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

KAREN SORAIA MECA

**Influência do tempo de detenção hidráulica e do gradiente
médio de velocidade na zona de contato no desempenho de
unidade piloto de flotação por ar dissolvido aplicado à
clarificação de água para abastecimento**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2014

KAREN SORAIA MECA

Influência do tempo de detenção hidráulica e do gradiente
médio de velocidade na zona de contato no desempenho de
unidade piloto de flotação por ar dissolvido aplicado à clarificação
de água para abastecimento

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

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva
Reali

São Carlos
2014

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

M486i Meca, Karen Soraia
Influência do tempo de detenção hidráulica e do gradiente médio de velocidade na zona de contato no desempenho de unidade piloto de flotação por ar dissolvido aplicado à clarificação de água para abastecimento / Karen Soraia Meca; orientador Marco Antonio Penalva Reali. São Carlos, 2014.

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, 2014.

1. Tratamento de água potável. 2. flotação por ar dissolvido (FAD). 3. zona de contato. 4. gradiente médio de velocidade (G). 5. tempo de detenção hidráulica. 6. taxa de aplicação superficial (TAS). I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **KAREN SORAIA MECA.**

Título da dissertação: "Influência do tempo de detenção hidráulica e do gradiente médio de velocidade na zona de contato no desempenho de unidade piloto de flotação por ar dissolvido aplicado à clarificação de água para abastecimento".

Data da defesa: 03/10/2014

Comissão Julgadora:

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

Prof. Dr. **Davi Gasparini Fernandes Cunha**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Maurício Luiz Sens**
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

Resultado:

Aprovada

APROVADA

Aprovado

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

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

*Aos meus pais, Jucy e Adalto, pelo
amor incondicional, incentivo e
carinho, dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por iluminar meu caminho e me proporcionar mais esta conquista.

Aos meus pais e meu irmão, por todo o amor, dedicação e incentivo.

À USP, EESC, SHS e LATAR.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali, pelos inúmeros ensinamentos, orientação e confiança depositada durante toda a realização deste trabalho.

Ao técnico Alcino pela constante ajuda e enorme contribuição no desenvolvimento e manutenção de toda estrutura utilizada na pesquisa, e pela amizade.

À técnica Teresa, pela ajuda durante as análises e pela sua amizade.

A Carla pela convivência diária nesses dois anos, por ter me aceito “na alegria e na tristeza”, pelos momentos em que foi mãe e pelos que foi filha. Muito obrigada pelo companheirismo.

As minhas novas irmãs, amigos e colegas que alegraram minha vida são-carlense: Andressa, Ana Paula, Araceli, Camila, Carla, Carol, Eloá, Felipe (Seu Jorge), Fernanda, Gabriel, Gabriela, Jairo, Juliana, Laís, Matheus, Paulo, Tácyo e Tiago (Cebola). Conto com vocês para sempre.

Aos amigos Latarianos Andressa, Gabriel, Eloá, Lucas, Gabriela, Stephanie, Paulo, Thalita e Guilherme por fazerem meus dias mais divertidos e produtivos com a companhia de vocês no laboratório. Gabriel obrigada por sempre estar disposto a me emprestar o seu cérebro.

À Cris, Diego (Mascote), Kiemi, Lari, Mari, Mayane e Thaís pela amizade que levo comigo há anos.

Ao Paulo por todo incentivo e apoio ao longo dessa caminhada para que eu não desanimasse. Muito obrigada pela amizade e carinho.

Aos funcionários do departamento de Hidráulica e Saneamento da USP, pela atenção e solicitude com que se dispuseram a me ajudar durante o tempo que realizei esse trabalho.

À CAPES e FAPESP pelo apoio financeiro.

Agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*"Ninguém é tão sábio que nada tenha
para aprender, nem tão tolo que nada
tenha para ensinar."* Blaise Pascal

RESUMO

MECA, K. S. **Influência do tempo de detenção hidráulica e do gradiente médio de velocidade na zona de contato no desempenho de unidade piloto de flotação por ar dissolvido aplicado à clarificação de água para abastecimento.** 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

O desempenho de unidades de flotação por ar dissolvido (FAD) depende significativamente do projeto da zona de contato (ZC) dessas unidades, situada na entrada das mesmas e responsável por promover condições adequadas para que ocorram taxas satisfatórias de colisão entre as microbolhas de ar e os flocos formados na etapa antecedente de floculação da água para abastecimento. Os dois principais parâmetros de projeto da ZC são o tempo de detenção hidráulico ou tempo de contato (T_{zc}) e o gradiente médio de velocidade na ZC (G_{zc}). A presente dissertação apresenta os resultados de estudo sobre a influência do T_{zc} e do G_{zc} na ZC de uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido (UPFAD) com escoamento contínuo aplicada ao tratamento de água para abastecimento. Foram utilizados módulos contendo tela metálica em seu interior com malha de #25mm com diferentes dimensões, de modo a se obterem diferentes valores de G_{zc} e T_{zc} .

Foram investigadas duas configurações na unidade de FAD (Configurações A e B), nas quais o comprimento (L_{zc}) e a altura (H_{zc}) da ZC foram variados, permitindo a alteração do T_{zc} e mantendo-se controlados os valores de G_{zc} (com a introdução ou não de diferentes módulos de tela metálica na ZC) e vice versa. Os demais parâmetros do processo de FAD não sofreram variações, tais como taxa de aplicação superficial (TAS) na zona de separação, tempo de floculação, entre outros.

Para a configuração A, foram estudadas três alturas diferentes na ZC e para a configuração B, quatro alturas diferentes na ZC, o que acarretou, para cada valor de G_{zc} variação do T_{zc} . Para cada configuração da ZC, também foram testados três valores de vazão de recirculação de água saturada com ar de modo a se obterem três diferentes concentrações de ar (A/V) no processo de flotação.

Para todos os parâmetros analisados (Turbidez, Cor, Absorbância), as maiores eficiências de remoção foram obtidas nos ensaios realizados com o uso da tela #25mm,

tanto na configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$ e $G = 6,1 \text{ s}^{-1}$) quanto na configuração B ($TAS_{zc} = 87 \text{ m/h}$ e $G = 3,2 \text{ s}^{-1}$).

Os resultados permitem concluir que o par de valores (T_{zc} , G_{zc}) é mais apropriado para o projeto da zona de contato de unidades FAD do que o par (T_{zc} , TAS_{zc}) usualmente adotado pelos projetistas, sendo que, na faixa de valores investigados a UPFAD apresentou melhor desempenho para o par: T_{zc} de 41 s e G_{zc} de $6,1 \text{ s}^{-1}$.

Palavras-chave: Tratamento de água potável; flotação por ar dissolvido (FAD); zona de contato; gradiente médio de velocidade (G); tempo de detenção hidráulica; taxa de aplicação superficial (TAS).

ABSTRACT

MECA, K. S. Influence of hydraulic detention time and velocity gradient in the contact zone on the performance of unit pilot dissolved air flotation clarification applied to potable water. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

The performance of units dissolved air flotation (DAF) depend significantly of design on the contact zone (CZ) of these units, situated at the entrance thereof and responsible for promoting appropriate conditions to occur satisfactory collision rates between air microbubbles and the flocs formed in the step of flocculation of potable water. The two main design parameters of the CZ are the hydraulic detention time or contact time (T_{cz}) and the velocity gradient in the CZ (G_{cz}). This work presents the results of study of the effects of varying the T_{cz} and G_{cz} at the contact zone of pilot unit DAF with continuous flow applied to the treatment of potable water. Were used modules containing metal grille with mesh of #25 mm, with different dimensions in order to obtain different values of G_{cz} and T_{cz} .

Were investigated two configurations in the unit FAD (configurations A and B) where the length (L_{cz}) and height (H_{cz}) of contact zone were varied, allowing the variation of T_{cz} and keeping the values of G_{cz} controlled (with the introduction or not of different modules in the metal grille in CZ) and vice versa, without changes in other process variables FAD, such as rate of surface application (TAS) in the separation zone, flocculation time, among others.

For the configuration A were studied three different heights in the CZ and in configuration B, four different heights in the CZ, which resulted, for each value of G_{cz} (relative to the chosen value of L_{cz}) the variation of T_{cz} . For each configuration of CZ were also tested three values of recirculation flow of air saturated in order to obtain three different values of concentration in air (A/V) in the flotation process.

For all parameters analyzed (turbidity, color, absorbance), the highest efficiencies were obtained in assays performed using the grille # 25mm, both in configuration A ($TAS_{cz} = 136$ m/h and $L = 6,1$ s⁻¹) and configuration B ($TAS_{cz} = 87$ m/h and $G = 3,2$ s⁻¹).

The results indicate that the pair of values (T_{cz} , G_{cz}) is more suitable for project of the CZ of units FAD than the pair (T_{cz} , TAS_{cz}) usually adopted by the designers, and

values in the range investigated in UPFAD showed performed better for Tcz of 41 s and Gcz of 6,1 s⁻¹.

Keywords: Treatment of potable water; dissolved air flotation (DAF); contact zone, velocity gradient (G); hydraulic detention time; rate of surface application (TAS).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resumo das gerações das unidades de flotação por ar dissolvido e suas especificações. (adaptado de KIURU, 2001).....	9
Figura 2: Diagrama esquemático do processo de FAD	10
Figura 3: Distribuição do tamanho de bolhas produzidas por válvula agulha e bocal tipo WRC.(ZABEL,1984)	17
Figura 4: Variações dos bocais difusores testados (RYKAART; HAARHOFF, 1995).	18
Figura 5: Escoamento Estratificado Padrão na Zona de Separação no Processo de FAD (Fonte: Adaptado de Edzwald, 2007).	21
Figura 6: - Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido.	24
Figura 7: Corte longitudinal da UPFAD (Todas as unidades em m).	24
Figura 8: Planta da UPFAD (Todas as unidades em m).	25
Figura 9: Painel de Controle da UPFAD.	25
Figura 10: Tela de Entrada do Software de Controle da UPFAD.	26
Figura 11: Reservatórios de água para alimentação da UPFAD e Caixa de Equalização.	27
Figura 12: Reservatórios de Coagulante e Alcalinizante.	28
Figura 13: Mistura rápida <i>in line</i>	28
Figura 14: Vista interna das câmaras de floculação da UPFAD.	29
Figura 15: câmara de flotação, divididas nas zonas de contato e separação.	30
Figura 16: Comporta para controle da altura de entrada na Zona de Contato.	30
Figura 17: Vertedor triangular de saída da UPFAD.	31
Figura 18: Câmara de saturação da UPFAD.	32
Figura 19: Bocais difusores utilizados na UPFAD.	32
Figura 20: Esquema ilustrativo da câmara de saturação.	33
Figura 21: Aquecedores a gás da UPFAD.	33
Figura 22: Layout da instalação com seus principais componentes.	34
Figura 23: Fluxograma da configuração A dos ensaios realizados na pesquisa.	45
Figura 24: Fluxograma da configuração B dos ensaios realizados na pesquisa.	46
Figura 25: Eficiência de remoção (%) de turbidez na configuração A (TASzc=136 m/h).	51
Figura 26: Eficiência de remoção (%) de turbidez na configuração B (TASzc=87 m/h).	54
Figura 27: Eficiência de remoção (%) de turbidez nas configurações A e B utilizando a Tela de #25mm.	55
Figura 28: Eficiência de remoção (%) de turbidez nas configurações A e B sem o uso da tela.	57
Figura 29: Eficiência de remoção (%) de turbidez nas configurações A e B com e sem o uso da tela para o Tzc de 41 s e A/V de 5,0 g.m ⁻³	58
Figura 30: Eficiência de remoção (%) de cor na configuração A (TASzc=136 m/h).	60
Figura 31: Eficiência de remoção (%) de cor na configuração B (TASzc=87 m/h).	63
Figura 32: Eficiência de remoção (%) de cor nas configurações A e B utilizando a Tela de #25mm.	64
Figura 33: Eficiência de remoção (%) de cor nas configurações A e B sem o uso da tela.	65
Figura 34: Eficiência de remoção (%) de cor nas configurações A e B com e sem o uso da tela para o Tzc de 41 s e A/V de 5,0 g.m ⁻³	67
Figura 35: Eficiência de redução (%) de absorbância na configuração A (TASzc=136 m/h).	69
Figura 36: Eficiência de redução (%) de Absorbância na configuração B (TASzc=87 m/h).	72

Figura 37: Eficiência de redução (%) de Absorbância na configuração A e B utilizando a tela de #25 mm.	73
Figura 38: Eficiência de redução (%) de Absorbância na configuração A e B sem o uso da tela.	74
Figura 39: Eficiência de remoção (%) de cor nas configurações A e B com e sem o uso da tela para o Tzc de 41 s e A/V de $6,5 \text{ g.m}^{-3}$	75
Figura 40: Eficiência de remoção (%) de turbidez no Tzc de 41 s para a configuração A e B.	76
Figura 41: Eficiência de remoção (%) de Cor no Tzc de 41 s para a configuração A e B.	77
Figura 42: Eficiência de redução (%) de Absorbância no Tzc de 41 s para a configuração A e B.	77
Figura 43: Eficiência de remoção (%) de Turbidez com A/V de $5,0 \text{ g.m}^{-3}$ no Tzc 41 s.	78
Figura 44: Eficiência de remoção (%) de Cor com A/V de $5,0 \text{ g.m}^{-3}$ no Tzc 41 s.	79
Figura 45: Eficiência de redução (%) de Absorbância com A/V de $5,0 \text{ g.m}^{-3}$ no Tzc 41 s.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aspectos positivos de uma unidade de FAD em relação à sedimentação.	11
Tabela 2: Parâmetros mantidos fixos em todos os ensaios.....	36
Tabela 3: Medidas da câmara de flotação.	37
Tabela 4: Valores de velocidades <i>cross-flow</i> obtidos para cada ensaio.	38
Tabela 5: Concentrações de microbolhas de ar (A/V) para cada razão de recirculação estudada..	39
Tabela 6: valores de TASzc para as configurações A e B.....	40
Tabela 7: Tzc para a Configuração A.....	40
Tabela 8: Tzc para a Configuração B.....	40
Tabela 9: Gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento da água na zona de contato da UPFAD, para as configurações A e B sem o uso da tela.....	42
Tabela 10: Características da tela utilizada nos ensaios.....	43
Tabela 11: Gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento da água na zona de contato da UPFAD, para as configurações A e B com o uso da tela.	43
Tabela 12: Gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento da água na zona de contato da UPFAD, para as configurações A e B.	44
Tabela 13: Análises e leituras realizadas na pesquisa.	47
Tabela 14: Características da água bruta.	49
Tabela 15: Características da água coagulada.	49
Tabela 16: Resultados de turbidez da configuração A (TASzc = 136 m/h e Gzc = 6,1 s ⁻¹ e 2,2 s ⁻¹).	50
Tabela 17: Resultados de turbidez da configuração B (TASzc = 87 m/h e Gzc = 3,2 s ⁻¹ e 0,9 s ⁻¹).	53
Tabela 18: Resultados de Cor da configuração A (TASzc = 136 m/h e G = 6,1 s ⁻¹ e 2,2 s ⁻¹).	59
Tabela 19: Resultados de cor da configuração B (TASzc= 87 m/h e G= 3,2 s ⁻¹ e 0,9 s ⁻¹).	62
Tabela 20: Resultados de Absorbância da configuração A (TASzc= 136 m/h e G= 6,1 s ⁻¹ e 2,2 s ⁻¹).	68
Tabela 21: Resultados de Absorbância da configuração B (TASzc= 87 m/h e Gzc= 3,2 s ⁻¹ e 0,9 s ⁻¹).	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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: Absorbância medida em espectrofotômetro para comprimento de onda de 254nm;

ADV: *Acoustic Doppler Velocimeter*;

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

EESC: Escola de Engenharia de São Carlos;

ETA: Estação de Tratamento de Água;

FAD: Flotação por Ar Dissolvido;

Gzc : Gradiente médio de velocidade na zona de contato;

LATAR: Laboratório de Tratamentos Avançados e Reúso de Águas;

Lzc: comprimento na zona de contato;

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

uH: Unidade Hazen;

pH: Potencial Hidrogeniônico,

Qe: vazão de entrada para a flotação;

r: correlação de Pearson

R : razão de recirculação.

