KISNER ANDERSON MAIA

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

Orientador: Professor Dr. Marco Antônio Penalva Reali

São Carlos – São Paulo

OUTUBRO DE 2010

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

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

M217i   Maia, Kisner Anderson
Influência da velocidade de entrada na zona de contato
na eficiência de clarificação de unidades retangulares de
flotação por ar dissolvido aplicada no tratamento de
águas para abastecimento / Kisner Anderson Maia ;
orientador Marco Antônio Penalva Reali. -- São Carlos,
2010.

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,
2010.

1. Flotação. 2. Flotação por ar dissolvido (FAD).
3. Zona de contato. 4. Velocidade de entrada na zona de
contato. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro **KISNER ANDERSON MAIA**.

Dissertação defendida e julgada em 07.10.2010 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Dr. **MARCO ANTONIO PENALVA REALI** – (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **LUIZ ANTONIO DANIEL**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

Prof. Dr. **RICARDO DE LIMA ISAAC**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Associado **MARCELO ZAIAT**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

*Este trabalho é dedicado aos meus pais, Estela e Sebastião
Maia, pela dedicação, carinho e incentivo em todos os
momentos da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de poder concluir mais uma importante etapa de minha vida.

À minha família, grande responsável pela minha formação, a quem serei grato por todo vida.

A todos os amigos, em especial a Andre Pioltine pelo incentivo antes mesmo do início do mestrado e pelo apoio durante a pesquisa; e a Cláudio Júnior Araújo pela efetiva participação, sendo fundamental para a conclusão dos trabalhos.

Ao Técnico Alcino pela enorme contribuição no desenvolvimento e manutenção de toda estrutura utilizada na pesquisa.

Aos funcionários da secretaria do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC, sempre atenciosos e dispostos a ajudar.

A todas as pessoas que de certa forma incentivaram, apoiaram e facilitaram a conclusão desta pesquisa.

Ao CNPq e CAPES pelas bolsas de estudo concedidas.

Aos Professores José Roberto Campos e Rodrigo Moruzzi pela colaboração no exame de qualificação e aos Professores Luis Daniel e Ricardo de Lima Isaac pela participação em banca e colaboração na pesquisa.

Agradecimento especial ao meu orientador, Professor Marco Antônio Penalva Reali, pelos ensinamentos durante a pesquisa, pela compreensão, pelo incentivo e pelo voto de confiança durante o período de elaboração deste trabalho.

Serei sempre grato. Obrigado a todos!

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas	xii
Lista de Símbolos	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 O Processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD)	6
3.2 Características de um Sistema FAD	17
3.2.1 Unidade de Geração de Microbolhas	17
3.2.2 Tanque de Flotação	19
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1 Considerações Iniciais	23
4.2 Descrição das Unidades Utilizadas	24
4.2.1 Flotatestes – Escala de laboratório	24
4.2.2 Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido – FAD	25
4.2.3 Partes Integrantes do Sistema	28
4.2.4 Layout da Instalação	36
4.3 Água de Estudo	39
4.3.1 Preparação da Água de Estudo – “Água Sintética”	39
4.4 Procedimentos adotados na preparação e aplicação dos produtos químicos	41
4.5 Procedimentos adotados para operação da câmara de saturação	43

4.6 Procedimentos adotados na entrada da zona de contato da unidade FAD	44
4.6.1 Desenvolvimento do mecanismo de variação da altura na entrada da zona de contato (h_e)	44
4.6.2 Metodologia adotada para determinação da área, velocidade e valor estimado do gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato (A_{EzC} , V_{EzC} , G_{EzC})	46
4.7 Programação dos Ensaios	49
4.7.1 Fase I: Ensaios com Flotatestes para determinação da dosagem adequada de coagulante, pH de coagulação e medição do potencial zeta das partículas, gradiente médio de velocidade de floculação e tempo médio de floculação	49
4.7.2 Fase II: Ensaios com Unidade em Escala Piloto – FAD	54
4.8 Monitoramento dos Ensaios	59
4.8.1 Fase I	59
4.8.2 Fase II	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1 FASE I – Ensaios em Flotatestes para determinação das dosagens adequadas de coagulante, pH de coagulação e medição do potencial zeta das partículas, gradiente médio de velocidade de floculação e tempo médio de floculação para o tratamento da água bruta sintética em estudo	62
5.1.1 ETAPA 1: Determinação da dosagem de coagulante, pH de coagulação e medição do potencial zeta das partículas	62
5.1.2 ETAPA 2: Determinação do gradiente médio de velocidade de floculação e tempo médio de floculação	69
5.2 FASE II – Ensaios com unidade em escala piloto FAD para avaliação da influência da velocidade de entrada na zona de contato sobre a eficiência de clarificação de águas para abastecimento	71
5.2.1 1ª Condição: Potencial Zeta das partículas Positivo (em torno de +10 mV).	72
5.2.2 2ª Condição: Potencial Zeta das partículas próximo a 0 mV	79
6. CONCLUSÕES	89
7. RECOMENDAÇÕES	90

