráulico na zona de contato (54s), estará menos susceptível a variações não-intencionais na quantidade de ar inserida no sistema que a configuração B.
- Na configuração A, a tela que apresentou G_{zc} em torno de $6,5 \text{ s}^{-1}$ gerou melhores resultados para cada A/V analisado. Na configuração B, a tela que gerou G_{zc} em torno de $4,7 \text{ s}^{-1}$ proporcionou melhor eficiência de remoção de turbidez e cor para cada A/V estudado. Além disso, a eficiência de remoção de turbidez e cor foi menos sensível a variações de A/V, na configuração B, para G_{zc} de $4,7 \text{ s}^{-1}$ que para os demais valores de G_{zc} . A tela que gerou resultados mais eficientes na configuração A foi a mesma para a configuração B. Portanto o uso da referida tela favoreceu o desempenho das configurações A e B.
- Na configuração B, os resultados de eficiência de remoção de turbidez, em G_{zc} de $0,9 \text{ s}^{-1}$, em A/V de $4,90 \text{ g/m}^3$, (0,82 e 0,81) foram próximos aos encontrados, em G_{zc} de $4,73 \text{ s}^{-1}$, em A/V de $4,90 \text{ g/m}^3$, (0,88 e 0,88) - resultados mais eficientes. Entretanto, nas condições do presente estudo, a escolha desses parâmetros não foi vantajosa, pois resultou em maior sensibilidade a variações de A/V. Isso significa que a eficiência de remoção de turbidez e cor poderia ser afetada de forma significativa, em uma situação eventual em que ocorresse variação não controlada na quantidade de ar (A/V). Essa sensibilidade à variação de A/V apresentou comportamento não-linear, ou seja, valores de A/V inferiores ou superiores a $4,90 \text{ g/m}^3$ acarretariam na queda da eficiência de remoção de turbidez e cor.
- Comparando todas as situações estudadas nas duas configurações, o ensaio com a configuração A (com t_{zc} de 54s) com G_{zc} de $6,3 \text{ s}^{-1}$ e A/V de

4,9 g/m³, apresentou as maiores eficiências de remoção de cor e turbidez.

É recomendável para o projeto desse tipo de unidade FAD retangular alimentada com o mesmo tipo de água bruta e nas mesmas condições adotadas nesta pesquisa:

- A adoção de valores de t_{zc} em torno de 54s, associados a valores de G_{zc} próximo a $6,3s^{-1}$, resultando em valor do adimensional "Gt" em torno de 350. Caso as condições de projeto conduzam forçosamente à adoção de valores de t_{zc} maiores que 60s, é recomendável que sejam adotadas condições que conduzam a valores de "Gt" não maiores que 350.
- Avaliar a influência da taxa de aplicação superficial na zona de contato para um mesmo valor de tempo de detenção hidráulica na zona de contato e vice-versa, a fim de se determinar a influência desses parâmetros nessa zona separadamente.
- Estudar a influência do ar no gradiente médio de velocidade na zona de contato.
- Com base nos resultados e experiência adquirida durante a realização da presente pesquisa, recomenda-se a realização de ensaios com características diferentes quanto à composição da água de estudo, para confirmar se os resultados obtidos na presente pesquisa são aplicáveis a águas de diferentes teores de cor e turbidez.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, CLÁUDIO JÚNIOR. (2010). 113f. **Influência da velocidade cross – flow na câmara de flotação na eficiência de unidades de flotação por ar dissolvido tratando água para abastecimento.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BENNOIT, H.; SCHUSTER, C. (2007). Advanced DAF – Technology for separating and thickening of activated sludge. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings...** Seoul, South Korea: Seoul National University, 2007.

BRASIL. Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981. Dispões sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Direito Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, 02 set. 1981.

BRASIL. (2004). Ministério da Saúde. Portaria nº 518 de 25 de março de 2004. Procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.

CALIJURI, Maria do Carmo. (2010). **Sustentabilidade; um desafio na estão dos recursos hídricos/ Maria do Carmo Calijuri, Davi Gasparini Fernandes Cunha, Jurandyr Povinelli.** São Carlos: EESC-USP, 2010.

COELHO, E. R. C.; REALI, M. A. P.; CAMPOS, J. R. (1991). Emprego da flotação por ar dissolvido na clarificação de águas para abastecimento: Influência da taxa de aplicação superficial. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental-ABES, 1991, Goiânia-GO. **Anais...** Goiânia, GO: ABES, 1991. v.2, p.215-231.

DE RIJK *et al.* (1994). Bubble size in flotation thickening. **Water Research**, Great Britain, v.28, n.2, p.465-473, 1994.