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.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
1. Introdução.....	1
2. Objetivo	5
3. Revisão bibliográfica.....	7
3.1. Flotação	7
3.2. Flotação por ar Dissolvido (FAD)	8
3.3. Pesquisas desenvolvidas pelo grupo na Unidade Piloto de Flotação Por Ar dissolvido.....	12
3.4. Fatores que influenciam na eficiência da Unidade de FAD	13
3.4.1. Pré-tratamento (Coagulação e floculação)	13
3.4.2. Unidade de geração de microbolhas	14
3.4.3. Tanque de flotação (Zona de contato e Zona de separação).....	19
4. Material e Métodos.....	23
4.1. Considerações Iniciais	23
4.2. Unidade piloto de flotação por ar dissolvido.....	23
4.3. Água de estudo.....	35
4.3.1. Pré-tratamento e demais Parâmetros Fixados.....	35
4.4. Configuração do reator FAD.....	37
4.4.1. Concentração de microbolhas de ar.....	38
4.4.2. Zona de Contato - Taxas de Aplicação Superficial (TASzc) e Tempos de Contato (Tzc)	39
4.4.3. Gradiente médio de velocidade na zona de contato.....	41
4.5. Fluxograma das configurações A e B dos ensaios realizados na UPFAD.....	44
4.6. Monitoramento dos ensaios	47
5. Resultados	49

5.1.	Análise dos resultados obtidos em termos de eficiência de remoção de turbidez...	49
5.1.1.	Resultados obtidos para o parâmetro Turbidez na configuração A (TASzc = 136 m/h e valores de Gzc= 6,1 s ⁻¹ e de 2,2 s ⁻¹).....	49
5.1.2.	Resultados obtidos para o parâmetro Turbidez na configuração B (TASzc= 87 m/h e Gzc= 3,2 s ⁻¹ e 0,9 s ⁻¹).....	52
5.1.3.	Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.1.1 e 5.1.2.	55
5.1.4.	Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.1.1 e 5.1.2	56
5.2.	Análise dos resultados obtidos em termos de eficiência de remoção de Cor.....	58
5.2.1.	Resultados obtidos para o parâmetro Cor na configuração A (TASzc = 136 m/h e Gzc= 6,1 s ⁻¹ e 2,2 s ⁻¹).	58
5.2.2.	Resultados obtidos para o parâmetro Cor na configuração B (TASzc= 87 m/h e Gzc= 3,2 s ⁻¹ e 0,9 s ⁻¹).	61
5.2.3.	Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.2.1 e 5.2.2.	63
5.2.4.	Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.2.1 e 5.2.2.	65
5.3.	Análise dos resultados obtidos em termos de redução de Absorbância.....	67
5.3.1.	Resultados obtidos para o parâmetro Absorbância na configuração A (TASzc= 136 m/h e Gzc = 6,1 s ⁻¹ e 2,2 s ⁻¹).....	67
5.3.2.	Resultados obtidos para o parâmetro Absorbância na configuração B (TASzc = 87 m/h e Gzc = 3,2 s ⁻¹ e 0,9 s ⁻¹).	70
5.3.3.	Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.3.1 e 5.3.2.	73
5.3.4.	Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.3.1 e 5.3.2.	74
5.4.	Resultados obtidos nos parâmetros Turbidez, Cor e Absorbância considerando o valor de Tzc que forneceu melhor desempenho na UPFAD.	76
5.5.	Resultados obtidos nos parâmetros Turbidez, Cor e Absorbância considerando a variação do Gzc(s⁻¹) para os ensaios com A/V de 5,0 g/m³.....	78
6.	Conclusão e Recomendações	81
7.	Referências Bibliográficas	83

1. Introdução

A água é fundamental à sobrevivência da vida na Terra. Apesar de indispensável para o homem, a água pode conter elementos químicos, microrganismos e determinadas substâncias, que devem ser eliminados ou reduzidos a concentrações que não prejudiquem a saúde do homem. Sendo assim, este recurso deve estar de acordo com padrões de potabilidade estipulados para atender de forma satisfatória às necessidades humanas.

A qualidade da água potável no Brasil é regulada pela Portaria MS nº2.914, de 12 de dezembro de 2011 (BRASIL, 2011). Esta portaria dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

As tecnologias de tratamento de água evoluíram consideravelmente, embora os custos e riscos envolvidos possam ser extremamente elevados, pode-se dizer que qualquer água pode ser tratada e destinada ao consumo.

A flotação por ar dissolvido constitui alternativa eficaz para o tratamento de água para abastecimento, sendo, portanto aplicada como uma das etapas de clarificação de determinados tipos de águas como, por exemplo, águas com elevadas concentrações de algas ou substâncias húmicas (REALI, 1991).

As primeiras aplicações da flotação, como processo de separação de fases, são anteriores a 1920, quando tal processo era utilizado, de maneira rudimentar, na indústria de beneficiamento de minérios (REALI, 1984). O processo foi usado pela primeira vez na Escandinávia e na África do Sul, e ao longo dos anos tem sido cada vez mais aplicado em todo o mundo. Tal fato se justifica por este ser um processo de clarificação mais adequada que a sedimentação para a remoção de partículas de baixa densidade (EDZWALD, 2007).

A flotação por ar dissolvido utilizada no tratamento de água para abastecimento chegou ao Brasil na década de 80. Tal método foi estudado no Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) na Universidade de São Paulo (USP).

Realí (1984) desenvolveu e testou a unidade FAD a qual foi posteriormente instalada e operada na Estação de Tratamento de Água de São Carlos (ETA São Carlos), concluiu-se que, para casos específicos, a FAD pode-se constituir alternativa vantajosa em relação à sedimentação.

A FAD pode ser uma alternativa interessante e competitiva para tratamento de águas de abastecimento com cor elevada e baixa turbidez. Como os flocos formados geralmente apresentam pequena massa específica, há comprometimento na sua remoção por sedimentação, uma vez que estes tendem a se depositar muito lentamente. Como resultado, o processo dependerá de tanques com baixas taxas e exigirá, consequentemente, unidades de maiores dimensões.

Também se deve levar em conta na remoção destas partículas por sedimentação, que seria necessária uma maior dosagem de coagulante e maiores períodos de floculação para a formação de flocos adequados. Como consequência, haveria maior gasto com produtos químicos e maior volume de lodo gerado.

Segundo Reali e Patrizzi (2007) vários fatores influenciam para que se possa ter sucesso no desempenho da FAD. Dentre estes pode-se destacar: dosagem de coagulante, pH adequado, floculação, geração de microbolhas, tipo de câmara de saturação adotada, pressão de operação, vazão de recirculação, temperatura da água, características dos bocais para despressurização da água saturada. Esses fatores requerem uma operação cuidadosa para tornar a FAD um processo eficaz de clarificação das águas.

O grupo de pesquisa de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo é pioneiro na linha de pesquisa de FAD no tratamento de águas para abastecimento. Este grupo dispõe de uma unidade piloto de FAD de formato retangular a qual apresenta grande versatilidade, permitindo a variação de características de projeto e operação. Vários trabalhos já foram desenvolvidos nesta unidade, analisando a influência de diferentes parâmetros na eficiência da flotação, podendo citar: Reali e Patrizzi (2007), Maia (2010), Araújo (2010), Pioltine e Reali (2011), Escher (2011) e Souza (2012).

Alguns desses estudos exploram mais profundamente a zona de contato. Maia (2010) estudou a influência da velocidade de entrada da zona de contato (V_{ezc}); Lundh et al (2002), Reali e Patrizzi (2007) e Souza (2012) estudaram mudanças na configuração da zona de contato, analisando os parâmetros relacionados (tempo de detenção, taxa de aplicação superficial e gradiente médio de velocidade) e Araújo (2010) analisou a influência da velocidade *cross-flow* na câmara de flotação.

Em uma unidade de FAD, a zona de contato é o local responsável por promover condições adequadas para que ocorram taxas satisfatórias de colisão entre as microbolhas de ar e os flocos.

As duas características mais importantes da ZC são o tempo de detenção hidráulico (T_{zc}) e o gradiente médio de velocidade (G_{zc}). Normalmente, não se instala qualquer tipo de dispositivo no interior da ZC para aumentar o valor de G_{zc} , ficando este dependente apenas da velocidade e temperatura da água na ZC e de suas características geométricas (formato, dimensões e rugosidade das paredes).

Este trabalho foi uma continuação da linha de pesquisa iniciada por Souza (2012), que analisou a influência do gradiente médio de velocidade (G_{zc}), na zona de contato, através da inserção de dois tipos de telas com características diferentes (Hobby-Casanet com malha de #12,5mm e Hobby com malha de #25mm) e os efeitos sobre o desempenho do sistema. A autora observou que a malha de #25mm apresentou melhor eficiência de clarificação de água para abastecimento por flotação.

A presente pesquisa tem como proposta principal analisar a influência da variação do tempo de detenção hidráulica (T_{zc}) e do gradiente médio de velocidade (G_{zc}), através da inserção de telas com malha de #25mm e variação do comprimento (L_{zc}) e altura (H_{zc}) da zona de contato, avaliando assim a influência de T_{zc} e de G_{zc} no desempenho de unidade piloto de flotação por ar dissolvido aplicado a clarificação de águas para abastecimento com diferentes características de qualidade. Para isso, foram desenvolvidos testes em estação piloto alimentada com água sintética preparada de forma a apresentar turbidez em torno de 7,5 NTU e cor aparente de 38 uH.

2. Objetivo

O objetivo desta pesquisa foi:

- ➔ Verificar a influência do tempo de detenção hidráulica (T_{zc}) e do gradiente médio de velocidade (G_{zc}) induzido pela implantação de telas no interior da zona de contato no desempenho de unidade piloto de flotação por ar dissolvido aplicada a clarificação de água para abastecimento.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Flotação

A flotação é um processo que envolve três fases: líquida, sólida e gasosa. É utilizado para separar partículas suspensas ou materiais graxos ou oleosos de uma fase líquida. A separação é produzida pela combinação de bolhas de gás, geralmente o ar, com a partícula, resultando em um agregado cuja densidade é menor que a do líquido e que portanto, sobe à superfície do mesmo, podendo ser coletada em uma operação de raspagem superficial (METCALF & EDDY, 1991).

Existe uma variedade de técnicas para introduzir as bolhas de ar necessárias para a separação sólido-líquido por flotação, sendo os processos de flotação classificados de acordo com o método de produção das bolhas.

A eletroflotação é um processo utilizado para tratamento de efluentes radioativos, despejos com tintas e emulsões de pintura, no qual as bolhas de H_2 e O_2 são obtidas por eletrólise da água.

Na flotação por ar disperso, a formação de bolhas de ar decorre da agitação do líquido, à pressão atmosférica, e os diâmetros das bolhas produzidas são relativamente grandes, cerca de 1.000 μm , quando comparados com o tamanho dos sólidos.

Na flotação por ar dissolvido, as bolhas são produzidas pela supersaturação do líquido com o ar, que pode ser efetuada a vácuo ou a pressão. No caso da flotação a vácuo por ar dissolvido, ou simplesmente flotação a vácuo, o líquido é saturado com ar, à pressão atmosférica e, em seguida, é aplicado vácuo ao líquido, quando são formadas as bolhas de ar. Na flotação por ar dissolvido por pressurização, ou simplesmente flotação por ar dissolvido (FAD), o ar é injetado na entrada de uma câmara de saturação, enquanto o líquido se encontra sob pressão. No interior dessa câmara ocorre a dissolução de ar na massa líquida pressurizada. Em seguida, o líquido é exposto a condições atmosféricas e a redução brusca de pressão provoca o desprendimento do ar na forma de minúsculas bolhas, que aderem às partículas em suspensão, migrando à superfície. (AISSE, et al., 2001).

3.2. Flotação por ar Dissolvido (FAD)

A flotação por ar dissolvido é amplamente utilizada em todo o mundo como observado nas últimas conferências internacionais realizadas em Helsínquia em 2000, Seul em 2007 e Amsterdam em 2011.

Segundo Lundh (2000), o mecanismo de flotação por ar dissolvido é descrito por pequenas bolhas de ar que se aderem às partículas suspensas presentes na água, cuja ideia é gerar aglomerados com menor densidade que a água, causando a ascensão do floco até a superfície, podendo ser removido no lodo.

Para a formação dos agregados flocos-bolhas, é necessário que ocorram colisões entre estes, as quais devem ser eficientes. Para esta aderência das bolhas nas partículas, diversos fatores estão envolvidos como o ângulo de contato, que depende da hidrofobicidade do sólido, e a carga superficial das bolhas.

A Figura 1 apresenta os esquemas das gerações das unidades de flotação por ar dissolvido juntamente com o resumo de suas especificações, segundo Kiuru (2001).

UNIDADE DE FAD DE 1º GERAÇÃO

- Unidades longas, estreitas e rasas.
- TAS_{ZS} de 2 a 3 $m^3/m^2.h$.
- Manta de microbolhas de ar muito fina e não possui efeito de filtração.

UNIDADE DE FAD DE 2º GERAÇÃO

- Unidades mais largas, mais profundas e com menor comprimento.
- TAS_{ZS} de 5 a 7 $m^3/m^2.h$
- Manta de microbolhas de ar com espessura de 30 a 50 cm no início do tanque e 10 a 20 cm no final do tanque.
- Uma ligeira função de filtro.

FLOTOFILTRO

- Combinação de flotação por ar dissolvido e filtração rápida.
- TAS_{ZS} de 10 a 15 $m^3/m^2.h$
- Manta de microbolhas de ar com espessura de 80 a 120 cm.

UNIDADE DE FAD DE 3º GERAÇÃO

- Surgiram a partir do flotofiltro.
- TAS_{ZS} de 25 a 40 $m^3/m^2.h$
- Manta de microbolhas de ar com espessura de 1,5 a 2,5m.

Figura 1: Resumo das gerações das unidades de flotação por ar dissolvido e suas especificações. (Adaptado de KIURU, 2001).

O método mais comum de produção de bolhas é o método de recirculação pressurizada. Neste método, um fluxo de recirculação da água tratada é bombeado para um recipiente de saturação, no qual o ar é adicionado e dissolvido sob pressão. O fluxo de recirculação pressurizada saturada é então introduzido na zona de contato do tanque de FAD, através de bocais. A mudança de pressão através dos bicos faz com que o ar dissolvido saia da solução sob a forma de pequenas bolhas de ar (EDZWALD e HAARHOFF, 2011). A Figura 2 é um diagrama esquemático do processo de FAD com recirculação pressurizada, aplicado ao tratamento de água de abastecimento.

Figura 2: Diagrama esquemático do processo de FAD
Fonte: Edzwald (2007a)

Segundo Han (2004) os principais fatores que influenciam a geração das microbolhas de gás são a pressão na câmara de saturação e a vazão de efluente recirculado através do sistema.

Os gradientes de velocidade na zona de contato são um dos principais responsáveis pela colisão ou o encontro entre os flocos e as microbolhas e consequentemente uma aderência permanente entre estas duas fases.

A força resultante entre a gravidade e o empuxo provocará o seu movimento ascensional, desta forma a flotação pode ser entendida analogamente como o inverso da sedimentação.

Na Tabela 1, são apresentados os aspectos positivos de uma unidade FAD em relação à sedimentação destacados por diversos pesquisadores.

Tabela 1: Aspectos positivos de uma unidade de FAD em relação à sedimentação.

SCHOFIELD, 2001	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Unidades mais compactas por constituir um processo de alta taxa; ➤ Apresenta elevada captura de sólidos, particularmente de sólidos finos (80-90%); ➤ Proporciona melhor remoção de partículas de pequena densidade e de algas.
EDZWALD, 1992	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tanques menores comparados com os tanques de sedimentação, o que gera um menor custo de construção; ➤ Quando associada a filtros, taxas de filtração maiores ou carreiras de filtração mais longas podem ser obtidas, quando comparadas com a sedimentação associadas a filtros; ➤ Exige menores dosagens de coagulantes.
REALI, 1991	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tanques de floculação menores, já que os flocos requeridos são menores que na sedimentação; ➤ Na unidade FAD o lodo produzido é mais concentrado que aquele produzido na decantação, reduzindo o custo de disposição final; ➤ O Processo de FAD promove a remoção de compostos orgânicos voláteis, sabor e odor por <i>stripping</i>.
ZABEL, 1985	<ul style="list-style-type: none"> ➤ A FAD é particularmente mais efetiva para o tratamento de água que contém grandes quantidades de algas, ou águas de baixa turbidez e altos valores de cor em relação ao processo de sedimentação.