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	91
APÊNDICE A – Gráficos das eficiências de turbidez obtidas para cada dosagem de coagulante nos ensaios realizados na Etapa I - Fase I (Flotatestes) _____	94
APÊNDICE B – Gráficos das eficiências de cor aparente obtidas para cada dosagem de coagulante nos ensaios realizados na Etapa I - Fase I (Flotatestes) _____	97
APÊNDICE C – Resultados das amostras pontuais obtidas na Fase II realizada na unidade FAD piloto (Conjuntos A, B, C e D de ensaios) _____	100

Resumo

MAIA, K. A. (2010). Influência da velocidade de entrada na zona de contato na eficiência de clarificação de unidades retangulares de flotação por ar dissolvido aplicada no tratamento de águas para abastecimento. São Carlos, 2010, 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A flotação por ar dissolvido (FAD) é reconhecida atualmente como técnica eficiente para a etapa de clarificação em sistemas de tratamento de água para abastecimento. Diversos estudos vêm sendo realizados para aprimoramento dessa técnica e das características físicas das unidades FAD. Seguindo essa tendência, o presente trabalho teve como objetivo estudar os efeitos da velocidade na entrada da zona de contato (V_{EzC}) na eficiência de clarificação de unidades retangulares FAD. Para o presente estudo foi utilizada água sintética preparada através da adição de 1,0 mg/L de ácido húmico e 8,5 mg/L de caulinita, a qual foi coagulada com sulfato de alumínio. A pesquisa foi dividida em duas fases: **FASE I** – com o emprego do Flotateste foram determinadas as dosagens adequadas de coagulante, o pH adequado de coagulação com a medição do potencial zeta das partículas (PZ), o gradiente médio de velocidade para floculação e o tempo médio para floculação para o tratamento da água sintética em estudo; **FASE II** – utilizando unidade FAD em escala piloto foram realizados ensaios para diferentes variações na altura da entrada da zona de contato (h_e) da câmara de flotação de forma a se obter diferentes valores de V_{EzC} . Nesta fase foram investigadas duas diferentes condições de coagulação as quais forneceram bons resultados por flotação: 1ª condição, aplicação de 42,5 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ e pH de $6,35 \pm 0,05$ na qual resultou em PZ positivo em torno de +10 mV e para 2ª condição, aplicação de 22,5 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$ e pH de $6,40 \pm 0,05$ na qual resultou em PZ próximo de 0 mV. Os ensaios foram monitorados e comparados entre si os valores residuais de turbidez e cor aparente. Em todos os ensaios as taxas de aplicação superficial foram mantidas em faixas estreitas de valores (TAS_{ZC} igual a 180 ± 4 m/h e TAS_{CLAR} igual a 184 ± 4 m/d) verificando-se que os melhores resultados residuais dos parâmetros monitorados foram obtidos para a 1ª condição de estudo com valores de 0,66 NTU de turbidez e cor aparente igual a 2 uC (eficiências de 90,5 e 93,9 % respectivamente). Os resultados demonstraram que para a faixa de valores de V_{EzC} entre 62,2 e 12.432,4 m/h pouca influência desse parâmetro foi observada na eficiência do processo de clarificação por flotação para ambas as condições de coagulação investigadas. Entretanto, a faixa de valores de V_{EzC} entre 124,3 e 180,2 m/h forneceram as melhores condições de flotação. Portanto, sugere-se tal faixa de valores como subsídio ao projeto de sistemas de flotação constituído pelas características apresentadas nesta pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: flotação; flotação por ar dissolvido (FAD); zona de contato; velocidade de entrada na zona de contato.

Abstract

MAIA, K. A. (2010). Influence of the velocity in the contact zone entrance on the clarification efficiency of rectangular dissolved air flotation units applied to water treatment to supply. São Carlos, 2010, 102p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Dissolved air flotation (DAF) is currently recognized as an efficient technique for water clarification in water treatment systems. Several studies have been conducted to improve this technique and the physical characteristics of DAF units in order to constantly improve their performance. Following this trend, the aim of this research was to evaluate the effects of the velocity in the contact zone entrance on the clarification efficiency of rectangular DAF units. A DAF pilot plant fed with synthetic water prepared by adding 1.0 mg/L of humic acid and 8.5 mg/L of kaolin, and coagulated with aluminum sulfate was used. The research was divided into two phases: **I**) by using a laboratory scale DAF unit (Flotatest) the optimal coagulation, flocculation, and flotation conditions for the synthetic water previously described were investigated; and **II**) by using a DAF pilot unit tests were performed for different variations in the height of the contact zone entrance (h_e) of the flotation chamber to obtain different values of velocity in the contact zone entrance. In this phase two different conditions of coagulation were investigated yielding good results: 1st condition: application of 42.5 mg/L of $Al_2(SO_4)_3$ and pH 6.35 ± 0.05 , which resulted in zeta potential of positive particles around +10 mV, and 2nd condition: application of 22.5 mg/L $Al_2(SO_4)_3$ and pH 6.40 ± 0.05 , which resulted in zeta potential of particles near zero. The tests were monitored and the residual values of turbidity and apparent color were compared. In all experiments, the hydraulic surface loadings were kept in narrow bands of values (in the contact zone equal to 180 ± 4 m/h and in the clarification zone, equal to 184 ± 4 m/d). It was verified that the best residual results of the parameters monitored were obtained for the 1st condition of study, with 0.66 NTU turbidity and apparent color equal to 2 uC (efficiencies of 90.5 and 93.9%, respectively). The results showed that for the range of values of velocity in the contact zone entrance between 62.2 and 12432.4 m/h little influence of this parameter was observed on the clarification efficiency process by flotation for both coagulation conditions investigated. However, as the range of values between 124.3 and 180.2 m/h provided the best flotation conditions, such a range should be adopted for the designs of rectangular DAF units.