DOMBROSKI, S. A. G.; REALI, M. A. P.; MARCHETTO, M. (1996). Método eficiente para o tratamento de água com cor elevada e baixa turbidez. In: III Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1996, Gramado-RS. **Anais...** Gramado-RS: ABES, 1996. v-1, disco.

EDZWALD, J. K. (2007a). Developments of high rate dissolved air flotation for drinking water treatment. **Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua** 56 (6-7), 399 – 409, 2007.

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

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

HAN, M. *et al.* (2002). Effect of pressure on bubble size in dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, Great Britain, v.2, n. 5-6, p. 41-46, 2002.

HAN, M. *et al.* (2007). Flocculation options in DAF. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings...** Seoul, South Korea: Seoul National University, 2007.

HAN, M. Y. *et al.* (2004). The effect of divalent metal ions on the zeta potential of bubbles. **Water Science and Technology**, v.50, n.4, p.49-56, 2004.

HAARHOFF, J. (2008). Dissolved air flotation: progress and prospects for drinking water treatment. **Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua** 57 (8), 555-567, 2008.

HENDERSON, R. K., PARSONS, S. A., JEFFERSON, B. (2008). Surfactants as bubble surface modifiers in the flotation of algae: dissolved air flotation that utilizes a chemically modified bubble surface. **Environmental Science and Technology** 42 (13), 4883-4888.

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

LEE, B. H. *et al.* (2007). Limiting size of a particle or a floc for flotation in the DAF (Dissolved Air Flotation) Process. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings...** Seoul, South Korea: Seoul National University, 2007.

LEE, C. H. *et al.* (2007). Full scale operation of dissolved air flotation process using microbubble generating pump. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings...** Seoul, South Korea: Seoul National University, 2007.

LOBATO, S. J. M.; REALI, M. A. P.; FAITANIN, L. (1995). O sucesso da flotação por ar dissolvido no pré-tratamento de água bruta da ETA-Meaípe-ES. In: XVIII Congresso ABES, 1995, Salvador. **Anais...** Salvador-BA: ABES, 1995. v.1, disco.

LUNDH, M.; JONSSON, L.; DAHLQUIST, J. (2000). Experimental studies of the fluid dynamics in the separation zone in dissolved air flotation. **Water Research**, v. 34, n. 1, p. 21-30, 2000.

LUNDH, M.; JONSSON, L.; DAHLQUIST, J., 2001. 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., 2002. The influence of contact zone configuration on the flow structure in a dissolved air flotation pilot. **Water Science and Technology**. v.36, p.1585-1595, 2002.

MAIA, KISNER ANDERSON. (2010). 119f. **Influência da velocidade de entrada na zona de contato na eficiência de clarificação de unidades retangulares de flotação por ar dissolvido aplicada no tratamento de água para abastecimento**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

MARCHETTO, M.; REALI, M. A. P. (1997a). Concepção moderna de unidades de flotação aplicadas ao tratamento de água. In: Simposio Internazionale di Ingegneria Sanitaria Ambientale, 1997, Ravello. **Anais...** Ravello, Italia: SIDISA, 1997. v.2, p. 758-765.

MARCHETTO, M.; REALI, M. A. P. (1997b). Influência do ângulo de inclinação das placas no desempenho de uma unidade original de flotação de alta taxa. In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu-PR: ABES, 1997. v.1, disco.

MARCHIORETTO, M.; REALI, M. A. P. (1997). Estudo das condições ótimas de coagulação/floculação com sulfato de alumínio visando a flotação de água para abastecimento com turbidez elevada e cor moderada. In: 49^a Reunião

Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência-SBPC. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte-MG: SBPC, 1997. v.1, disco.

METCALF & EDDY. (2003). **Wasterwater Engineering: Treatment and Reuse. 4^a ed. International Edition.** Revisada por TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. New York: McGraw – Hill, 819 p. (MacGraw – Hill series in civil and environmental engineering).

MORUZZI, R. B.; PATRIZZI, L. J.; REALI, M. A. P. (2001). Remoção de Ferro e Manganês complexados com ácido húmico presentes em águas para abastecimento utilizando a flotação. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa-PB: ABES, 2001. v.1, p.01-10.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. (2007). Characterization of micro-bubbles sizes distribution in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, 2007, Seoul. **Proceedings...** Seoul, South Korea: Seoul National University, 2007.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. (2010). Characterization of micro-bubbles sizes distribution in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests. **Water Science and Technology**, v.61, n.1, p. 253-262, 2010.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. (2008). Software for Hydrodynamic Study in DAF Systems. In: 7^a Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, 2008, Presidente Prudente. **Proceedings...** Presidente Prudente-SP, 2008

PATRIZZI, L.J. (2002). 220f. **Remoção de ferro, manganês e substâncias húmicas de água para abastecimento, com uso de flotação por ar dissolvido de alta taxa e oxidação química.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PATRIZZI, L. J.; REALI M. A. P.; CORDEIRO, J. S. (1999). Redução de volume de lodo gerado em decantadores de ETAs utilizando espessamento por flotação e por gravidade. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro-RJ: ABES, 1999.