Porém, segundo Schofield (2001), a FAD possui algumas desvantagens. Dentre elas, pode-se destacar: custos mais elevados com energia elétrica; necessidade de cobertura da unidade e operação com mão de obra mais especializada, pois se trata de um processo complexo, aumentando assim os custos de serviços.

3.3. Pesquisas desenvolvidas pelo grupo na Unidade Piloto de Flotação Por Ar dissolvido.

A seguir estão citados os últimos trabalhos desenvolvidos pelo grupo na linha de pesquisa de FAD realizados no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR) do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

- Remoção de Ferro, Manganês e Substâncias Húmicas de água para abastecimento, com uso de Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa e Oxidação Química. Leila J. Patrizzi. (Doutorado, 2002);
- Avaliação da influência da distribuição de tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho da Flotação com utilização de sonda ultrasônica e técnica de análise por imagem. Rodrigo B. Moruzzi. (Doutorado, 2005);
- The Influence of the Contact Zone Configuration on the Efficiency of a DAF Pilot Plant. Artigo apresentado na Internacional Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, na Coreia em 2007, por Leila J. Patrizzi e Marco A. P. Reali;
- Influência da velocidade *Cross-Flow* na Câmara de Flotação na eficiência de unidades de Flotação por Ar Dissolvido tratando água para abastecimento. Cláudio Jr. Araújo. (Mestrado, 2010);
- Influência da velocidade de entrada na Zona de Contato na eficiência de clarificação de unidades retangulares de Flotação por Ar Dissolvido aplicado no tratamento de águas para abastecimento. Kisner A. Maia. (Mestrado, 2010);
- Influência da taxa de aplicação superficial e da concentração de ar na eficiência de clarificação de água para abastecimento em unidades de Flotação por Ar Dissolvido. Aline E. Escher. (Mestrado, 2011);
- Influência do gradiente médio de velocidade na zona de contato na eficiência de clarificação de água para abastecimento por flotação. Dissertação de mestrado de Irene M. da Franca Souza. (Mestrado, 2012);

- Influência do tamanho de partículas floculadas na eficiência de clarificação de águas para abastecimento por flotação. André Pioltine. (Doutorado, 2013);
- Emprego da ferramenta CFD para representação da estrutura de escoamento de uma unidade de flotação em escala piloto tratando água para abastecimento. Stephanie I. G. Pinto. (Mestrado, 2013).

3.4. Fatores que influenciam na eficiência da Unidade de FAD

3.4.1. Pré-tratamento (Coagulação e floculação)

O estudo da técnica de flotação por ar dissolvido (FAD) aplicado a pré-clarificação de águas de abastecimento, antecedendo o processo de filtração, envolve a análise de uma série de conceitos relacionados não só ao processo de flotação isoladamente, como também a alguns aspectos dos processos de coagulação e de floculação das partículas a serem flotadas (REALI, 1991).

É necessário promover a desestabilização das partículas, que estão carregadas negativamente, em um processo conhecido como coagulação. A coagulação é um processo de pré-tratamento essencial, pois afeta todos os processos seguintes.

Segundo Richter (2009) coagulação é a alteração físico-química de partículas coloidais da água, caracterizada principalmente por cor e turbidez, produzindo partículas que possam ser removidas em seguida por um processo físico de separação.

É no estágio de mistura rápida que ocorre a desestabilização das partículas, logo em seguida da adição de coagulantes químicos, por isto esta mistura deve ser eficiente para não prejudicar a próxima etapa.

Para uma favorável fixação de partículas com bolhas de ar é necessária a redução das forças eletrostáticas repulsivas existentes entre essas, pois possuem potencial zeta negativo afetando assim a colisão e adesão. Com a coagulação os flocos produzidos possuem potencial zeta próximo de zero fazendo com que ocorra a adesão entre flocos e bolhas de ar (EDZWALD, 2010).

Segundo Reali (1991), para se obterem condições ótimas de coagulação para determinada água a ser tratada por flotação, são necessárias análises em laboratório. Neste caso, utiliza-se um equipamento específico (flotateste), o qual permite a obtenção de doses de coagulante e um valor de pH adequados, pois pequenas dosagens de coagulante

prejudicam a formação de flocos e elevadas dosagens produzem grandes flocos, os quais tendem a sedimentar ao invés de flotar.

A floculação das partículas e crescimento dos agregados ocorrem durante a fase de mistura lenta. O principal objetivo deste processo é o transporte das partículas desestabilizadas para promover e colisões e formação de flocos.

Usualmente, são empregados floculadores mecanizados subdivididos em dois ou três compartimentos de iguais dimensões, com tempo de detenção total na faixa 8 a 15 minutos. O valor médio de gradiente de velocidade nas unidades de floculação se situa na faixa de 70 s^{-1} a 110 s^{-1} , dependendo da qualidade da água (REALI et al., 2013).

Pioltine e Reali (2011) investigaram a influência do tempo de floculação na eficiência da flotação por ar dissolvido em uma unidade piloto retangular, e a caracterização da distribuição do tamanho dos flocos utilizando análise de imagem. Os resultados apontaram que a flotação por ar dissolvido teve um desempenho satisfatório com curto tempo de floculação (T_{FLOC} de 10 min), mas a produção de flocos com um diâmetro de Feret médio principalmente entre 200 e 400 μm (T_{FLOC} de 17min), resultou em melhor eficiência de remoção.

Edzwald (2007) observou que é necessária a adesão de várias bolhas para altas velocidades de ascensão à superfície de partículas superiores a 100 μm . Segundo o autor, não é preciso produzir flocos grandes, pois altas velocidades de ascensão podem ser obtidas com apenas uma bolha (diâmetro médio igual a 100 μm) aderida em sua superfície. Desse modo, o autor afirma que o tamanho ideal para os flocos encontra-se na faixa de 20 a 50 μm .

3.4.2. Unidade de geração de microbolhas

De acordo com Reali (1991), uma unidade convencional de geração de microbolhas é composta por um conjunto motor-bomba para pressurização da água de recirculação, uma câmara de saturação que recebe ar comprimido de um compressor e um dispositivo de despressurização. Também é composta por vários dispositivos e equipamentos de controle, tais como medidores de vazão da água de recirculação, controlador de nível da água na câmara de saturação, válvulas de alívio, atuadores e outras válvulas.

Esta unidade é de grande importância para a eficiência do processo de FAD, por isso necessita de uma mão de obra mais especializada para a correta operação do sistema como um todo.

Alguns elementos devem ser levados em consideração como o tipo de câmara de saturação adotado, a pressão de operação, a vazão de recirculação, temperatura da água e as características do bocal adotado para despressurização da água saturada.

O sistema de saturação de ar demanda um alto custo de energia do processo de flotação, sendo necessário aperfeiçoar o projeto de sistemas de recirculação para minimizar os custos de operação e proporcionar o máximo rendimento de equipamento.

Em relação à eficiência de dissolução de ar na água, a utilização de câmara de saturação com recheio torna-se mais efetivo, com uma menor razão entre o custo de operação e o nível de saturação atingido (MAIA, 2010).

Para promover a despressurização da vazão de recirculação (na entrada da unidade de flotação) são utilizados diversos dispositivos, tais como válvulas de agulha, orifícios com anteparo a jusante, além de vários tipos de bocais difusores patenteados. É importante que a pressão seja liberada próximo ao fluxo de água floculada a fim de minimizar a aglutinação das microbolhas entre si, que resulta em perda de microbolhas efetivas para a flotação dos flocos (REALI et al., 2013).

Zabel (1984) também afirma que o ar deve ser liberado próximo ao ponto onde a vazão de recirculação é misturada com a água floculada a fim de minimizar a perda de bolhas resultante da coalescência. Para atingir uma efetiva liberação do ar dissolvido, a pressão deve ser reduzida de forma rápida e devendo o dispositivo estar sob condições de alta turbulência. Contudo, a velocidade do fluxo de água recirculada que deixa o mecanismo de liberação de ar deve ser baixa o suficiente para evitar a quebra dos flocos.

A função das microbolhas de ar no processo de FAD é diminuir a densidade dos conjuntos flocos-bolhas, para que esta seja menor que a da água. Assim, quanto maior o volume de bolhas associadas aos flocos, menor será a densidade relativa e consequentemente maior será a velocidade de ascensão dos conjuntos flocos-bolhas.

Pequenas bolhas são mais interessantes à flotação que bolhas grandes, já que para uma mesma massa de ar, bolhas pequenas possuem maior superfície específica e ainda necessitam deslocar menor volume de água da superfície dos flocos a que vão aderir (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Segundo Reali (1991), o tamanho dessas bolhas é uma propriedade muito importante para um melhor desempenho do processo FAD, colocando que a faixa usual

para o tamanho de microbolhas é de 10 a 120 μm , estabelecendo um diâmetro médio das bolhas de 40 a 60 μm .

Han (2004) comenta que a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido depende da colisão entre bolhas e partículas. A eficiência da colisão é afetada por certos parâmetros, tais como potencial zeta e distribuição de tamanho das bolhas e das partículas.

Han et al. (2001) propuseram um diagrama de eficiência, com base em considerações teóricas, a fim de possibilitar a determinação do tamanho ótimo da partícula para um dado tamanho de bolha. A pesquisa foi realizada em escala de bancada, utilizando reatores FAD em regime de batelada e projetados em cilindro de acrílico, além de um sistema de análise de imagens para determinação da distribuição do tamanho das partículas. O autor considera o potencial zeta e os tamanhos das partículas e das bolhas como os parâmetros mais importantes na eficiência de colisão. Quando o potencial zeta é positivo, resultado de excesso de coagulante aplicado, a eficiência de colisão no geral torna-se alta e a maioria das colisões ocorre quando o tamanho das partículas é igual ou ligeiramente maior que o tamanho da bolha. Quando o potencial zeta da partícula tende a 0 mV, a eficiência de colisão torna-se mais baixa em relação ao potencial positivo, no entanto a relação entre a eficiência de colisão e o tamanho das partículas e bolhas não muda. Entretanto, para um potencial zeta negativo que representa zero ou muito baixa dosagem de coagulante, a eficiência de colisão foi muita baixa, sendo esperada uma pobre eficiência de remoção nesta condição.

O autor também observou que ocorre uma mudança do potencial zeta das partículas com o aumento das dosagens de coagulante, com diferentes tempos de floculação, sendo que partículas sem coagulante apresentam potencial zeta de -13 mV, e com a adição de alumínio tornam-se menos negativo, alcançando potencial zeta de 0 mV com uma dosagem próxima de 10 mg/L.

Para Edzwald (2010), a concentração de microbolhas de ar na zona de contato é a variável mais importante de controle e operação de uma unidade de FAD. A vazão de recirculação e a pressão no interior da câmara de saturação são os principais fatores que influenciam este parâmetro.

HAN et al. (2002) estudaram o efeito da pressão no tamanho de bolhas de ar geradas pela FAD. Foram realizados diversos ensaios sob diferentes pressões (2,0 – 6,0 atm). Verificou-se que as bolhas diminuíram com o tamanho da pressão até 3,5 atm, sendo que acima desta pressão, o tamanho das bolhas manteve-se praticamente constante

(diâmetro médio de 28 μm). Assim, concluiu-se que não é necessário aumentar a pressão acima deste valor crítico, caso o objetivo seja somente a geração de pequenas bolhas.

Zabel (1984) estudou a influência dos tipos de aparelhos na liberação da água saturada, como válvulas agulha e bocais patenteados, sobre o tamanho das microbolhas. A Figura 3 mostra que para os dois tipos de bocais difusores estudados o tamanho das microbolhas fica na faixa de 10 a 120 μm .

Figura 3: Distribuição do tamanho de bolhas produzidas por válvula agulha e bocal tipo WRC.(ZABEL,1984)

Rykaart e Haarhoff (1995) estudaram a distribuição do tamanho de bolhas em três diferentes bocais de injeção de ar na FAD. Foi utilizado para os ensaios uma câmara de saturação, coluna de flotação em acrílico e bocais em escala real. Todos os experimentos foram realizados para pressões de saturação de 2,0 e 5,0 atm. A figura 4 mostra os bocais difusores.

Figura 4: Variações dos bocais difusores testados (RYKAART; HAARHOFF, 1995).

O experimento 1 foi realizado em um único e reto canal no bocal, com uma superfície de contato posicionada em diferentes distâncias na saída do canal (5, 10, 15 e 20 mm). Foram elencadas as seguintes conclusões:

- Na pressão de 2,0 atm, a distância entre a superfície de contato e saída do bocal não tem efeito significativo no diâmetro médio da bolha, já com pressão de 5,0 atm observou uma grande diminuição no tamanho das microbolhas abaixo da distância de 10 mm;
- A fração de macrobolhas é menor que 3% para a pressão de 2,0 atm e aumenta linearmente com a distância da superfície para a pressão de 5,0 atm;
- Para superfície de contato muito próxima do bocal (5 mm), a energia cinética é abruptamente dissipada, diminuindo a coalescência entre as bolhas.

No experimento 2, estudou-se a ausência e a presença de uma curvatura no interior do bocal difusor. Foi possível constatar que a presença da curvatura diminui a fração das macrobolhas, devido à quebra destas em seu interior.

Já no experimento 3, estudou-se um bocal difusor com e sem uma saída em forma de cone, sendo possível observar que a presença desta saída reduziu o tamanho médio das bolhas (principalmente na pressão de 5,0 atm) e a fração de macrobolhas (para as duas pressões). É possível notar que a pressão de saturação agiu simultaneamente com outros parâmetros, sendo que a pressão influenciou notadamente a concentração de gases no meio líquido.

Han (2012) comenta que pesquisas sobre as características fundamentais das bolhas tem sido limitadas, e para uma melhoria nos sistemas de flotação já existentes é necessário compreender as características e comportamentos das bolhas.

Lee et al. (2007) realizaram testes para a determinação do tamanho e distribuição das bolhas através de um analisador de imagens e um analisador de partículas, para isso utilizaram uma bomba geradora de microbolhas, o sistema foi operado em escala real e não se usou nenhum saturador ou tanque de pressurização. Verificou-se a geração de microbolhas com diâmetro médio de 43,3 a 53,4 μm , e com uma pressão de 5,1 kgf/cm^2 e com uma vazão de recirculação de 20 a 40 %, o sistema obteve uma eficiência de remoção de turbidez de 80 %, e pode-se observar as seguintes vantagens, ausência de câmara de saturação e compressor de ar, controle simplificado e longo tempo de retenção.

3.4.3. Tanque de flotação (Zona de contato e Zona de separação)

O tanque de flotação é dividido em duas principais zonas: a de contato e a de separação. A zona de contato tem a função de promover a adesão das bolhas com os flocos, formando os agregados estáveis flocos-bolhas. Depois da colisão, o escoamento de água conduz a suspensão dos aglomerados flocos-bolhas, microbolhas livres e uma possível parcela de flocos sem ou com número insuficiente de microbolhas para a segunda parte da unidade, denominada zona de separação. Esta tem o papel de garantir a permanência dos agregados flocos-bolhas na superfície da unidade promovendo a separação da massa sólida do meio líquido, formando uma camada sobrenadante (lodo). O lodo é retirado do tanque e a água clarificada é retirada pela parte inferior da zona de separação.

Maia (2010) estudou a influência da variação da velocidade de entrada na zona de contato aplicada a tratamento de água para abastecimento em uma unidade piloto de FAD. Com uma vazão de entrada de 4,6 m^3/h de água sintética. Para cada valor de velocidade de entrada, foram investigados dois valores de potencial zeta (10 mV e 0 mV). Como resultado, constatou-se que para velocidades de entrada na faixa de 62,2 m/h e 12.432,4 m/h, não há influência significativa na eficiência de clarificação. Entretanto, o autor sugere que valores de velocidade de entrada na zona de contato estejam na faixa de 124,3 a 180,2 m/h.

Souza (2012) analisou 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}) na eficiência de clarificação de uma unidade retangular de flotação por ar dissolvido.