KEYWORDS: flotation; dissolved air flotation (DAF); contact zone; velocity in the contact zone entrance.

Lista de Figuras

Figura 3.1 - Distribuição do tamanho de bolhas produzidas por válvula agulha e bocal WRC. (ZABEL, 1984)_____	10
Figura 3.2 - Variações dos bocais difusores testados (RYKAART; HAARHOFF, 1995)_____	11
Figura 3.3 - Arranjo experimental – escala de bancada. (HAN <i>et. al.</i> 2001)_____	13
Figura 3.4 - Diagrama de eficiência de colisão para processo FAD. (HAN <i>et.al.</i> 2001)_____	14
Figura 3.5 - Mudança do potencial zeta com a dosagem de alumínio, legenda mostra o tempo de floculação. (HAN <i>et. al.</i> 2001)_____	15
Figura 3.6- Eficiência de remoção em função do tempo de floculação e potencial zeta. (HAN <i>et. al.</i> 2001)_____	16
Figura 3.7 - Escoamento idealizado para uma unidade FAD de alta carga hidráulica_____	21
Figura 4.1 - Flotatestes utilizados para ensaios em escala de laboratório_____	25
Figura 4.2 - Conjunto eletro-eletrônico utilizado na pesquisa: (a) Painel de controle da unidade piloto FAD e (b) software de controle da unidade visualizado na tela de entrada de dados_____	26
Figura 4.3 - Vista geral da unidade piloto FAD utilizada nos ensaios_____	26
Figura 4.4 - Planta da unidade piloto FAD_____	27
Figura 4.5 - Corte A-A da unidade piloto FAD_____	27
Figura 4.6 - (a) Fotografia mostrando uma vista superior em planta da zona de contato vazia seguida da zona de separação da unidade FAD piloto e (b) Fotografia mostrando a formação da manta branca de microbolhas de ar sobre a zona de contato e a formação da camada de lodo sobre a zona de separação_____	28
Figura 4.7 - (a) Vista superior da parte interna das câmaras de floculação com respectivos agitadores e (b) inversores de frequência integrados para controle da rotação dos agitadores_____	29
Figura 4.8 - Vista geral da câmara de saturação da instalação FAD piloto_____	29
Figura 4.9 - Esquema ilustrativo da câmara de saturação_____	30
Figura 4.10 - Detalhes do sistema de despressurização (Válvulas agulha) integrante do conjunto gerador de microbolhas_____	30
Figura 4.11 - (a) Vista geral do mecanismo de controle da comporta projetada para controle da V_{EzC} e (b) detalhe da régua milimetrada para controle da h_e _____	31
Figura 4.12 - Vista interior mostrando a entrada da zona de contato e a comporta para controle da h_e _____	31
Figura 4.13 - Vista da unidade de mistura rápida “ <i>in-line</i> ” utilizada para aplicação do produto químico_____	32

Figura 4.14 - (a) Conjunto de reservatórios utilizados para armazenamento da água sintética e (b) sistema de caixa d'água e bóias para controle de nível	33
Figura 4.15 - Aquecedor a gás “ <i>in-line</i> ” utilizados para controle da temperatura da água bruta afluyente durante os ensaios com a unidade piloto FAD	33
Figura 4.16 - (a) Bomba centrífuga utilizada para alimentação do sistema FAD e (b) bomba centrífuga utilizada para o sistema de recirculação da água (alimentação da câmara de saturação)	34
Figura 4.17 - (a) Sistema composto por reservatórios e (b) bombas dosadoras de produtos químicos	35
Figura 4.18 - (a) Medidor de vazão eletromagnético utilizado para controle automático de alimentação da instalação piloto e (b) da vazão de recirculação pressurizada	35
Figura 4.19 - Medidores de vazão verticais (Rotâmetros) utilizados para calibração e aferição periódica das vazões apresentadas pelos medidores eletromagnéticos, sendo: (a) rotâmetro instalado na linha de alimentação de água bruta sintética da instalação piloto e (b) rotâmetro implantado junto à linha de recalque da recirculação pressurizada	36
Figura 4.20 - Layout da instalação com seus principais componentes	38
Figura 4.21 - Sistema de captação de água do poço da USP/São Carlos utilizada na preparação da água sintética.	39
Figura 4.22 - Esquema ilustrativo do sistema gerador de microbolhas	44
Figura 4.23 - Esquema ilustrativo do mecanismo projetado para controle da altura na entrada da zona de contato (h_c) – comporta	45
Figura 4.24 - Fluxograma dos ensaios realizados na Fase I - Etapa 1. (Determinação da dosagem de coagulante, pH de coagulação e medição do potencial zeta das partículas)	51
Figura 4.25 - Fluxograma dos ensaios realizados na Fase I - Etapa 2. (Determinação do gradiente médio de velocidade de floculação e do tempo médio de floculação)	53
Figura 4.26 (a) - Vista de h_c igual a 200 mm	55
Figura 4.26 (b) - Vista de h_c igual a 150 mm	55
Figura 4.26 (c) - Vista de h_c igual a 100 mm	55
Figura 4.26 (d) - Vista de h_c igual a 69 mm	55
Figura 4.26 (e) - Vista de h_c igual a 50 mm	55
Figura 4.26 (f) - Vista de h_c igual a 20 mm	55
Figura 4.26 (g) - Vista de h_c igual a 10 mm	56
Figura 4.26 (h) - Vista de h_c igual a 8 mm	56
Figura 4.26 (i) - Vista de h_c igual a 5 mm	56
Figura 4.26 (j) - Vista de h_c igual a 3 mm	56
Figura 4.26 (k) - Vista de h_c igual a 1 mm	56