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

Proceedings... Amsterdam, Netherlands: International Water Association – IWA, 2011. 5842R1.

REALI, M. A. P. (1984). 186f. **Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento.** Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

REALI, M. A. P. (1991). 373f. **Concepção e Avaliação de um Sistema Compacto para Tratamento de Águas de Abastecimento Utilizando o Processo de Flotação por Ar Dissolvido e Filtração com Taxa Declinante.** Tese (Doutorado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. 2 v.

REALI, M. A. P.; CAMPOS, J. R. (1995). Optimization of colour removal using a batch flotation test. In: World Wide Symposium: Pollution in Large Cities- Science and Technology for Planning Environmental Quality, 1995, Pádua. **Proceedings...** Venice-Pádua, Itália: ABES/ANDES, 1995. v.1,p.199-210.

REALI, M. A. P.; CAMPOS, J. R. (1993). Proposição e avaliação de um sistema compacto para tratamento de água utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante. In: XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental-ABES 93, 1993, Natal-RN. **Anais...** Natal-RN: Editora da ABES, 1993. v.2, p.243-264.

REALI, M. A. P.; DOMBROSKI, S. A. G. (1996). Influência da floculação na flotação por ar dissolvido. In: XXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitaria y Ambiental, 1996, Cidade do México. **Anais...**Cidade do México, México: AIDIS, 1996. v.1, disco.

REALI, M. A. P.; GIANOTTI, E. P. (1993). Remoção de algas por flotação: Testes de laboratório. In: XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental-ABES 93, 1993, Natal-RN. **Anais...** Natal-RN: Editora da ABES, 1993. v.2, p.229-242.

REALI, M. A. P.; MARCHETTO, M. (2000). High rate DAF unit applied for water treatment. In: The 4th International Conference: Flotation in Water and Wastewater Treatment, 2000, Helsinki. **Proceedings...** Helsinki: International Water Association – IWA, 2000. v.1, p.1-9.

REALI, M. A. P.; MORUZZI, R. B.; PATRIZZI, L. J. (2007). Comparing Sedimentation and Dissolved Air Flotation (DAF) for Organic Iron Compounds Removal Focusing Coagulation/Flocculation Processes. **Revista Minerva**, São

Carlos, 2007. v.4, n.1. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2004\(01\)%2002.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2004(01)%2002.pdf)>. Acesso em: 24 de agosto de 2011.

REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J.; CORDEIRO, J. S. (2000). Comparison of thickening of sludges from two water treatment plants using DAF and gravity. In: The 4th International Conference: Flotation in Water and Wastewater Treatment, 2000, Helsinki. **Proceedings...** Helsinki: International Water Association – IWA, 2000. v.1, p.1-9.

REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J. (2007). 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, 2007, Seoul. **Proceedings...** Seoul, South Korea: Seoul National University, 2007.

REALI, M. A. P.; SANTOS, S. P. (1996). Flotação por ar dissolvido em escala piloto com escoamento vertical entre placas para remoção de algas em águas de abastecimento. In: XXV Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, 1996, Cidade do México. **Anais...** Cidade do México, México: AIDIS, 1996. v.1, disco.

REALI, M. A. P.; SARTORI, L. (2000). The use of polymer as flotation aid in water treatment. In: The 4th International Conference: Flotation in Water and Wastewater Treatment, 2000, Helsinki. **Proceedings...** Helsinki: International Water Association – IWA, 2000. v.1, p.1-9.

REALI, M. A. P.; SARTORI, L. (1998). Utilização de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação na flotação. In: XXVI Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, 1998, Lima. **Anais...** Lima, Peru: Asociación Peruana de Ingenieria Sanitaria, 1998.

RITCHER, CARLOS A.; AZEVEDO NETTO, J. M. (1991). Tratamento de água: tecnologia atualizada. São Paulo-SP: Blucher, 1991, p.136-146.

SANTOS, S. P.; REALI, M. A. P. (1996). Emprego de uma unidade de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório para remoção de algas em águas de abastecimento. In: III Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1996. Gramado-RS. **Anais...** Gramado-RS: ABES, 1996, v.1, disco.

SARTORI, L.; REALI, M. A. P. (1999). Diminuição da dosagem de coagulante primário através da aplicação de polímeros sintéticos na flotação de águas para abastecimento. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro-RJ: ABES, 1999.

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

ZABEL, T. (1984). Flotation in Water Treatment. **Matinus Nijhoff**, Boston.