Tal sistema foi projetado em escala piloto para tratar água para abastecimento e foram estudadas duas configurações da UPFAD (A e B), as quais diferem no comprimento da zona de contato, variando assim também a taxa de aplicação superficial e o tempo de detenção hidráulico. Foram analisados três valores do G_{zc} para cada configuração A (1,8; 6,5; 10,2) e B (0,9; 4,7; 6,3), por meio da inserção de telas com características diferentes no interior da zona de contato. Para cada valor de G_{zc} , foram investigados três valores de A/V (concentração de microbolhas de ar). A tela que gerou resultados mais eficientes na configuração A foi a mesma para a configuração B. Comparando todas as situações estudadas nas duas configurações, o ensaio com a configuração A (com T_{zc} de 54 s) com G_{zc} de $6,3 \text{ s}^{-1}$ e A/V de $4,9 \text{ g/m}^3$, apresentou as maiores eficiências de remoção de cor e turbidez.

Lundh et al. (2002) analisaram modificações da configuração da zona de contato na estrutura de escoamento da UPFAD, sendo examinados diferentes comprimentos desta zona e diferentes alturas e inclinações do anteparo que separa a zona de contato da zona de separação. Para analisar estas modificações na zona de contato, foi utilizado 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 de 65 m/h, velocidade *cross-flow* (V_{CF}) de 48 m/h, T_{ZC} de 45 s e altura do anteparo de 91 cm proporcionaram os melhores resultados na estrutura de escoamento no interior da zona de contato. As variações na inclinação do anteparo que separa a zona de contato da zona de separação não apresentaram modificações no processo.

Lundh et al. (2002) ainda revelou que o escoamento foi estratificado na zona de separação à medida que se aumentou a carga hidráulica. Quando a água alcança a parede à jusante ela é forçada a retornar para a parede a montante, e após o escoamento estratificado na camada menos densa da parte superior, devido à grande quantidade de microbolhas, ocorre o escoamento *plug-flow* na parte inferior, onde tem pouca quantidade de bolhas. Na Figura 5 é apresentado um esquema simplificado da estratificação do escoamento na zona de separação.

Figura 5: Escoamento Estratificado Padrão na Zona de Separação no Processo de FAD
(Fonte: Adaptado de Edzwald, 2007).

Reali e Patrizzi (2007) realizaram estudo de caracterização da estrutura de escoamento no interior da zona de contato com oito diferentes configurações em uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido. Além disso, verificaram a influência destas mudanças na eficiência de remoção de cor e turbidez. Foram avaliados diferentes valores de tempo de contato, taxa de aplicação superficial na zona de contato e velocidade *cross-flow*. Para observação da estrutura de escoamento foi utilizado uma sonda micro ADV. A combinação da taxa de aplicação superficial na zona de contato igual a 180 m.h^{-1} , tempo de contato de 34 segundos e velocidade *cross-flow* igual a 45 m.h^{-1} proporcionou melhores resultados (0,21 NTU de turbidez residual e cor inferior a 2uH).

Araújo (2010) estudou a influência da velocidade *cross-flow* na câmara de flotação na eficiência de unidades de FAD tratando água para abastecimento. A V_{CF} é função da vazão de entrada no tanque de flotação e da área entre o nível d'água no tanque de flotação e o anteparo que separa a zona de contato da zona de separação. Nessa região ocorre a passagem do agregado flocos-bolhas e turbulência excessiva pode causar o rompimento do conjunto e assim comprometer a eficiência do processo. A pesquisa verificou a variação da velocidade *cross-flow* (40, 70, 100, 150, 350 e 600 m/h) sob duas condições de TASzs: 7,7 e 15 m/h, e sob dois valores de potencial zeta (+10 mV e 0 mV). Pode-se concluir que em todas as condições analisadas houve boas eficiências na remoção

de turbidez, cor e ABS 254 nm, não sendo identificadas grandes diferenças de remoção entre as velocidades analisadas.

4. Material e Métodos

4.1. Considerações Iniciais

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizada uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido (UPFAD) que está localizada nas dependências do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR) do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) no campus I da Universidade de São Paulo (USP).

4.2. Unidade piloto de flotação por ar dissolvido

A Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido utilizada neste estudo apresenta grande versatilidade permitindo realizar vários tipos de alterações em seus parâmetros operacionais e de projeto (como a modificação das dimensões das zonas de contato e de separação). Por exemplo, é possível variar o comprimento de zonas de contato e separação, vazão de entrada da unidade, gradiente de floculação, vazão de entrada na zona de contato, altura do anteparo da zona de contato, altura da lâmina d'água (para permitir o controle da velocidade *cross-flow* sobre o anteparo de saída da Zc). Foram analisadas nesta UPFAD as alterações na eficiência de remoção de Cor Verdadeira e Turbidez através de mudanças realizadas na Câmara de flotação, mais precisamente na zona de contato. As Figuras 6, 7 e 8 apresentam, respectivamente, uma foto da vista geral, o corte longitudinal e a planta da unidade piloto de FAD.

Figura 6: - Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido.

Figura 7: Corte longitudinal da UPFAD (Todas as unidades em m).

Figura 8: Planta da UPFAD (Todas as unidades em m).

A UPFAD é composta pelos processos de coagulação, floculação e flotação sendo operada de forma semiautomatizada, através de um painel de controle (Figura 9) associado a um software (Figura 10) possibilitando ao operador aferir a vazão de entrada, vazão de saturação, vazão de retorno e gradiente de velocidade de cada um dos floculadores.

Figura 9: Painel de Controle da UPFAD.

Form1

☒ **Bomba Entrada** Vazão Ent.2(m³/h): 5.46 Temp. água (°C): LabelTemp

☒ **Bomba Retorno** Vazão Ret.1(m³/h): 0.09 pH: Labelph

☒ **Bomba Saturação** Vazão Sat.3(m³/h): 0.23 Turb1 (NTU): 0.0

Setpoint RA (m³/h): 0 Turb2 (NTU): 0.0

Vel. Raspador (%): 0.0

T. Registro (s): 1

Bombas Dosadoras (l/h)

01: 0.0

02: 0.0

Agitadores

01: 1 03: 1

02: 148 04: 148

☐ Travar Todos

Coletores

T. Descarte (s): 1

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

☐ Repetir Ciclo

Figura 10: Tela de Entrada do Software de Controle da UPFAD.

A unidade piloto de FAD possui quatro reservatórios de água, com capacidade de 15 m³ cada um (Figura 11), que são alimentados com água de poço subterrâneo do Campus 1 da EESC-USP. Tais reservatórios são equipados com agitadores de eixo vertical submersos para homogeneização da água. A água armazenada nestes reservatórios é veiculada para a unidade piloto de FAD através de uma bomba centrífuga acoplada a uma caixa de nível constante, permitindo que o sistema de recalque opere com carga hidráulica constante.

Figura 11: Reservatórios de água para alimentação da UPFAD e Caixa de Equalização.

A unidade piloto de FAD também possui dois reservatórios de 250 L cada um, sendo um reservatório de coagulante e outro de alcalinizante, ambos são equipados com bomba dosadora e agitadores (Figura 12). A mistura rápida ocorre na linha da tubulação – *in line* (Figura 13), o coagulante é aplicado na água bruta na tubulação de mistura rápida antes de entrar na primeira câmara de floculação.

Figura 12: Reservatórios de Coagulante e Alcalinizante.

Figura 13: Mistura rápida *in line*.

Após a mistura rápida, a água é conduzida às câmaras de floculação (Figura 14). A unidade piloto de FAD é composta por quatro câmaras em série que possuem misturadores verticais acionados por inversores de frequência responsáveis por promover a mistura lenta.

Figura 14: Vista interna das câmaras de floculação da UPFAD.

Em seguida a água floculada entra na câmara de flotação iniciando-se na zona de contato, e depois passando para a zona de separação. Existe um anteparo para a separação destas duas zonas (Figura 15), o qual é móvel, podendo assim obter diferentes áreas e comprimentos da zona de contato, tempo de detenção e TASzc. Também é possível através de uma comporta (Figura 16), entre a última câmara de floculação e a entrada na zona de contato, variar a velocidade de entrada na câmara de flotação.

Figura 15: câmara de flotação, divididas nas zonas de contato e separação.

Figura 16: Comporta para controle da altura de entrada na Zona de Contato.
FONTE: Maia (2010).

Na parte inferior da câmara de flotação, um “manifold” coleta a água clarificada e a encaminha para um vertedor triangular de saída (Figura 17), sendo parte desta água clarificada utilizada para alimentar a câmara de saturação.

Figura 17: Vertedor triangular de saída da UPFAD.

A câmara de saturação (Figura 18) é responsável pela geração de microbolhas, esta câmara recebe o fluxo de água recirculado e ar comprimido de um compressor, e através de manômetro, válvulas, acessórios e bomba centrífuga associada a medidores de vazão eletromagnético e rotâmetro é controlada a vazão afluyente e a pressão em seu interior. A câmara também possui sistema de eletrodos interligados à válvula solenóide para controle automático do nível da água em seu interior e da vazão de ar fornecida para a saturação da água pressurizada, desta maneira a água é saturada e depois injetada na câmara de flotação através de três bocais difusores (Figura 19).

Os bocais difusores estão situados no fundo da zona de contato, os quais promovem a despressurização da água saturada, gerando assim as microbolhas de ar que atuam no processo de FAD. Essas microbolhas formadas se aderem aos flocos existentes, iniciando a ascensão do conjunto floco-bolha até a zona de separação.

A Figura 20 apresenta o esquema da câmara de saturação utilizada nesta pesquisa.

Figura 18: Câmara de saturação da UPFAD.

Figura 19: Bocais difusores utilizados na UPFAD.

Figura 20: Esquema ilustrativo da câmara de saturação.

A UPFAD possui aquecedor de água a gás (Figura 21) possibilitando manter a temperatura da água bruta afluyente a piloto constante durante os ensaios.

Figura 21: Aquecedores a gás da UPFAD.

A Figura 22 apresenta o esquema geral da unidade piloto de FAD na qual foram realizados os estudos da pesquisa.

Figura 22: Layout da instalação com seus principais componentes.
 FONTE: Adaptado de Maia (2010).

4.3. Água de estudo

A água empregada neste estudo foi captada diretamente do poço profundo situado no campus 1 da EESC/USP e preparada com 1,0 mg/L de ácido húmico comercial (Aldrich 1,675-2) e 8,5 mg/L de caulinita (Fluka 60609), obtendo as características desejadas de cor aparente aproximada de 38 uH e turbidez próxima de 7,5 NTU, similar ao trabalho de Reali e Patrizzi (2007).

Para cada ensaio era realizado o seguinte procedimento, no primeiro dia os quatro reservatórios eram cheios com água do poço e adicionavam-se os produtos (Caulinita e Ácido Húmico) pela parte superior de cada reservatório, em seguida os agitadores de cada reservatório eram ligados e mantidos em funcionamento até o final do experimento. No segundo dia era realizada uma coleta de cada reservatório para a análise da água sintética bruta, e em seguida adicionado em cada reservatório 10 mg/L de carbonato de sódio (GENCO) para controle do pH desejado.

4.3.1. Pré-tratamento e demais Parâmetros Fixados

O coagulante utilizado nos ensaios foi o sulfato de alumínio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times (16,5) \text{H}_2\text{O}$ (VETEC P.A. 277) com a concentração de 11,25 g/L e dosagem de 22,5 mg/L, valores retirados do trabalho realizado por ARAÚJO (2010) que utilizou água sintética de composição semelhante em ensaios com escala de bancada. Com esta dosagem o potencial zeta desta água de estudo se mantém próximo a zero e faixa ótima de pH de $6,5 \pm 0,1$.

Os cálculos de concentração da solução de sulfato de alumínio no reservatório e vazão da bomba dosadora foram realizados a partir das Equações (01 e 02).

$$C_{\text{solução}} = \frac{m_{\text{produto}}}{V_{\text{total}}} \quad (\text{Eq. 01})$$

$C_{\text{solução}}$ = Concentração da solução (mg/L)

m_{produto} = Massa do produto químico (mg)

V_{total} = Volume total utilizado para a preparação do produto (L)

$$Q_{\text{bomba}} = \frac{D_{\text{produto}} * Q_{\text{afluente}}}{C_{\text{solução}}} \quad (\text{Eq. 02})$$

Q_{bomba} = Vazão da bomba dosadora (L/h)

$Q_{afluente}$ = Vazão de entrada na unidade piloto FAD (L/h)

$D_{produto}$ = Dosagem do produto química (mg/L)

$C_{solução}$ = Concentração da solução (mg/L)

Os parâmetros de floculação foram retirados da pesquisa de PIOLTINE e REALI (2011), vale ressaltar que as condições de coagulação são iguais a esta pesquisa, obtendo tempo de floculação de 17,2 min e gradiente médio de velocidade de 110 s^{-1} , a vazão de floculação foi fixada em $5,4 \text{ m}^3/\text{h}$ e o volume de cada câmara de floculação em $0,515 \text{ m}^3$.

Com base nos resultados de MAIA (2010), foi fixada a velocidade de entrada na ZC (V_{zc}) em 180 m/h e vazão de entrada da ZC de $4,6 \text{ m}^3/\text{h}$ tal vazão de entrada na câmara de flotação foi obtido através de um descarte de $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ após a floculação.

A Tabela 2 a seguir apresenta um resumo de todos os parâmetros mantidos fixos durante os ensaios:

Tabela 2: Parâmetros mantidos fixos em todos os ensaios.

Vazão de entrada nos flocladores	$5,4 \text{ m}^3/\text{h}$
Vazão de entrada para flotação (Q _e)	$4,6 \text{ m}^3/\text{h}$
Gradiente médio de velocidade de floculação (G _F)	110 s^{-1}
Tempo médio de floculação (T _F)	17,2 min
Velocidade de entrada para a flotação (V _E)	180 m/h
Taxa de aplicação superficial na zona de separação (TASzs)	$14,6 \pm 0,2 \text{ m/h}$
Temperatura	$25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
Pressão na câmara de saturação	$4,5 \pm 0,1 \text{ Kg/cm}^2$

Para que o processo de flotação por ar dissolvido tenha uma ótima eficiência, a câmara de saturação deve ter um bom desempenho em seu funcionamento. Foram seguidos os procedimentos adotados por MAIA (2010) para operação da câmara de saturação.

4.4. Configuração do reator FAD

Para esta pesquisa a unidade piloto de FAD foi montada em duas configurações diferentes no tanque de flotação, mais precisamente na zona de contato, variando o comprimento da zona de contato (L_{zc}), sendo $L_{zc} = 0,09$ m na configuração A e de $L_{zc} = 0,14$ m na configuração B.

Para a configuração A, foram estudadas três diferentes alturas da parede da zona de contato, e para configuração B foram estudadas quatro diferentes alturas da parede da zona de contato o que implicou na mudança do tempo de detenção hidráulica (T_{zc}). Em cada configuração, foram realizados ensaios com e sem módulos de tela metálica de malha de 25mm no interior da zona de contato, podendo variar assim o gradiente médio de velocidade. Esta malha foi escolhida por ter sido a que apresentou o melhor resultado na pesquisa de SOUZA (2012). Também para cada configuração da Zona de Contato foram realizadas três razões de recirculação as quais geraram diferentes valores de concentração de microbolhas de ar (A/V). A Tabela 3 apresenta as medidas da câmara de flotação durante os ensaios.

Tabela 3: Medidas da câmara de flotação.

Largura da zona de contato	405 mm
Comprimentos da zona de contato (L_{zc})	Conf. A 90 mm
	Conf. B 140 mm
Alturas do anteparo da zona de contato (H_{zc})	Conf. A (2,01; 1,56; 1,12) m
	Conf. B (2,01; 1,30; 1,00; 0,72) m
Largura da zona de separação (B_{zc})	405 mm
Comprimento da zona de separação (L_{zs})	825 mm

Para cada configuração na unidade piloto obtiveram-se diferentes valores de velocidade *cross-flow* (Equação 03), que é função da vazão de entrada no tanque de flotação e da área entre o nível d'água no tanque de flotação e o anteparo que separa a zona de contato da zona de separação. A Tabela 4 apresenta os valores de velocidades *cross-flow* obtidos para cada ensaio.

$$V_{cf} = \frac{Q}{h^* \cdot B_{zc}} \quad (\text{Eq. 03})$$

V_{cf} = Velocidade *cross-flow* (m/h).

Q = Vazão de entrada no tanque de flotação (4,6 m³/h)

h^* = Altura do nível d'água acima do anteparo (m)

B_{zc} = Largura da zona de contato (0,405 m)

Tabela 4: Valores de velocidades *cross-flow* obtidos para cada ensaio.