Figura 4.26 (I) - Vista de h_c igual a 0 mm	56
Figura 4.27 - Esquema ilustrativo dos ensaios realizados na Fase II	58
Figura 5.1 - Diagrama de remoção de turbidez por flotação, com aplicação de sulfato de alumínio, onde é mostrado a região (pH x dosagem de coagulante) que resultou em eficiências de remoção maiores ou iguais a 90% e maiores ou iguais a 92%.	65
Figura 5.2 - Diagrama de remoção de cor aparente por flotação, com aplicação de sulfato de alumínio, onde é mostrado a região (pH x dosagem de coagulante) que resultou em eficiências de remoção maiores ou iguais a 90% e maiores ou iguais a 92%	66
Figura 5.3 - Efeito do pH no potencial zeta das partículas com a adição das dosagens de $Al_2(SO_4)_3$ selecionadas	68
Figura 5.4 - Gráfico das eficiências de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente monitorados durante a realização do conjunto A de ensaios com a instalação piloto de flotação – Fase II ($Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; $TAS_{ZC} = 184 \pm 4 \text{ m/dia}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$)	75
Figura 5.5 - Gráfico das eficiências de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente monitorados durante a realização do conjunto B de ensaios com a instalação piloto de flotação – Fase II ($Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; $TAS_{ZC} = 184 \pm 4 \text{ m/dia}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$)	77
Figura 5.6 - Gráfico das eficiências de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente monitorados durante a realização do conjunto C de ensaios com a instalação piloto de flotação – Fase II ($Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; $TAS_{ZC} = 184 \pm 4 \text{ m/dia}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$)	82
Figura 5.7 - Gráfico das eficiências de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente monitorados durante a realização do conjunto D de ensaios com a instalação piloto de flotação – Fase II ($Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; $TAS_{ZC} = 184 \pm 4 \text{ m/dia}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$)	84
Figura 5.8 - Gráfico da eficiência na zona de contato em função do diâmetro da partícula (EDZWALD, 2007)	89

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Parâmetros estabelecidos ao produto químico para utilização durante os ensaios na instalação FAD piloto ($Q_{\text{entrada}} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$)	42
Tabela 4.2 - Valores de área, velocidade e gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato obtidos em função dos parâmetros de projeto, sendo estimados antes da realização dos conjuntos de ensaios (A, B, C e D) da Fase II realizados na unidade FAD piloto	48
Tabela 4.3 - Condições fixadas durante os ensaios da Etapa 1 (Fase I)	50
Tabela 4.4 - Condições fixadas durante os ensaios da Etapa 2 (Fase I)	52
Tabela 4.5 - Parâmetros controlados durante a Fase II	57
Tabela 4.6 - Parâmetros físico-químicos analisados para a água em estudo	61
Tabela 5.1 - Resultados referentes aos ensaios no Flotatest (V _F = 12,8 cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC	63
Tabela 5.2 - Valores do potencial zeta em função do pH de coagulação para as dosagens de coagulante selecionadas	68
Tabela 5.3 - Resultados referentes aos ensaios no Flotatest (TAS = 12,78 cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,8 NTU; Cor aparente = 64 uC. D _{coag} = 42,5 mg/L.	70
Tabela 5.4 - Resultados finais referentes às amostras compostas para PZ positivo (Conjunto A de ensaios)	74
Tabela 5.5 - Resultados finais referentes às amostras compostas para PZ positivo (Conjunto B de ensaios)	76
Tabela 5.6 - Resultados finais referentes às amostras compostas para PZ próximo de zero (Conjunto C de ensaios)	81
Tabela 5.7 - Resultados finais referentes às amostras compostas para PZ próximo de zero (Conjunto D de ensaios)	84

Lista de Abreviaturas e Siglas

SHS	Departamento de Hidráulica e Saneamento
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
LATAR	Laboratório de Tratamento Avançado e Reúso de Águas
pH	Potencial Hidrogeniônico
TAS	Taxa de Aplicação Superficial
USMB	Unidade Separadora de Microbolhas
USP	Universidade de São Paulo