	Altura do anteparo (m)	h^* (m)	V_{cf} (m/h)
Configuração A	2,01	0,25	45
	1,56	0,70	16
	1,12	1,14	10
Configuração B	2,01	0,25	45
	1,30	0,96	12
	1,00	1,26	9
	0,72	1,54	7

4.4.1. Concentração de microbolhas de ar.

Em cada uma das configurações na unidade piloto de FAD foram avaliados três diferentes concentrações de microbolhas de ar, obtidas através das três razões de recirculação (R), 7,0%, 8,0% e 8,5%, que geraram valores de A/V de 3,75; 4,97 e 6,47 g de ar.m⁻³ de água.

Através da Equação (04) proposta por Edzwald (2010), é possível calcular as concentrações de microbolhas de ar (A/V), massa de ar por volume de água.

$$\frac{A}{V} = \left[f * \frac{(P+101,3)}{K_H} * \frac{P_{atm}}{K_H} \right] * \frac{R}{1+R} \quad (\text{Eq. 04})$$

A/V = Razão ar para água (g de ar.m⁻³ 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) ($4,5 \text{ kgf.cm}^{-2} = 441,3 \text{ kPa}$);

P_{atm} = Pressão atmosférica local (kPa) (igual a 96 kPa para a cidade de São Carlos);

K_H = Constante de Henry ($\text{kPa.mg}^{-1}.\text{L}$) (igual a 4,531 kPa/mg.L para a $T=25^\circ\text{C}$);

R = Razão de recirculação.

Na Tabela 5 são apresentadas as concentrações de microbolhas de ar para cada uma das razões de recirculação estudada.

Tabela 5: Concentrações de microbolhas de ar (A/V) para cada razão de recirculação estudada.

R%	Pressão Câmara de Saturação (kgf.cm^{-2})	A/V (g de ar. m^{-3} de água)
7,0	3,0	3,75
8,0	3,5	4,97
8,5	4,3	6,47

4.4.2. Zona de Contato - Taxas de Aplicação Superficial (TAS_{zc}) e Tempos de Contato (T_{zc})

A taxa de aplicação superficial de cada configuração pode ser calculada a partir da Equação (05). Na Tabela 6 são apresentados os valores encontrados de TAS_{zc} para cada configuração e nas Tabelas 7 e 8 os valores de T_{zc} para cada configuração de acordo com a altura (H_{zc}) na zona de contato.

$$TAS_{zc} = \frac{Q}{L*B} \quad (\text{Eq. 05})$$

TAS_{zc} = Taxa de aplicação Superficial na Zona de Contato;

Q = Vazão na zona de contato ($Q+Q_r$);

L = Comprimento da zona de contato (igual a: 0,09 m na configuração A e 0,14 m na configuração B);

B = Largura da zona de contato (0,405 m).

Tabela 6: valores de TASzc para as configurações A e B.

A/V (g de ar.m ⁻³ de água)	Pressão (Kgf/cm ²)	R%	Qr (m ³ /h)	Q+Qr (m ³ /h)	TASzc (m/h) Configuração A (L= 0,09 m)	TASzc (m/h) Configuração B (L= 0,14 m)
3,75	3,0	7,0	0,322	4,92	134,98	86,77
4,97	3,5	8,0	0,368	4,97	136,35	87,65
6,47	4,3	8,5	0,391	4,99	136,90	88,01
Médias das TASzc					~ 136,08	~ 87,48

Tabela 7: Tzc para a Configuração A.

TASzc (m/h) Configuração A (L= 0,09 m)	Hzc (m)	Tzc (s)
136,08	2,01	53,17
136,08	1,56	41,27
136,08	1,12	29,63

Tabela 8: Tzc para a Configuração B.

TASzc (m/h) Configuração B (L= 0,14 m)	Hzc (m)	Tzc (s)
87,48	2,01	82,72
87,48	1,30	53,50
87,48	1,00	41,15
87,48	0,72	29,63

4.4.3. Gradiente médio de velocidade na zona de contato

Para cada configuração na unidade piloto de FAD foram analisados dois valores de gradiente médio de velocidade na zona de contato (G_{zc}), este valor é variado pela inserção ou não do módulo contendo tela de malha #25mm na configuração A e B.

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 (06) proposta por Ritcher (2009), e com os resultados apresentados na Tabela 9.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} * \frac{TAS_{zc}^{1,5}}{Rh^{0,67}} * \eta \quad (\text{Eq. 06})$$

γ = Peso específico da água (N/m³) (igual a 9777,58 N/m³ para T= 25°C);

μ = Viscosidade dinâmica (Ns/m²) (igual a 0,000868 Ns/m² para a água de estudo a T = 25°C);

TAS_{zc} = Taxa de aplicação superficial (m/s) (igual a: 133 ± 3 m/h na zona de contato da configuração A e 86 ± 1 m/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 Rh é dado pela equação (07).

$$Rh = \frac{A}{P_{molhado}} \quad (\text{Eq. 07})$$

A = Área perpendicular ao fluxo (m²) (igual a: 0,03645 m² na configuração A e 0,0567 m² na configuração B);

$P_{molhado}$ = Perímetro molhado da área perpendicular ao fluxo (m) (igual a: 0,99 m na configuração A e 1,09 m na configuração B).

Tabela 9: Gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento da água na zona de contato da UPFAD, para as configurações A e B sem o uso da tela.

Configuração	TASzc (m/h)	Rh (m)	Gzc (s ⁻¹)
A	136,08	0,037	2,25
B	87,48	0,052	0,92

A Equação (08) proposta por Richter (1991) foi utilizada para os cálculos de gradiente médio de velocidade induzidos pela presença de telas.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * TASzc * A * h}{\mu * V}} \quad (\text{Eq. 08})$$

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°C);

$TASzc$ = Taxa de aplicação superficial (m/s) (igual a: 132,98 ± 2,70 m/h na configuração A e 86,13 ± 1,42 m/h na configuração B);

A = Área perpendicular ao fluxo (m²) (igual a: 0,03645 m² na configuração A e 0,0567 m² na 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 = 25°C);

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).

Equação (09) corresponde a perda de carga (h):

$$h = K * \frac{TASzc^2}{2 * g} \quad (\text{Eq. 09})$$

K = Coeficiente de perda de carga;

g = Aceleração gravitacional (m/s²) (igual a 9,807 m/s²).

Equação (10) corresponde ao coeficiente de perda de carga (K):

$$K = 0,55 * \frac{1-\varepsilon^2}{\varepsilon^2} \quad (\text{Eq. 10})$$

ε = Porosidade da tela.

Equação (11) corresponde a porosidade da tela (ε):

$$\varepsilon = (1 - n * d)^2 \quad (\text{Eq. 11})$$

n = número de fios de diâmetro (d) por unidade de comprimento de tela.

A tela usada neste trabalho foi a de modelo Hobby (malha #25mm), cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 10. A Tabela 11 apresenta o gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento da água na zona de contato da UPFAD, para as configurações A e B com a inserção da tela #25mm, e a Tabela 12 apresenta um resumo dos gradientes médio de velocidade para as configurações A e B, com e sem o uso da tela #25mm.

Tabela 10: Características da tela utilizada nos ensaios.

Modelo	Dimensões da malha (mm)	Diâmetro dos fios (mm)
Hobby	25 x 25	1,24

Tabela 11: Gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento da água na zona de contato da UPFAD, para as configurações A e B com o uso da tela.

	TASzc (m/h)	E	K	h	V	Gzc (s ⁻¹)
Conf. A	136,08	0,9056	0,1206	8,79*10 ⁻⁶	0,003645	6,12
Conf. B	87,48	0,9056	0,1206	3,63*10 ⁻⁶	0,005670	3,15

Tabela 12: Gradiente médio de velocidade decorrente do escoamento da água na zona de contato da UPFAD, para as configurações A e B.

	TASzc		Gzc (s⁻¹)
Configuração A	136,08	SEM TELA	2,25
		TELA HOBBY (#25mm)	6,12
Configuração B	87,48	SEM TELA	0,92
		TELA HOBBY (#25mm)	3,15

4.5. Fluxograma das configurações A e B dos ensaios realizados na UPFAD.

As Figuras 23 e 24 apresentam os fluxogramas dos ensaios que foram desenvolvidos nesta pesquisa na UPFAD.

Figura 23: Fluxograma da configuração A dos ensaios realizados na pesquisa.

Figura 24: Fluxograma da configuração B dos ensaios realizados na pesquisa.

4.6. Monitoramento dos ensaios

Os ensaios realizados na UPFAD nesta pesquisa foram monitorados para que fossem alcançadas as melhores condições experimentais. Todas as variáveis envolvidas foram controladas entre cada coleta: vazão de entrada, vazão de descarte após a floculação, vazão de recirculação, pressão na câmara de coagulante, pH da água coagulada e potencial Zeta.

Foram feitas coletas de amostra de água bruta sintética, água coagulada e água flotada. Para as amostras de água flotada, a turbidez era medida até o ponto de estabilização, assim que fosse observado a estabilização da turbidez eram feitas 4 coletas com intervalos de 10 min para o preparo de uma amostra composta deste ponto.

A Tabela 13 apresenta os parâmetros analisados para cada amostra coletada. Para obtenção dos resultados as leituras e análises propostas foram desenvolvidas no LATAR/SHS/EESC/USP, seguindo os procedimentos descritos pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005).

Tabela 13: Análises e leituras realizadas na pesquisa.

PARÂMETROS	Água Bruta	Água Coagulada	Água Flotada
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	X		
Condutividade (µs/cm)	X		
Cor (uH)	X		X
Turbidez (NTU)	X		X
SST (mg/L)	X	X	
Absorbância 254nm	X		X
Potencial Zeta (mV)		X	
pH		X	

5. Resultados

As Tabelas 14 e 15 apresentam os valores médios com seu desvio padrão dos parâmetros analisados da água bruta e da água coagulada.

Tabela 14: Características da água bruta.

Parâmetros	Valor
Absorbância 254 nm	0,044±0,004
Condutividade (µs/cm)	55,70±2,72
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	26,30±1,59
Turbidez (NTU)	7,43±0,24
Cor verdadeira (uH)	<17,5
Cor aparente (uH)	38
SST (mg/L)	7,74±0,73

Tabela 15: Características da água coagulada.

Parâmetros	Valor
pH	6,5±0,1
PZ (mV)	0±2
SST (mg/L)	21,06±0,98

5.1. Análise dos resultados obtidos em termos de eficiência de remoção de turbidez.

5.1.1. Resultados obtidos para o parâmetro Turbidez na configuração A (TAS_{zc} = 136 m/h e valores de G_{zc}= 6,1 s⁻¹ e de 2,2 s⁻¹).

A Tabela 16 apresenta as leituras de turbidez das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração A (TAS_{zc}= 136 m/h), com o uso da tela de 25 mm (G_{zc}= 6,1s⁻¹) e sem o uso da tela (G_{zc}= 2,2 s⁻¹) para os T_{zc} de 53, 41 e 29 s e A/V de 3,8, 5,0 e 6,5 g/m³. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

A partir da média dos resultados de ensaio e sua respectiva repetição, apresentados na Tabela 16, foi construído o gráfico apresentado na Figura 25, o qual compara a eficiência de remoção da turbidez na configuração A para os ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm e sem o uso da tela.

Tabela 16: Resultados de turbidez da configuração A (TASzc = 136 m/h e Gzc = 6,1 s⁻¹ e 2,2 s⁻¹).

Configuração A (TASzc = 136 m/h)			Turbidez			
			Com tela 25mm (Gzc= 6,1 s ⁻¹)		Sem tela (Gzc= 2,2 s ⁻¹)	
A/V (g/m ³)	Tzc (s)		Residual (NTU)	Eficiência de remoção (%)	Residual (NTU)	Eficiência de remoção (%)
---	53	Bruta	7,91	---	7,39	---
---	41	Bruta	7,22	---	7,78	---
---	29	Bruta	7,73	---	7,47	---
3,8	53	Ensaio E1	1,35	82,9	1,82	75,4
3,8	53	Réplica E1	1,39	82,4	1,93	73,9
3,8	41	Ensaio E2	1,19	83,5	1,45	81,4
3,8	41	Réplica E2	1,04	85,6	1,47	81,1
3,8	29	Ensaio E3	1,52	80,3	1,59	78,7
3,8	29	Réplica E3	1,85	76,1	1,62	78,3
5,0	53	Ensaio E4	0,983	87,6	1,17	84,2
5,0	53	Réplica E4	0,945	88,1	1,21	83,6
5,0	41	Ensaio E5	0,743	89,7	1,29	83,4
5,0	41	Réplica E5	0,722	90,0	1,18	84,8
5,0	29	Ensaio E6	1,56	79,8	1,52	79,7
5,0	29	Réplica E6	1,62	79,0	1,38	81,5
6,5	53	Ensaio E7	1,05	86,7	1,31	82,3
6,5	53	Réplica E7	1,09	86,2	1,22	83,5
6,5	41	Ensaio E8	0,984	86,4	1,41	81,9
6,5	41	Réplica E8	0,899	87,5	1,38	82,3
6,5	29	Ensaio E9	1,3	83,2	1,83	75,5
6,5	29	Réplica E9	1,42	81,6	1,89	74,7

Figura 25: Eficiência de remoção (%) de turbidez na configuração A ($TAS_{zc}=136$ m/h).

Na Figura 25, foi possível observar que para os T_{zc} de 53 e 41 s a eficiência de remoção de turbidez foi maior nos ensaios realizados com tela ($G_{zc} = 6,1$ s $^{-1}$) em relação aos ensaios sem tela ($G_{zc} = 2,2$ s $^{-1}$). Também foi possível notar que para estes dois tempos (53 e 41 s) quando A/V passou de 3,8 g/m^3 para 5,0 g/m^3 houve um acréscimo na eficiência de remoção de turbidez, e ao passar de 5,0 g/m^3 para 6,5 g/m^3 ocorreu um decréscimo na eficiência de remoção da turbidez, indicando a provável existência de um valor ótimo de A/V em torno de 5,0 g/m^3 , para essa configuração da ZC.

Já para o T_{zc} de 29 segundos na configuração A foi possível notar que para A/V de 3,8 e 5,0 g/m^3 não ocorreu uma mudança significativa na eficiência de remoção de turbidez para os ensaios com tela ($G_{zc} = 6,1$ s $^{-1}$) e sem tela ($G_{zc} = 2,2$ s $^{-1}$), porém para A/V de 6,5 g/m^3 no T_{zc} de 29 s, foi possível observar que os ensaios realizados com tela (IDA e VOLTA) obtiveram uma média de remoção de aproximadamente 7% maior do que os ensaios realizados sem o uso da tela.

Através deste gráfico foi possível observar que a melhor eficiência de remoção de turbidez na configuração A foi para o T_{zc} de 41 s com o uso da tela ($G_{zc} = 6,1$ s $^{-1}$) e A/V de 5,0 g/m^3 obtendo uma eficiência de remoção de turbidez de 90%.

5.1.2. Resultados obtidos para o parâmetro Turbidez na configuração B (TASzc= 87 m/h e Gzc= 3,2 s⁻¹ e 0,9 s⁻¹).

A Tabela 17 apresenta as leituras de turbidez das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração B (TASzc = 87 m/h), com o uso da tela de 25 mm (Gzc=3,2 s⁻¹) e sem o uso da tela (Gzc= 0,9 s⁻¹) para os Tzc de 82, 53, 41 e 29 s e A/V de 3,8, 5,0 e 6,5 g/m³. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

A partir da média dos resultados de ensaio e sua respectiva repetição, apresentados na Tabela 17, foi construído o gráfico apresentado na Figura 26, o qual compara a eficiência de remoção da turbidez na configuração B para os ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm e sem o uso da tela.

Tabela 17: Resultados de turbidez da configuração B (TASzc = 87 m/h e Gzc = 3,2 s⁻¹ e 0,9 s⁻¹).