Lista de Símbolos

A_{EZC}	Área na Entrada da Zona de Contato
$Al_2(SO_4)_3$	Fórmula Química do Sulfato de Alumínio
Al^{+3}	Íon Trivalente do Metal Alumínio
B_{ZC}	Largura da zona de contato
$C_{produto}$	Concentração do Produto Químico
$C_{solução}$	Concentração da Solução
D_{coag}	Dosagem de Coagulante
G_{EZC}	Gradiente Médio de Velocidade na Entrada da Zona de Contato
G_{floc}	Gradiente Médio de Velocidade de Flocculação
G_{MR}	Gradiente Médio de Velocidade de Mistura Rápida
h_e	Altura na Entrada da Zona de Contato
H_{ZC}	Altura da zona de contato
J	Perda de Carga Unitária
L_{ZC}	Comprimento da zona de contato
$m_{produto}$	Massa do Produto Químico
n	Número de Manning
P	Pressão de Saturação
PZ	Potencial Zeta das Partículas
Q_{bomba}	Vazão da Bomba Dosadora
$Q_{entrada}$	Vazão de Entrada na Unidade Piloto
$Q_{rec.}$	Vazão de Recirculação
R	Razão de Recirculação
R_h	Raio Hidráulico
T	Temperatura da Água
TAS_{CLAR}	Taxa de Aplicação Superficial na Zona de Clarificação
TAS_{ZC}	Taxa de Aplicação Superficial na Zona de Contato

T_{floc}	Tempo de Detenção Hidráulica de Floculação
T_{MR}	Tempo de Mistura Rápida
T_{ZC}	Tempo de Detenção Hidráulica na Zona de Contato
V_{CF}	Velocidade Cross-Flow
V_{EZC}	Velocidade de Entrada na Zona de Contato
V_{F}	Velocidade de Flotação
V_{total}	Volume Total
ZC	Zona de Contato
μ	Viscosidade da Água
γ	Peso Específico da Água
α_{bp}	Eficiência de Colisão entre Bolhas e Partículas

1. INTRODUÇÃO

A água nos mananciais contém geralmente diversos componentes, os quais provêm do próprio ambiente natural ou introduzido a partir de atividades humanas, sendo consideradas impurezas os elementos que alcançam valores superiores ao limite estabelecido para determinado uso. De forma a permitir ou restringir sua utilização, diversos parâmetros são utilizados para caracterizar e determinar a qualidade da água.

Algumas características físicas como a cor e a turbidez elevadas podem tornar a água imprópria ao consumo humano pelo aspecto estético, higiênico e econômico. A cor é uma característica derivada da existência de substâncias em solução, sendo essas na grande maioria dos casos de natureza orgânica. A turbidez é decorrente da presença de material em suspensão na água, finamente divididos ou em estado coloidal e de organismos microscópicos.

A água que chega à população deve apresentar características que a colocam como aceitáveis para o consumo humano, tendo desta forma que respeitar os padrões de potabilidade vigentes e estabelecidos pela Portaria nº 518 de 25 de março de 2004 (Procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências; Ministério da Saúde, BRASIL, 2004). Em vista da deteriorização crescente da qualidade das águas da maioria dos mananciais superficiais é sempre necessário o desenvolvimento de novas pesquisas com o intuito de elaborar técnicas ou aprimorar processos e operações já existentes de modo a torná-las mais adequadas para a obtenção de resultados superiores aos alcançados em sistemas de tratamento de água tradicionais.

Sabe-se hoje que a flotação por ar dissolvido (FAD) 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 altas

concentrações de algas ou de substâncias húmicas. (REALI, 1984; REALI, 1991; EDZWALD, 1995; entre outros).

A flotação por ar dissolvido (FAD) foi inicialmente utilizada na exploração de matérias primas minerais no final do século XIX, sendo introduzida como alternativa para o tratamento de águas residuárias na década de 1920 (KIURU 2001). Desde então, o emprego da flotação como técnica eficiente de clarificação das águas vem sendo explorado e ótimos resultados são apresentados, o que fez segundo EDZWALD *et al* (1992), o processo receber grande atenção e torna-se o método preferido de clarificação em muitos países como Inglaterra, Bélgica, Holanda e nos países Escandinavos.

No Brasil, o processo de FAD começou a ser examinado como uma das etapas do tratamento de água para abastecimento a partir da década de 80, com projeto vinculado ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – SHS/EESC/USP. Desenvolvida por REALI (1984), a unidade FAD com escoamento contínuo foi instalada e operada na Estação de Tratamento de Água de São Carlos, SP (ETA São Carlos) e o autor concluiu que para casos específicos a FAD pode-se constituir alternativa vantajosa em relação à sedimentação.

ZABEL (1985) relata que muitas águas contêm partículas de baixa densidade, permanecendo na parte superior do líquido e causando baixa eficiência na unidade de sedimentação e afetando posteriormente a operação dos filtros, além de águas com baixa turbidez e altos valores de cor que produzem flocos leves e tendem a depositar-se muito lentamente nesta unidade.

Para remoção destas partículas por sedimentação o processo dependerá de tanques com baixas taxas e exigindo conseqüentemente unidades de maiores dimensões. Além disso, EDZWALD *et al.* (1992) ressaltam que a sedimentação demanda altas concentrações de coagulante e de maiores períodos de floculação para produção de flocos com tamanhos

adequados. Estes fatos levam a um maior gasto com produtos químicos, a um elevado volume de lodo e a exigência de maiores áreas de implantação das unidades de floculação antecedendo à sedimentação.

Em função do exposto, a FAD surgiu como uma das tecnologias mais promissoras e capazes de solucionar os problemas advindos do uso de decantadores.