Configuração B (TASzc= 87m/h)			Turbidez			
			Com tela 25mm (Gzc= 3,2 s ⁻¹)		Sem tela (Gzc= 0,9 s ⁻¹)	
A/V (g/m ³)	Tzc (s)		Residual (NTU)	Eficiência de remoção (%)	Residual (NTU)	Eficiência de remoção (%)
---	82	Bruta	7,53	---	7,27	---
---	53	Bruta	7,24	---	7,36	---
---	41	Bruta	7,07	---	7,22	---
---	29	Bruta	7,56	---	7,2	---
3,8	82	Ensaio E1	1,34	82,2	2,13	70,7
3,8	82	Réplica E1	1,29	82,9	2,17	70,2
3,8	53	Ensaio E2	1,12	84,5	1,39	81,1
3,8	53	Réplica E2	1,15	84,1	1,42	80,3
3,8	41	Ensaio E3	1,45	79,5	1,87	74,1
3,8	41	Réplica E3	1,37	80,6	1,95	73,0
3,8	29	Ensaio E4	2,02	73,3	2,56	64,4
3,8	29	Réplica E4	1,98	73,8	2,47	65,7
5,0	82	Ensaio E5	1,42	81,1	1,63	77,6
5,0	82	Réplica E5	1,39	81,5	1,49	79,5
5,0	53	Ensaio E6	1,15	83,7	1,51	79,1
5,0	53	Réplica E6	1,14	83,9	1,56	78,4
5,0	41	Ensaio E7	0,799	89,0	1,28	82,6
5,0	41	Réplica E7	0,831	88,5	1,39	81,1
5,0	29	Ensaio E8	1,89	75,0	1,98	72,5
5,0	29	Réplica E8	1,92	74,6	1,93	73,2
6,5	82	Ensaio E9	1,63	78,4	2,54	65,1
6,5	82	Réplica E9	1,68	77,7	2,43	66,6
6,5	53	Ensaio E10	1,07	85,2	1,57	78,7
6,5	53	Réplica E10	1,1	84,8	1,59	78,4
6,5	41	Ensaio E11	0,803	88,6	1,53	78,8
6,5	41	Réplica E11	0,881	87,5	1,47	79,6
6,5	29	Ensaio E12	1,97	73,9	2,42	66,4
6,5	29	Réplica E12	1,93	74,5	2,48	65,6

Figura 26: Eficiência de remoção (%) de turbidez na configuração B (TASzc=87 m/h).

Na Configuração B (TASzc= 87 m/h), foram realizados ensaios em quatro Tzc distintos (82, 53, 41 e 29 s), a partir do gráfico apresentado na Figura 26, foi possível observar que para todos os Tzc a eficiência de remoção de turbidez foi maior nos ensaios em que foi utilizada a tela #25 mm ($G_{zc}= 3,2 \text{ s}^{-1}$).

Para o Tzc de 29 s na configuração B, todos os ensaios com o uso da tela de #25 mm ($G_{zc}= 3,2 \text{ s}^{-1}$) e sem o uso da tela de #25mm ($G_{zc}= 0,9 \text{ s}^{-1}$) foi observado que as eficiências de remoção da turbidez ficaram abaixo de 75%.

Para os ensaios nos Tzc de 82 e 29 s, sem o uso da tela de #25 mm, foi possível observar que para A/V de 3,8 e 6,5 g/m³ a eficiência de remoção de turbidez permaneceu abaixo de 70%, apresentando as menores eficiências de remoção de turbidez para os ensaios feitos na configuração B.

A melhor eficiência de remoção de turbidez na configuração B (TASzc= 87 m/h) foi para o Tzc de 41 s com o uso da tela de #25mm ($G_{zc}= 3,2 \text{ s}^{-1}$) e A/V de 5,0 g/m³ obtendo uma eficiência de remoção de 90%.

Foi possível observar que para as duas configurações estudadas, A (TASzc= 136 m/h) e B (TASzc= 87 m/h), os melhores resultados para a remoção de turbidez foram obtidos no Tzc de 41 s, A/V de 5,0 g/m³ e com o uso da Tela de #25mm.

5.1.3. Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.1.1 e 5.1.2.

Sabendo que a introdução do módulo com tela #25 mm apresentou efeito positivo no desempenho da unidade FAD, conforme comentado nos itens anteriores, no presente item é efetuada a comparação das melhores situações em cada uma das duas configurações estudadas (A e B). Ou seja, será apresentada a comparação dos resultados de remoção de turbidez obtidos na melhor situação da configuração A (obtida com a presença de tela #25mm na ZC) com aqueles obtidos na melhor situação da Configuração B (obtida também quando foi introduzido módulo com tela #25mm) Assim, foi elaborada a Figura 27 (com base nos resultados das Tabelas 16 e 17), em que são mostrados conjuntamente os resultados de eficiência de remoção de turbidez da configuração A (TASzc= 136 m/h e $G_{zc}= 6,1 \text{ s}^{-1}$) e na configuração B (TASzc= 87 m/h e $G_{zc}= 3,2 \text{ s}^{-1}$) nas situações em que foram introduzidos módulos com o uso da tela #25mm.

Figura 27: Eficiência de remoção (%) de turbidez nas configurações A e B utilizando a Tela de #25mm.

De modo geral, ao analisar o gráfico apresentado na Figura 27 foi possível observar que existe um pico de eficiência de remoção de turbidez quando a unidade piloto operou com valores de T_{zc} em torno de 41 e 53 s. Tanto para o T_{zc} de 53 s quanto para o T_{zc} de 41 s, o melhor resultado apresentou-se no A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$.

Para o T_{zc} de 53 s e A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$, a eficiência de remoção de turbidez foi 4% maior para a Configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$ e $G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$), indicando que as unidades FAD desse tipo devem operar preferencialmente com valores de G_{zc} mais elevados que $3,2 \text{ s}^{-1}$, como por exemplo em torno de $6,1 \text{ s}^{-1}$.

No gráfico, foi possível observar que no T_{zc} de 29 s ocorreu uma melhor eficiência de remoção de turbidez para a configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$ e $G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$), a qual possui uma maior TAS_{zc} e G . Neste mesmo T_{zc} , para A/V de $3,8$ e $5,0 \text{ g/m}^3$ a configuração A apresentou aproximadamente 5% de eficiência maior em relação a configuração B, já para A/V de $6,5 \text{ g/m}^3$ a configuração A apresentou uma melhora de aproximadamente 8% em relação a configuração B. Porém de maneira geral foi possível observar que para este T_{zc} de 29 s os resultados foram os que apresentaram menor eficiência de remoção de turbidez em relação aos outros T_{zc} estudados.

5.1.4. Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.1.1 e 5.1.2

Com a finalidade de se verificar a influência apenas do valor de TAS_{zc} e G_{zc} , sem a interferência (positiva, conforme já visto) da introdução dos módulos com telas na ZC, a seguir, ainda com base nos dados das Tabelas 16 e 17, foi elaborado o gráfico, apresentado na Figura 28, com dados de eficiência de remoção de turbidez referentes à situação investigada com a configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$) em que não foi utilizado módulo com telas ($G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$), juntamente com os dados de remoção de turbidez obtidos na situação da Configuração B ($TAS_{zc} = 87 \text{ m/h}$) em que também não foi utilizado módulo com tela ($G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$).

Figura 28: Eficiência de remoção (%) de turbidez nas configurações A e B sem o uso da tela.

No gráfico apresentado na Figura 28, foi possível observar que para praticamente todos os ensaios realizados sem o uso da tela, a configuração A (TASzc = 136 m/h e $G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$) apresentou uma melhor eficiência de remoção em relação a configuração B (TASzc = 87 m/h e $G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$), sendo que apenas no ensaio com Tzc de 53 s e A/V de 3,8 g/m³ a configuração B apresentou uma eficiência de remoção de turbidez pouco maior que a da configuração A.

No Tzc de 29 s esta diferença entre as configurações A e B na eficiência de remoção da turbidez foi maior chegando a 13% para A/V de 3,8 g/m³.

Esses resultados, a exemplo do que foi discutido no final do item anterior, indicam claramente que unidades FAD desse tipo devem operar preferencialmente com valores de G_{zc} mais elevados (entre os estudados neste trabalho), mesmo quando não são utilizados módulos com tela na ZC.

Assim, de maneira geral, os resultados de remoção de turbidez indicam que o valor de G_{zc} adotado no projeto de uma unidade FAD, do tipo aqui investigada, influi significativamente na eficiência de remoção de turbidez. Sendo que, sem o uso de telas, o aumento de G_{zc} causado pelo aumento de TASzc de 87 m/h ($G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$) para 136 m/h ($G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$) causou apenas ligeira melhora no desempenho da flotação (de 83% para

84%, considerando a melhor situação obtida com $A/V=5,0 \text{ g/m}^3$ e $T_{zc}=41\text{s}$). Por outro lado, a introdução de telas na configuração B causou aumento de G_{zc} de $0,9$ para $3,2 \text{ s}^{-1}$ e provocou aumento significativo da eficiência de remoção de turbidez de 83% para 89%. Por outro lado, considerando as mesmas situações quanto à A/V ($5,0 \text{ g/m}^3$) e à T_{zc} (41s), porém aumentando-se o valor da TAS_{zc} de 87 para 136 m/h, com módulo de telas na ZC ($G_{zc}=6,1 \text{ s}^{-1}$), verificou-se mais um ligeiro incremento na eficiência de remoção de turbidez, atingindo 90%.

Portanto, os resultados mostram que a situação de projeto da zona de contato (ZC) desse tipo de unidade mais adequada, dentre as estudadas, seria: $G_{zc}=6,1 \text{ s}^{-1}$ (obtido com imposição de $TAS_{zc}=136 \text{ m/h}$ associado a presença do módulo de telas #25 mm na ZC), associado a um T_{zc} de 41 s^{-1} e um valor de A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$, como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29: Eficiência de remoção (%) de turbidez nas configurações A e B com e sem o uso da tela para o T_{zc} de 41 s e A/V de $5,0 \text{ g.m}^{-3}$.

5.2. Análise dos resultados obtidos em termos de eficiência de remoção de Cor.

5.2.1. Resultados obtidos para o parâmetro Cor na configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$ e $G_{zc}= 6,1 \text{ s}^{-1}$ e $2,2 \text{ s}^{-1}$).

A Tabela 18 apresenta as leituras de Cor das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$), com o uso da tela de 25 mm

($G_{zc}=6,12 \text{ s}^{-1}$) e sem o uso da tela ($G_{zc}= 2,2 \text{ s}^{-1}$) para os T_{zc} de 53, 41 e 29 s e A/V de 3,8, 5,0 e 6,5 g/m^3 . Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

A partir da média dos resultados de ensaio e sua respectiva repetição, apresentados na Tabela 18, foi construído o gráfico apresentado na Figura 30, o qual compara a eficiência de remoção da cor na configuração A para os ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm e sem o uso da tela.

Tabela 18: Resultados de Cor da configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$ e $G = 6,1 \text{ s}^{-1}$ e $2,2 \text{ s}^{-1}$).

Configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$)			Cor			
			Com tela 25mm ($G_{zc}= 6,1 \text{ s}^{-1}$)		Sem tela ($G_{zc}= 2,2 \text{ s}^{-1}$)	
A/V (g/m^3)	T_{zc} (s)		Residual (uH)	Eficiência de remoção (%)	Residual (uH)	Eficiência de remoção (%)
---	53	Bruta	35,0	---	38,0	---
---	41	Bruta	38,0	---	41,0	---
---	29	Bruta	36,0	---	37,0	---
3,8	53	Ensaio E1	3,6	89,7	4,3	88,7
3,8	53	Réplica E1	3,8	89,1	4,5	88,2
3,8	41	Ensaio E2	3,1	91,8	3,1	92,4
3,8	41	Réplica E2	3,2	91,6	3,5	91,5
3,8	29	Ensaio E3	3,4	90,6	3,0	91,9
3,8	29	Réplica E3	3,0	91,7	3,6	90,3
5,0	53	Ensaio E4	2,5	92,9	3,1	91,8
5,0	53	Réplica E4	2,8	92,0	3,0	92,1
5,0	41	Ensaio E5	1,8	95,3	2,5	93,9
5,0	41	Réplica E5	2,1	94,5	2,7	93,4
5,0	29	Ensaio E6	2,4	93,3	2,9	92,2
5,0	29	Réplica E6	2,6	92,8	2,7	92,7
6,5	53	Ensaio E7	4,0	88,6	4,6	87,9
6,5	53	Réplica E7	4,1	88,3	4,9	87,1
6,5	41	Ensaio E8	2,0	94,7	2,5	93,9
6,5	41	Réplica E8	2,2	94,2	2,4	94,1
6,5	29	Ensaio E9	3,5	90,3	4,2	88,6
6,5	29	Réplica E9	3,6	90,0	3,8	89,7

Figura 30: Eficiência de remoção (%) de cor na configuração A (TASzc=136 m/h).

Pelo gráfico da figura 30, foi possível observar que para os três Tzc estudados na configuração A (53, 41 e 29 s), a eficiência de remoção de cor foi maior nos ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm ($G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$) e A/V de 5,0 g/m³, com um maior destaque para o Tzc de 41 s no qual apresentou a melhor eficiência de remoção de cor, ficando próxima de 95%.

Apesar dos ensaios realizados com o uso da tela #25 mm ($G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$) terem apresentados melhores resultados, a diferença em relação aos ensaios em que não foi utilizada a tela ($G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$) não passou de 1,2%.

Também foi possível observar que para todos os Tzc estudados na configuração A (53, 41 e 29 s), tanto nos ensaios com o uso da tela de #25 mm quanto os ensaios sem o uso de tela, ao passar A/V de 3,8 g/m³ para 5,0 g/m³ ocorreu uma melhora na eficiência de remoção de cor ficando em torno de 3% este acréscimo, e ao passar A/V de 5,0 g/m³ para 6,5 g/m³ ocorreu um decréscimo na eficiência de remoção da cor, sendo este mais significativo no Tzc de 53 s, apresentando aproximadamente 4% de diferença.

Para os ensaios desta configuração A, com e sem o uso da tela, foi possível perceber que há uma melhora de eficiência de remoção da cor, quando o Tzc é passado de

53 para 41 s, chegando a 6% para A/V de 6,5 g/m³, e ao passar o T_{zc} de 41 para 29 s a um decréscimo nesta eficiência de remoção de cor, chegando a 4% para A/V de 6,5 g/m³. Sendo assim, para estes ensaios a melhor faixa de remoção de cor nesta configuração esteve entre os T_{zc} de 53 e 29 s, apresentando um pico no T_{zc} de 41 s, sendo melhorado com o uso da tela de #25mm.

5.2.2. Resultados obtidos para o parâmetro Cor na configuração B (TAS_{zc}= 87 m/h e G_{zc}= 3,2 s⁻¹ e 0,9 s⁻¹).

A Tabela 19 apresenta as leituras de cor das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração B (TAS_{zc}= 87 m/h), com o uso da tela de 25 mm (G_{zc}= 3,2 s⁻¹) e sem o uso da tela (G_{zc}= 0,9 s⁻¹) para os T_{zc} de 53, 41 e 29 s e A/V de 3,8, 5,0 e 6,5 g/m³. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

A partir da média dos resultados de ensaio e sua respectiva repetição, apresentados na Tabela 19, foi construído o gráfico apresentado na Figura 31, o qual compara a eficiência de remoção da cor na configuração B para os ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm e sem o uso da tela.

Tabela 19: Resultados de cor da configuração B (TASzc= 87 m/h e G= 3,2 s⁻¹ e 0,9 s⁻¹).

Configuração B (TASzc = 87 m/h)			Cor			
			Com tela 25mm (Gzc= 3,2 s ⁻¹)		Sem tela (Gzc= 0,9 s ⁻¹)	
A/V (g/m ³)	Tzc (s)		Residual (uH)	Eficiência de remoção (%)	Residual (uH)	Eficiência de remoção (%)
---	82	Bruta	43,0	---	37,0	---
---	53	Bruta	41,0	---	35,0	---
---	41	Bruta	37,0	---	35,0	---
---	29	Bruta	35,0	---	38,0	---
3,8	82	Ensaio E1	3,1	92,8	2,4	93,5
3,8	82	Réplica E1	2,9	93,3	2,4	93,5
3,8	53	Ensaio E2	2,1	94,9	2,2	93,7
3,8	53	Réplica E2	2,2	94,6	2,1	94,0
3,8	41	Ensaio E3	1,8	95,1	2,4	93,1
3,8	41	Réplica E3	2,0	94,6	2,9	91,7
3,8	29	Ensaio E4	3,8	89,1	5,4	85,8
3,8	29	Réplica E4	3,4	90,3	5,0	86,8
5,0	82	Ensaio E5	3,5	91,9	4,3	88,4
5,0	82	Réplica E5	3,3	92,3	4,0	89,2
5,0	53	Ensaio E6	2,3	94,4	3,0	91,4
5,0	53	Réplica E6	2,5	93,9	3,0	91,4
5,0	41	Ensaio E7	2,0	94,6	2,5	92,9
5,0	41	Réplica E7	2,0	94,6	2,2	93,7
5,0	29	Ensaio E8	3,8	89,1	3,8	90,0
5,0	29	Réplica E8	3,7	89,4	4,0	89,5
6,5	82	Ensaio E9	3,6	91,6	4,2	88,6
6,5	82	Réplica E9	3,2	92,6	4,7	87,3
6,5	53	Ensaio E10	2,5	93,9	3,2	90,9
6,5	53	Réplica E10	2,6	93,7	2,6	92,6
6,5	41	Ensaio E11	2,0	94,6	2,9	91,7
6,5	41	Réplica E11	2,1	94,3	2,7	92,3
6,5	29	Ensaio E12	4,1	88,3	5,5	85,5
6,5	29	Réplica E12	4,3	87,7	5,1	86,6

Figura 31: Eficiência de remoção (%) de cor na configuração B (TASzc=87 m/h).