SCHOFIELD (2001) cita as seguintes vantagens da FAD em sistemas de clarificação da água: i) altas taxas (>10 m/h); ii) unidades compactas; iii) partida rápida e capacidade para resistir às obstruções periódicas; iv) alta captura de materiais sólidos, especialmente os finos; v) melhor remoção de algas com maior taxa hidráulica de aplicação superficial; vi) menor uso de produtos químicos; vii) efluente com alta qualidade química e biológica; viii) suporta variações hidráulicas e qualitativas da água.

Dentre as desvantagens o autor cita: i) processo complexo e mecanicamente intensivo; ii) requer maior quantidade de energia elétrica; iii) altos custos de serviço; iv) requer um floculador separado e a célula FAD deve apresentar cobertura para não prejudicar a formação do lodo; v) há um grande número de variáveis no controle do processo.

Trabalhos foram desenvolvidos com a finalidade de obter relações consistentes entre as características geométricas das unidades FAD e a maximização da eficiência final na clarificação de águas. Dentre estas, pode-se citar os trabalhos de LUNDH *et al.* (2002) e REALI e PATRIZZI (2007) que propõem mudanças na configuração da zona de contato e define os principais parâmetros relacionados, tais como tempo de detenção e taxa de aplicação superficial.

Pesquisas adicionais e complementares às anteriormente citadas estão sendo realizadas com o objetivo de aprofundar os conhecimentos sobre a influência das características físicas no desempenho da FAD. O Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP apresenta atualmente uma linha de pesquisa com este enfoque, avaliando a eficiência do

tratamento da água utilizando a flotação por ar dissolvido, no qual vem sendo desenvolvido diversos estudos por alunos de mestrado e doutorado.

Assim sendo, este trabalho tem como proposta principal analisar a influência de variações na entrada da zona de contato (ZC) e conseqüentemente, a velocidade (V_{EZC}) gerada nesse local sobre a eficiência de clarificação do processo FAD, sendo a piloto alimentada com água sintética preparada de forma a apresentar turbidez em torno de $7,00 \pm 0,50$ NTU e cor aparente em torno de 45 ± 5 uC.

A V_{EZC} é função da vazão de projeto e da área da secção transversal localizada na entrada da zona de contato entre as microbolhas de ar e as partículas em suspensão da água floculada, portanto a V_{EZC} se estabelece como um importante parâmetro de projeto em unidades retangulares FAD, a qual define o valor da intensidade do gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato (G_{EZC}).

O contato entre a mistura de recirculação pressurizada com a água floculada gera exatamente na entrada da zona de contato (ZC) uma região de turbulência. Isso mostra a importância da taxa de dissipação de energia provocada, o qual poderá influenciar na conservação ou ruptura dos flocos devido ao movimento do fluído e na cinética das colisões entre bolhas e partículas em suspensão.

Apesar da importância do parâmetro de projeto citado (V_{EZC}), não se conhece na literatura trabalho específico que defina a influência da V_{EZC} e conseqüente valor de G_{EZC} no desempenho final destas unidades, portanto, este trabalho se apresenta como inovador, estando dentro de uma linha de pesquisa realizada pela SHS/EESC/USP.

2. OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho consistiu em estudar a influência da velocidade de entrada da zona de contato (V_{EZC}) na eficiência de clarificação de uma unidade piloto retangular de flotação por ar dissolvido (FAD) de escoamento contínuo aplicada no tratamento de água para abastecimento.

Para cumprimento do objetivo principal, duas diferentes etapas de estudo foram realizadas, as quais configuraram os seguintes objetivos específicos:

- Verificar as condições adequadas de coagulação e floculação, e avaliar o desempenho da FAD em função do valor do potencial zeta das partículas.
- Investigar o desempenho do processo de clarificação por flotação em função da variação da V_{EZC} e a influência dessa variável na eficiência de remoção de turbidez e cor aparente para a água em estudo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O Processo de Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

Atualmente, a remoção de partículas da água utilizando a técnica de flotação por ar dissolvido (FAD) é um processo amplamente reconhecido em estações de tratamento de água, sendo considerado uma excelente alternativa quando comparado aos processos convencionais de clarificação da água.

REALI (1991) descreveu o processo de flotação como a operação pela qual se pode separar sólidos ou líquidos de uma fase líquida através da introdução no sistema de pequenas bolhas de ar que aderindo à superfície dos flocos tende a aumentar seu empuxo. Este mecanismo provoca a ascensão dos flocos em direção à superfície, acumulando-os na parte superior da zona de separação do tanque de flotação, podendo conseqüentemente serem devidamente removido na forma de lodo.

O sucesso no desempenho da FAD passa pelo pré-tratamento da água. REALI e PATRIZZI (2007) afirmam que um bom desempenho no tratamento inclui uma coagulação apropriada, respeitando valores adequados de pH e dosagens de coagulante, além de uma adequada floculação.

EDZWALD *et al.* (1992) pesquisaram os resultados de diferentes tempos de floculação, sendo os estudos realizados em escala de bancada e escala piloto. Nos ensaios em escala de bancada, utilizando-se água sintética e natural, foram testados três diferentes tempos de floculação: 5, 10 e 20 min. Nestes ensaios os melhores valores de turbidez ($< 1,0$ NTU) foram alcançados para tempo de mistura igual a 20min.

Nos ensaios feitos em escala piloto foram realizados experimentos na ausência de floculação, na presença de uma câmara de floculação (tempo igual a 8min) e na presença de

duas câmaras de floculação (tempo igual a 16min). Em todos os casos foram obtidos excelentes valores de remoção de turbidez (0,4 a 0,5 NTU na utilização da FAD e menor que 1 NTU na utilização da FAD combinada com a filtração) tanto para tempos de floculação de 8 min quanto para de 16 min.

Em relação aos experimentos realizados na ausência de floculação, estes indicaram um fraco desempenho da FAD.

Em estudo realizado por EDZWALD *et al.* (1999), os resultados obtidos em função do tempo de floculação mostraram uma boa relação no desempenho da FAD (escala piloto) com alta carga hidráulica e baixos tempos de floculação (5 a 10 min).

Outro fator importante no processo FAD é a adequada geração de microbolhas que influenciará na eficiência de remoção das partículas em suspensão. Portanto, alguns elementos devem ser levados em consideração como o tipo da 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 correto controle destes parâmetros durante a operação torna a FAD um método eficaz, que consiste em um sistema de alta taxa e que confere grande potencial ao processo de clarificação.

Para a produção das microbolhas utilizadas no processo, inicialmente satura-se a água com o ar à alta pressão na câmara de saturação e então a transfere através de um bocal redutor de pressão para a câmara de flotação onde o ar inicialmente saturado no meio líquido aparece na forma de microbolhas. Estas bolhas colidem com os flocos previamente coagulados e floculados formando aglomerados bolhas/flocos (LEPPINEN e DALZIEL, 2004).

EDZWALD (1995) menciona que para uma maior eficiência na formação do conjunto bolhas-flocos e, conseqüentemente, um melhor resultado no processo de flotação é necessário

um ângulo de contato entre as partículas e as bolhas, o que proporciona hidrofobicidade e boa adesão.

A distribuição do tamanho das bolhas geradas numa unidade de FAD depende fundamentalmente da taxa de aglutinação das micro-bolhas. A esse respeito, REALI (1991) comenta que o fenômeno da aglutinação depende da taxa de colisão entre as bolhas, além das características de suas superfícies e do líquido em torno das mesmas (tensão superficial do líquido, rigidez das paredes das bolhas e dupla camada). O autor também relata que para obtenção das melhores eficiências a faixa usual para o tamanho de micro-bolhas é de 10 a 120 μm , estabelecendo um diâmetro médio das bolhas de 40 a 60 μm .

LEPPINEN e DALZIEL (2004) estudaram a distribuição dos tamanhos de bolhas geradas pela FAD dentro dos tanques de flotação de duas estações de tratamento de água. As medidas foram realizadas inserindo-se verticalmente um tubo de acrílico em diferentes profundidades dentro dos tanques. Uma bomba foi utilizada para extrair as amostras, as quais foram fotografadas por uma câmara digital e armazenadas em computador para posterior tratamento das imagens obtidas.

Através deste estudo foi possível analisar a ação dos “clusters” (aglomerado de bolhas), os quais agem como filtros, constituindo o meio primário de remoção de flocos durante a FAD. Os ensaios indicaram tamanhos de bolhas na faixa de 16 a 350 μm .

De acordo com os autores, os “clusters” são promovidos pelas menores bolhas geradas, as quais possuem velocidade de ascensão menor que as maiores bolhas. Com a formação dos “clusters”, estes adquirem altas velocidades de ascensão, sendo capazes de dominar o escoamento e as flutuações turbulentas e assim, ascender à camada de lodo.

As maiores bolhas ($>200 \mu\text{m}$) são excluídas dos “clusters”, devido à presença de uma velocidade ascensional de cisalhamento que promove uma força hidrodinâmica, a qual age em

todas as bolhas e que é proporcional à área superficial destas. Assim, as maiores forças agem nas bolhas maiores, causando a sua separação dos aglomerados.

MORUZZI (2005) realizou investigação da distribuição do tamanho de micro-bolhas de ar em sistemas FAD, submetido a diferentes condições e mistura (taxa de aplicação superficial na zona de contato de 25, 40 e 60 m/h e tempo de detenção de $1,10 \times 10^{-2}$; $1,70 \times 10^{-2}$ e $2,5 \times 10^{-2}$ h), pH (6,0; 6,25; 6,50 e 6,75), taxa de recirculação (5, 10 e 20 %) e dosagem de coagulante (0 e 2,25 mg Al^{+3}/L). Os ensaios ocorreram em instalação especialmente concebida (USMB – Unidade Separadora de Microbolhas) visando à captura de imagens em movimento e não interferindo nas características originais das microbolhas. O aparato experimental também foi formado por câmara digital, conjunto de lentes para ampliação e plano de laser.

Em todas as condições estudadas, a distribuição do tamanho de microbolhas de ar apontou para valores de diâmetros coerentes com os encontrados na literatura (10 – 120 μm).

Os resultados mostraram: i) a alteração do par Taxa de aplicação superficial x Tempo de contato produziu leve mudança na distribuição do tamanho das micro-bolhas, sendo que a fração de bolhas menores que 50 μm foi maior que 85 % em todas as condições investigadas; ii) a alteração do pH produziu um achatamento na curva da distribuição do tamanho das micro-bolhas, assim, o diâmetro médio das bolhas foi pouco alterado (27 a 35 μm) e a fração de microbolhas menores que 50 μm variou de 75 a 95 %; iii) a taxa de recirculação foi pouco importante na distribuição do tamanho das microbolhas, em que o diâmetro médio variou de 25 a 30 μm (maior valor observado na taxa de 10 %) e a fração de bolhas menores que 50 μm oscilou entre 90 e 95 %; iv) a aplicação do coagulante teve pouca interferência no diâmetro médio das bolhas (27 μm na ausência e 29 μm na presença de Al^{+3}).