Pela Figura 31, foi possível observar que para todos os Tzc estudados na configuração B (82, 53, 41 e 29 s) a remoção de cor foi mais eficiente na maioria dos ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm ($G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$).

De modo geral, os Tzc 53 e 41 s apresentaram as melhores eficiências de remoção de cor, já os ensaios realizados com o Tzc de 29 s, apresentaram de maneira geral os resultados menos satisfatórios.

Para os ensaios realizados com Tzc de 82 segundos foi possível observar que para A/V de $3,8 \text{ g/m}^3$ os ensaios com o uso da tela de #25 mm e sem o uso da tela obtiveram a mesma eficiência de remoção, já para A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$ e $6,5 \text{ g/m}^3$ os ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm apresentaram uma eficiência de 3% a mais que os ensaios realizados sem o uso da tela.

5.2.3. Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.2.1 e 5.2.2.

De acordo com as Tabelas 18 e 19, foi elaborado o gráfico, apresentado na figura 32, de eficiência de remoção de cor obtida na configuração A (TASzc= 136 m/h e $G_{zc} = 6,2 \text{ s}^{-1}$) e B (TASzc= 87 m/h e $G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$) com o uso da tela #25mm.

Figura 32: Eficiência de remoção (%) de cor nas configurações A e B utilizando a Tela de #25mm.

No gráfico apresentado na Figura 32, foi possível observar que para os Tzc de 53 s a configuração B (TASzc = 87 m/h e Gzc= 3,2 s⁻¹) apresentou resultados de eficiência de remoção de cor melhores que a configuração A (TASzc = 136 m/h e Gzc= 6,1 s⁻¹), sendo esta diferença de 5,4 % para A/V de 3,8 e 6,5 g/m³, e de 1,7% para A/V de 5,0 g/m³.

Já para o Tzc de 29 s os resultados dos ensaios que obtiveram maiores eficiências de remoção de cor foram os da configuração A (TASzc = 136 m/h e Gzc= 6,1 s⁻¹), sendo esta diferença de 1,4% para A/V de 3,8 g/m³, 3,8% para A/V de e 5,0 g/m³ e 2,1% para A/V de 6,5 g/m³.

Para o Tzc de 41 s, os ensaios realizados com A/V de 3,8 g/m³ obtiveram melhores eficiências de remoção de cor para a configuração B sendo de 3% a mais que a configuração A, porém para A/V de e 5,0 g/m³ e 6,5 g/m³, as eficiências de remoção de cor foram as mesmas para a configuração A e B.

Estes ensaios mostraram que para TASzc elevadas (136 m/h) a UPFAD operou melhor com Tzc de 41 e 29 s, porém com TASzc mais baixas (87 m/h) a UPFAD apresentou melhores eficiências de remoção para Tzc maiores 82, 53 e 41 s. Sendo que existiu um Tzc ótimo de remoção para ambas TASzc estudadas de 41 s.

5.2.4. Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.2.1 e 5.2.2.

De acordo com as Tabelas 18 e 19, foi elaborado o gráfico, apresentado na Figura 33, de eficiência de remoção de cor obtido na configuração A ($TAS_{zc} = 136$ m/h e $G_{zc} = 2,2$ s⁻¹) e B ($TAS_{zc} = 87$ m/h e $G_{zc} = 0,9$ s⁻¹) sem o uso da tela.

Figura 33: Eficiência de remoção (%) de cor nas configurações A e B sem o uso da tela.

No gráfico, apresentado na Figura 33, foi possível observar que para o T_{zc} de 53 s a configuração B ($TAS_{zc} = 87$ m/h e $G_{zc} = 0,9$ s⁻¹) apresentou resultados de eficiência de remoção de cor melhores que a configuração A ($TAS_{zc} = 136$ m/h e $G_{zc} = 2,2$ s⁻¹) sendo esta diferença de 5,5% para A/V de 3,8 g/m³ e 4,2% para A/V de 6,5 g/m³, já para A/V de 5,0 g/m³ as eficiências de remoção de cor nas duas configurações foram bem próximas.

Para o T_{zc} de 29 s a configuração A ($TAS_{zc} = 136$ m/h e $G_{zc} = 2,2$ s⁻¹), apresentou resultados de eficiência de remoção de cor melhores que a configuração B ($TAS_{zc} = 87$ m/h e $G_{zc} = 0,9$ s⁻¹) sendo esta diferença de 4,8% para A/V de 3,8 g/m³, 2,7% para A/V de 5,0 g/m³ e 3,1% para A/V de 6,5 g/m³.

Para o T_{zc} de 41 s, os ensaios realizados com A/V de 6,5 g/m³ obtiveram melhores eficiências de remoção de cor para a configuração A sendo de 2% a mais que a

configuração B, porém para A/V de 3,8 g/m³ 5,0 g/m³, as eficiências de remoção de cor foram as mesmas para a configuração A e B.

Foi possível observar que tanto para os ensaios com o uso da tela #25 mm ($G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$ e $G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$) quanto para os ensaios realizados sem o uso da tela ($G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$ e $G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$), a TAS_{zc} com valor elevado (136 m/h) fez com que a UPFAD operasse melhor com T_{zc} de 41 e 29 s, porém com TAS_{zc} mais baixa (87 m/h) a UPFAD apresentou melhores eficiências de remoção para T_{zc} maiores 53 e 41 s. Sendo que existiu um T_{zc} ótimo de remoção para ambas TAS_{zc} estudadas de 41 s.

Os resultados de remoção de cor apresentaram as mesmas respostas obtidas para o parâmetro turbidez, indicando que o valor de G_{zc} adotado no projeto de uma unidade FAD, do tipo aqui investigada, influi significativamente na eficiência de remoção de cor. Com a introdução de telas tanto na configuração A, quanto na configuração B, o que causou um aumento de G_{zc} , provocou um ligeiro incremento na eficiência de remoção de cor na ordem de 1%. Para as duas configurações A (TAS_{zc} = 136 m/h) e B (TAS_{zc} = 87 m/h) com A/V = 5,0 g/m³ e T_{zc} = 41 s, com o uso da tela verificou-se a mesma eficiência de remoção de cor, atingindo aproximadamente 95%, sendo este o melhor T_{zc} para ambas TAS_{zc} estudadas.

Portanto, os resultados mostram que a situação de projeto da zona de contato (ZC) desse tipo de unidade mais adequada, dentre as estudadas, seria: $G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$ (obtido com imposição de TAS_{zc} = 136 m/h associado a presença do módulo de telas #25 mm na ZC), associado a um T_{zc} de 41 s e um valor de A/V de 5,0 g/m³, como pode ser observado na figura 34.

Figura 34: Eficiência de remoção (%) de cor nas configurações A e B com e sem o uso da tela para o Tzc de 41 s e A/V de 5,0 g.m⁻³.

5.3. Análise dos resultados obtidos em termos de redução de Absorbância.

5.3.1. Resultados obtidos para o parâmetro Absorbância na configuração A (TASzc= 136 m/h e Gzc = 6,1 s⁻¹ e 2,2 s⁻¹).

A Tabela 20 apresenta as leituras de Absorbância das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração A (TASzc = 136 m/h), com o uso da tela de 25 mm (Gzc = 6,1 s⁻¹) e sem o uso da tela (Gzc = 2,2 s⁻¹) para os Tzc de 53, 41 e 29 s e A/V de 3,8, 5,0 e 6,5 g/m³. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

A partir da média dos resultados de ensaio e sua respectiva repetição, apresentados na Tabela 20, foi construído o gráfico apresentado na Figura 35, o qual compara a eficiência de redução de absorbância na configuração A para os ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm e sem o uso da tela.

Tabela 20: Resultados de Absorbância da configuração A (TASzc= 136 m/h e G= 6,1 s⁻¹ e 2,2 s⁻¹).

Configuração A (TASzc = 136 m/h)			Absorbância 254 nm			
			Com tela 25mm (Gzc= 6,1 s ⁻¹)		Sem tela (Gzc= 2,2 s ⁻¹)	
A/V (g/m ³)	Tzc (s)		Residual	Eficiência de redução (%)	Residual	Eficiência de redução (%)
---	53	Bruta	0,049	---	0,047	---
---	41	Bruta	0,053	---	0,041	---
---	29	Bruta	0,047	---	0,043	---
3,8	53	Ensaio E1	0,011	77,6	0,013	72,3
3,8	53	Réplica E1	0,013	73,5	0,015	68,1
3,8	41	Ensaio E2	0,005	90,6	0,008	80,5
3,8	41	Réplica E2	0,004	92,5	0,009	78,0
3,8	29	Ensaio E3	0,006	87,2	0,010	76,7
3,8	29	Réplica E3	0,007	85,1	0,010	76,7
5,0	53	Ensaio E4	0,008	83,7	0,013	72,3
5,0	53	Réplica E4	0,007	85,7	0,014	70,2
5,0	41	Ensaio E5	0,003	94,3	0,005	87,8
5,0	41	Réplica E5	0,003	94,3	0,007	82,9
5,0	29	Ensaio E6	0,006	87,2	0,011	74,4
5,0	29	Réplica E6	0,005	89,4	0,009	79,1
6,5	53	Ensaio E7	0,009	81,6	0,014	70,2
6,5	53	Réplica E7	0,009	81,6	0,013	72,3
6,5	41	Ensaio E8	0,003	94,3	0,005	87,8
6,5	41	Réplica E8	0,003	94,3	0,005	87,8
6,5	29	Ensaio E9	0,005	89,4	0,009	79,1
6,5	29	Réplica E9	0,005	89,4	0,013	69,8

Figura 35: Eficiência de redução (%) de absorbância na configuração A (TASzc=136 m/h).

Na Figura 35, foi possível observar que para todos os ensaios realizados com o uso da tela #25mm ($G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$) a eficiência de remoção foi maior do que os ensaios realizados sem o uso da tela ($G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$).

Para o T_{zc} de 53 s os ensaios realizados com o uso da tela #25mm apresentaram uma eficiência de remoção de absorbância maior em 5% para A/V de $3,8 \text{ g/m}^3$, 13% para A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$ e 10% para A/V de $6,5 \text{ g/m}^3$, em relação aos ensaios realizados sem o uso da tela. Também foi possível perceber que para todos os ensaios, com o uso da tela de #25mm, no T_{zc} de 53 segundos ocorreu um aumento na eficiência de remoção de cor quando o A/V passa de $3,8 \text{ g/m}^3$ para $5,0 \text{ g/m}^3$, e um decréscimo na eficiência de redução de absorbância quando o A/V passa de $5,0 \text{ g/m}^3$ para $6,5 \text{ g/m}^3$.

Pelo gráfico foi possível observar que as melhores eficiências de remoção de absorbância encontram-se no T_{zc} de 41 s para os ensaios realizados com o uso da tela #25mm ($G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$), e apresentaram para A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$ e $6,5 \text{ g/m}^3$ o mesmo resultado de 94,3% de eficiência de remoção.

Para o T_{zc} de 29 s foi possível perceber que os resultados para os ensaios sem o uso da tela ($G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$) foram os que apresentaram os menores valores de eficiência de redução de absorbância, ficando todos abaixo de 75%. E a diferença dos ensaios realizados com o uso da tela ($G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$) para os ensaios realizados sem o uso da tela

($G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$) foram de 9,5% para A/V de $3,8 \text{ g/m}^3$, 11,6% para A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$ e 15% para A/V de $6,5 \text{ g/m}^3$, mostrando portanto que o uso da referida tela foi bem mais vantajoso para estes ensaios realizados na UPFAD.

5.3.2. Resultados obtidos para o parâmetro Absorbância na configuração B ($TAS_{zc} = 87 \text{ m/h}$ e $G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$ e $0,9 \text{ s}^{-1}$).

A Tabela 21 apresenta as leituras de absorbância das amostras compostas obtidas nos ensaios realizados na configuração B ($TAS_{zc} = 87 \text{ m/h}$), com o uso da tela de 25 mm ($G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$) e sem o uso da tela ($G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$) para os T_{zc} de 53, 41 e 29s e A/V de $3,8$, $5,0$ e $6,5 \text{ g/m}^3$. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

A partir da média dos resultados de ensaio e sua respectiva repetição, apresentados na Tabela 21, foi construído o gráfico apresentado na Figura 36, o qual compara a eficiência de redução de absorbância na configuração B para os ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm e sem o uso da tela.

Tabela 21: Resultados de Absorbância da configuração B (TASzc= 87 m/h e Gzc= 3,2 s⁻¹ e 0,9 s⁻¹).

Configuração B (TASzc = 87 m/h)			Absorbância 254 nm			
			Com tela 25mm (Gzc= 3,2 s ⁻¹)		Sem tela (Gzc= 0,9 s ⁻¹)	
A/V (g/m ³)	Tzc (s)		Residual (uH)	Eficiência de redução (%)	Residual (uH)	Eficiência de redução (%)
---	82	Bruta	0,046	---	0,048	---
---	53	Bruta	0,042	---	0,041	---
---	41	Bruta	0,044	---	0,038	---
---	29	Bruta	0,039	---	0,042	---
3,8	82	Ensaio E1	0,008	82,6	0,014	70,8
3,8	82	Réplica E1	0,008	82,6	0,014	70,8
3,8	53	Ensaio E2	0,008	81,0	0,010	75,6
3,8	53	Réplica E2	0,007	83,3	0,011	73,2
3,8	41	Ensaio E3	0,003	93,2	0,007	81,6
3,8	41	Réplica E3	0,005	88,6	0,006	84,2
3,8	29	Ensaio E4	0,010	74,4	0,011	73,8
3,8	29	Réplica E4	0,007	82,1	0,013	69,0
5,0	82	Ensaio E5	0,007	84,8	0,011	77,1
5,0	82	Réplica E5	0,008	82,6	0,013	72,9
5,0	53	Ensaio E6	0,006	85,7	0,011	73,2
5,0	53	Réplica E6	0,007	83,3	0,010	75,6
5,0	41	Ensaio E7	0,005	88,6	0,008	78,9
5,0	41	Réplica E7	0,003	93,2	0,006	84,2
5,0	29	Ensaio E8	0,007	84,1	0,012	71,4
5,0	29	Réplica E8	0,009	76,9	0,011	73,8
6,5	82	Ensaio E9	0,009	80,4	0,017	64,6
6,5	82	Réplica E9	0,007	84,8	0,015	68,8
6,5	53	Ensaio E10	0,007	83,3	0,012	70,7
6,5	53	Réplica E10	0,007	83,3	0,011	73,2
6,5	41	Ensaio E11	0,002	95,5	0,007	81,6
6,5	41	Réplica E11	0,004	90,9	0,006	84,2
6,5	29	Ensaio E12	0,008	79,5	0,011	73,8
6,5	29	Réplica E12	0,007	82,1	0,013	69,0

Figura 36: Eficiência de redução (%) de Absorbância na configuração B (TASzc=87 m/h).

Na Figura 36, foi possível observar que para todos os ensaios realizados com o uso da tela #25mm ($G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$) a eficiência de remoção foi bem mais significativa do que os ensaios realizados sem o uso da tela ($G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$), o mesmo ocorrido na configuração A, onde os ensaios com o uso da tela de #25mm também apresentaram os melhores resultados.

Em relação aos Tzc 82 e 53 segundos, as eficiências de remoção para os ensaios realizados com o uso da tela de #25 mm não sofreram diferenças significativas quanto o Tzc aumentou de 53 para 82 s, ficando todas próximas de 83%.

Para o Tzc de 53 s a diferenças entre os ensaios realizados com o uso da tela de #25mm ($G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$) apresentaram eficiências em torno de 10 % a mais que os ensaios realizados sem o uso da tela ($G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$).

O Tzc que apresentou os melhores resultados foi o de 41 s, todos os ensaios apresentaram eficiência de redução maiores que 80%. Já os ensaios realizados com o uso da tela de #25mm ($G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$) apresentaram eficiências em torno de 9% a mais que os ensaios que não utilizaram a tela ($G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$).

A melhor eficiência de redução para esta configuração B, foi para o Tzc de 41 s com A/V de 6,5 g/m³, e como uso da tela de # 25mm sendo de 93,2%.

5.3.3. Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.3.1 e 5.3.2.

De acordo com as Tabelas 20 e 21, foi elaborado o gráfico, apresentado na figura 37, de eficiência de redução de absorbância obtido na configuração A ($TAS_{zc} = 136$ m/h e $G_{zc} = 6,1$ s⁻¹) e B ($TAS_{zc} = 87$ m/h e $G_{zc} = 3,2$ s⁻¹) com o uso da tela #25 mm.

Figura 37: Eficiência de redução (%) de Absorbância na configuração A e B utilizando a tela de #25 mm.

A partir do gráfico apresentado na Figura 37, foi possível observar um pico na eficiência de remoção de absorbância nos ensaios com T_{zc} de 41 s.

Para os ensaios realizados com T_{zc} de 41 e 29 s os resultados da configuração A ($TAS_{zc} = 136$ m/h e $G_{zc} = 6,1$ s⁻¹) apresentaram melhores eficiências de redução de absorbância em relação a configuração B ($TAS_{zc} = 87$ m/h e $G_{zc} = 3,2$ s⁻¹). Para o T_{zc} de 41 s essa diferença não passou de 3%, porém para o T_{zc} de 29 s a configuração A apresentou uma eficiência em torno de 8% a mais que a configuração B.

Já para o T_{zc} de 53 s a configuração B apresentou resultados de eficiência de redução de absorbância melhores que a configuração A, para A/V 3,8 e 6,5 g/m³, e uma eficiência igual para A/V de 5,0 g/m³.

5.3.4. Comparação dos resultados apresentados nos itens 5.3.1 e 5.3.2.

De acordo com as Tabelas 20 e 21, foi elaborado o gráfico, apresentado na Figura 38, de eficiência de redução de absorvância obtido na configuração A ($TAS_{zc} = 136$ m/h e $G_{zc} = 2,2$ s⁻¹) e B ($TAS_{zc} = 87$ m/h e $G_{zc} = 0,9$ s⁻¹) sem o uso da tela.

Figura 38: Eficiência de redução (%) de Absorvância na configuração A e B sem o uso da tela.

No gráfico apresentado na Figura 38, foi possível observar que para os ensaios realizados sem o uso da tela as maiores eficiências de redução de absorvância foram obtidas no T_{zc} de 41 s, sendo que a melhor remoção foi para a configuração A ($TAS_{zc} = 136$ m/h e $G_{zc} = 2,2$ s⁻¹) com A/V de 6,5 g/m³, sendo esta de 88%.

Para o T_{zc} de 53 s foi possível perceber que a configuração B ($TAS_{zc} = 87$ m/h e $G_{zc} = 0,9$ s⁻¹) apresentou melhores eficiências em relação a configuração A ($TAS_{zc} = 136$ m/h e $G_{zc} = 2,2$ s⁻¹). Já para o T_{zc} de 29 s ocorreu o inverso, com a configuração A apresentando as melhores eficiências de redução.

Podemos observar que para os ensaios realizados com T_{zc} de 53 s a UPFAD operou melhor com TAS_{zc} e G_{zc} mais baixa (87 m/h e 0,9 s⁻¹), já para o T_{zc} menor, 29 s,

a UPFAD apresentou maiores eficiências de redução para TASzc e Gzc mais elevada (136 m/h e $2,2 \text{ s}^{-1}$), sendo que a adoção de valor de Tzc intermediário a estes dois, 41 s, resultou sempre nos melhores resultados, para ambas configurações testados na UPFAD.

Os resultados de absorvância também serviram de base para observar a influência do valor de Gzc adotado no projeto da unidade FAD estudada. Sendo que, sem o uso de telas, o aumento de Gzc causado pelo aumento de TASzc de 87 m/h ($G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$) para 136 m/h ($G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$) causou uma melhora no desempenho da flotação (de 83% para 88%, considerando a melhor situação obtida com $A/V = 6,5 \text{ g/m}^3$ e $T_{zc} = 41 \text{ s}$). Por outro lado, a introdução de telas na configuração B causou aumento de Gzc de 0,9 para $3,2 \text{ s}^{-1}$ e provocou aumento significativo da eficiência de remoção de absorvância de 83% para 93%. Por outro lado, considerando as mesmas situações quanto à A/V ($6,5 \text{ g/m}^3$) e à Tzc (41 s), porém aumentando-se o valor da TASzc de 87 para 136 m/h, com módulo de telas na ZC ($G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$), verificou-se mais um ligeiro incremento na eficiência de redução de absorvância, atingindo 94%.

Novamente como observado também para os parâmetros turbidez e cor, os resultados de absorvância que mostraram a situação de projeto da zona de contato (ZC) desse tipo de unidade mais adequada, dentre as estudadas, seria: $G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$ (obtido com imposição de $TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$ associado a presença do módulo de telas #25 mm na ZC), associado a um T_{zc} de 41 s^{-1} e um valor de A/V de $6,5 \text{ g/m}^3$ como é possível observar na Figura 39.

Figura 39: Eficiência de remoção (%) de cor nas configurações A e B com e sem o uso da tela para o Tzc de 41 s e A/V de $6,5 \text{ g.m}^{-3}$.

5.4. Resultados obtidos nos parâmetros Turbidez, Cor e Absorbância considerando o valor de Tzc que forneceu melhor desempenho na UPFAD.

Através dos gráficos apresentados dos itens 5.1 ao 5.3, observou-se que o melhor Tzc encontrado, dentre os valores investigados, foi de 41 s, tanto para a configuração A ($TASzc = 136 \text{ m/h}$ e $Gzc = 6,1 \text{ s}^{-1}$ e $Gzc = 2,2 \text{ s}^{-1}$) quanto para a configuração B ($TASzc = 87 \text{ m/h}$ e $Gzc = 3,2 \text{ s}^{-1}$ e $Gzc = 0,9 \text{ s}^{-1}$).

As Figuras 40, 41 e 42, apresentam as eficiências de remoção para Turbidez, Cor e Absorbância, das duas configurações estudadas, com e sem o uso da Tela de #25 mm para os três A/V estudados (3,8, 5,0 e 6,5 g/m^3).

Figura 40: Eficiência de remoção (%) de turbidez no Tzc de 41 s para a configuração A e B.

Figura 41: Eficiência de remoção (%) de Cor no Tzc de 41 s para a configuração A e B.

Figura 42: Eficiência de redução (%) de Absorbância no Tzc de 41 s para a configuração A e B.

Através dos gráficos apresentados nas Figuras 40, 41 e 42, foi possível visualizar a influência da variação de A/V em todos os ensaios realizados com o Tzc de 41 s, podendo perceber que existe um ponto ótimo para cada configuração estudada de quantidade de ar a ser aplicada na Unidade de Flotação, o que significa que a eficiência de remoção de

turbidez, cor e absorvância podem ser afetadas de forma significativa, em variações não controlada da quantidade de ar (A/V).

Ensaio com A/V de $3,8 \text{ g/m}^3$ apresentaram queda da eficiência de remoção de turbidez, cor e absorvância. Já para A/V de $5,0$ e $6,5 \text{ g/m}^3$, apresentaram os melhores desempenhos na UPFAD.

5.5. Resultados obtidos nos parâmetros Turbidez, Cor e Absorvância considerando a variação do $G_{zc}(\text{s}^{-1})$ para os ensaios com A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$.

Através dos gráficos apresentados dos itens 5.1 ao 5.3, observou-se que o melhor A/V encontrado, dentre os valores investigados, foi de $5,0 \text{ g/m}^3$, tanto para a configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$ e $G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$ e $G_{zc} = 2,2 \text{ s}^{-1}$) quanto para a configuração B ($TAS_{zc} = 87 \text{ m/h}$ e $G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$ e $G_{zc} = 0,9 \text{ s}^{-1}$). Por outro lado, conforme discutido no item 5.4, o tempo de 41 s apresentou-se como o valor ótimo dentre os estudados.

As Figuras 43, 44 e 45, apresentam os gráficos tipo barra mostrando as eficiências de remoção para Turbidez, Cor e Absorvância, das configurações A e B, com os G_{zc} estudados ($0,9$, $2,2$, $3,2$ e $6,1 \text{ s}^{-1}$) colocados em ordem crescente para os ensaios realizados com A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$ e T_{zc} de 41s.

Figura 43: Eficiência de remoção (%) de Turbidez com A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$ no T_{zc} 41 s.

Figura 44: Eficiência de remoção (%) de Cor com A/V de 5,0 g.m⁻³ no Tzc 41 s.

Figura 45: Eficiência de redução (%) de Absorbância com A/V de 5,0 g.m⁻³ no Tzc 41 s.

Através dos gráficos apresentados nas Figuras 43, 44 e 45, foi possível visualizar a influência da variação de G_{zc} em todos os ensaios realizados com o A/V de 5,0 g/m⁻³, podendo-se perceber que, de maneira geral, o aumento do G_{zc} , na faixa de valores investigados, resultou em aumento da eficiência de remoção para os parâmetros

analisados, ou seja, o aumento do valor de G_{zc} - seja através do aumento do valor de TAS_{zc} ou através da introdução da tela #25 mm no interior da ZC – melhorou o desempenho global da flotação.

Estes resultados confirmam o exposto em trabalho desenvolvido por Souza (2012) que aponta como melhor concentração de ar no sistema de flotação, dentre os estudados, o valor de $5,0 \text{ g/m}^3$. A autora também concluiu que o uso da tela para aumentar o G_{zc} teve uma influência positiva no desempenho da UPFAD, sendo que o G_{zc} próximo a $6,0 \text{ s}^{-1}$ foi o que apresentou os melhores resultados.

Com base nesses resultados, verifica-se que para o projeto da zona de contato desse tipo de flotador é recomendável a adoção de valor adequado de G_{zc} associado a valor apropriado de T_{zc} , e não a adoção de valor adequado de TAS_{zc} associado a T_{zc} , como tem sido a prática corrente entre projetistas.

Para se ter ideia da influência de G_{zc} no desempenho da FAD, vale ressaltar que, com a instalação piloto operando nas melhores condições (T_{zc} de 41 s e A/V de $5,0 \text{ g.m}^{-3}$), a mudança do G_{zc} de $0,9 \text{ s}^{-1}$ para $6,1 \text{ s}^{-1}$ fez com que a eficiência de remoção passasse de 82% para 90% nos resultados de turbidez, de 81% para 94% nos resultados de absorbância, e de 93% para 95% nos resultados de remoção de cor (ver Figura 43, 44 e 45).

6. Conclusão e Recomendações

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa e para as condições em que os ensaios foram realizados, conclui-se que:

- Considerando as melhores condições de fornecimento de ar para a flotação (A/V igual a 5 g/m^3) e de T_{zc} (41s), o aumento do G_{zc} , na faixa de valores investigados, resultou em aumento da eficiência de remoção de turbidez, de cor e de Abs_{254} , demonstrando que o parâmetro G_{zc} (associado ao valor otimizado de T_{zc}) constitui alternativa mais interessante para o projeto de unidades FAD que o valor de TAS_{zc} , o qual tem sido a prática mais usual entre projetistas.

- De modo geral foi possível observar que para todos os parâmetros analisados (Turbidez, Cor, Absorbância), os ensaios realizados com o uso da tela #25mm apresentaram maiores eficiências de remoção em relação aos ensaios realizados sem o uso da tela, tanto na configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$ e $G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$) quanto na configuração B ($TAS_{zc} = 87 \text{ m/h}$ e $G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$), concluindo-se que os valores de TAS_{zc} maiores que 87 m/h (por exemplo valores próximos a 136 m/h associados a valores de G_{zc} na faixa de $3,2$ a $6,1 \text{ s}^{-1}$) proporcionaram o melhor desempenho da unidade FAD investigada, desde que associados a valores de T_{zc} em torno de 41s e de A/V na faixa de $5,0$ a $6,5 \text{ g/m}^3$.

- A eficiência de remoção para os parâmetros analisados foi melhor em todos os casos para o T_{zc} de 41 segundos, tanto para a configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$) quanto para a configuração B ($TAS_{zc} = 87 \text{ m/h}$).

- Em relação ao A/V para os ensaios realizados com o uso da tela #25mm, configuração A ($TAS_{zc} = 136 \text{ m/h}$ e $G_{zc} = 6,1 \text{ s}^{-1}$) e configuração B ($TAS_{zc} = 87 \text{ m/h}$ e $G_{zc} = 3,2 \text{ s}^{-1}$), com T_{zc} de 41 segundos, os maiores valores de remoção foram obtidos com A/V de $5,0 \text{ g/m}^3$ e $6,5 \text{ g/m}^3$ indicando que, para esse tipo de água, a flotação requereu A/V nessa faixa de valores (5 a $6,5 \text{ g}$ de ar/ m^3 de água bruta).

- Recomenda-se a realização de ensaios com maiores valores de G_{zc} , para analisar até que ponto esse aumento pode ser positivo em uma unidade de flotação por ar dissolvido.

- Recomenda-se a realização de ensaios com características diferentes quanto à composição da água sintética de estudo, para confirmar se os resultados obtidos na presente pesquisa são aplicáveis a águas de diferentes características de qualidade.

7. Referências Bibliográficas

AISSE, M. M. et al. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de flotação in: **PROSAB Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. Cap. VI. (2001).

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. **American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation**, 21st Ed. (2005).

ARAUJO, C. J. (2010). **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: EESC – USP. 119p.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº2914 de 12 de dezembro de 2011**. Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. (2011).

Di BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. (2005). **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água** 2^a Ed./ v.1 – São Carlos: RiMa, 792p.

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

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

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

EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation and me. **Water Research**, v. 44, n.7, p. 2077-2106, Apr 2010. ISSN 0043-1354. (2010).

EDZWALD, J. K. **Water Quality and Treatment** – A Handbook on Drinking Water. Mc Graw Hill. (2011).

EDZWALD, J. K.; HAARHOFF, J. **Dissolved Air Flotation for Water Clarification**. Mc Graw Hill. (2012).

ESCHER, A. E. **Influência da Taxa de Aplicação Superficial e da Concentração de Ar na Eficiência de Clarificação de Água de Abastecimento em Unidades de Flotação por Ar Dissolvido**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 104p. (2011).

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

HAM, M. et al. Collision efficiency factor of bubble and particle (α_{pb}) in DAF: theory and experimental verification. **Water science and technology**. v. 46 p.139-144. (2001).

HAM, M. et al. Effect of pressure on bubble size in dissolved air flotation. **Water Science and Technology**. v. 50, n.8, p. 49-56. (2002).

HAM, M.; KIM, T. Recent Trends, Developments and Research Needs in Tailored Bubble Flotation Technology. **In: The 6th International IWA Conference on Flotation for Water and Wastewater Systems**, New York City, USA (2012).

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

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

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

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

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

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

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

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

PINTO, S. I. G. **Emprego da ferramenta CFD para representação da estrutura de escoamento de uma unidade de flotação em escala piloto tratando água para abastecimento.** Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 159p. (2013)

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

REALI, M. A. P. **Concepção e Avaliação de um Sistema Compacto para Tratamento de 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: EESC – USP. 373p. 2 v. (1991).

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

REALI, M. A. P., SABOGAL PAZ, L. P., DANIEL, L. A. Tratamento de água para consumo humano in: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. (org.) **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão.** Rio de Janeiro, Elsevier, 789 p. (2013).

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento.** São Paulo: BLUCHER. (2009).

RYKAART, E. M.; HAARHOFF, J. Behaviour of air injection nozzles in dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 25-35. (1995).

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

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

(Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: EESC – USP. 85p. (2012).

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

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