Outro fator importante no processo de formação das microbolhas é o mecanismo de despressurização. Com relação a este dispositivo, ZABEL (1984) analisou alguns tipos de mecanismos de liberação da recirculação tais como válvulas agulha e bocais patenteados que influenciam diretamente no tamanho das microbolhas.

Assim, pôde-se verificar pela Figura 3.1, que para ambos os tipos de bocais difusores estudados, o tamanho das bolhas está na faixa de 10 a 120 μm .

Figura 3.1 - Distribuição do tamanho de bolhas produzidas por válvula agulha e bocal tipo WRC. (ZABEL, 1984)

O autor também descreve que o ar deve ser liberado próximo ao ponto onde a vazão de recirculação é misturada com a água floculada a fim 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.

RYKAART e HAARHOFF (1995) analisaram a distribuição do tamanho de bolhas em três diferentes variações de bocais de injeção de ar na FAD. Os ensaios foram realizados

utilizando-se câmara de saturação (com recheio e eficiência entre 70 e 80 %), coluna de flotação em acrílico transparente (diâmetro de 200 mm e TAS de 10 m/h) e bocais em escala real. Todos os experimentos foram realizados para pressões de saturação de 2,0 e 5,0 atm.

As variações nos bocais difusores podem ser visualizadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Variações dos bocais difusores testados (RYKAART; HAARHOFF, 1995).

Pode observar-se pela Figura que 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). Obtiveram-se as seguintes conclusões: i) 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, diferentemente do ensaio realizado à pressão de 5,0 atm, onde se constata uma grande diminuição no tamanho das microbolhas abaixo da distância de 10 mm; ii) A fração de macro-bolhas 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; iii) 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 examinou-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 macro-bolhas, devido à quebra destas em seu interior.

Por fim, no experimento 3 examinou-se um bocal difusor com e sem uma saída em forma de cone. Constatou-se que a presença desta saída reduz o tamanho médio das bolhas (principalmente na pressão de 5,0 atm) e a fração de macro-bolhas (para as duas pressões). É possível notar que a pressão de saturação age simultaneamente com outros parâmetros, sendo que a pressão influencia notadamente na concentração de gases capazes de se dissolver no meio líquido.

Em estudo desenvolvido por DE RIJK *et al.* (1994) foram realizados experimentos para determinar a influência de diferentes pressões de saturação (3,5; 5,0 e 6,2 atm) na distribuição do tamanho de microbolhas de ar na FAD. Constatou-se que altas pressões produzem pequenas bolhas, sendo que acima de 5,0 atm, um aumento na pressão de saturação tem um pequeno efeito na distribuição do tamanho de microbolhas. Desta forma, para assegurar a formação de pequenas bolhas, recomendam-se diferenças de pressão de 4,0 a 6,0 atm.

HAN *et al.* (2002) também 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 aumento da pressão até 3,5 atm, sendo que acima desta pressão (considerada crítica) 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.

Em relação ao tamanho dos flocos, EDZWALD (2007) verificou que para partículas superiores a 100 μm alcançarem altas velocidades de ascensão, é necessária a adesão de múltiplas bolhas em sua superfície. 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. Assim, o autor defende a idéia de que o tamanho ideal para os flocos encontra-se na faixa de 20 a 50 μm .

HAN *et. al.* (2001) estudaram a eficiência de colisão entre partículas e bolhas (α_{bp}) em sistema FAD na qual foi proposto, com base em considerações teóricas, um diagrama de eficiência 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 cilindros de acrílico (60 mm de diâmetro x 500 mm de altura e volume efetivo de 1000 mL), como é ilustrado na Figura 3.3, além de um sistema de análise de imagens para determinação da distribuição do tamanho das partículas. As amostras foram preparadas com caulinita (70 mg/L) em Jar Test, sendo aplicado 100 rpm por 30s após a aplicação do coagulante (alumínio) e diferentes tempos de floculação (0, 10, 20 e 30 min.) em 25 rpm. O pH foi variado de 5,2 a 7,1.

Figura 3.3 - Arranjo experimental – escala de bancada. (HAN *et. al.* 2001)

O autor considera o potencial zeta e os tamanhos das partículas e das bolhas como os parâmetros mais importantes na eficiência de colisão, portanto as linhas dos valores apresentados no diagrama de eficiência de colisão (α_{bp}) foram traçados em função da análise

de três potenciais zeta das partículas (-10, 0, +10 mV) como mostrado na Figura 3.4. O potencial zeta das bolhas foi assumido como -25 mV e diâmetro médio das bolhas de 60 μm .

Figura 3.4 - Diagrama de eficiência de colisão para processo FAD. (HAN *et. al.* 2001)

Observa-se que quando se tem o potencial zeta 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.

Portanto, os resultados mostram que a maior eficiência é obtida quando as cargas da superfície das partículas e bolhas estão próximo ao ponto de carga zero e seus tamanhos são similares ou quando os tamanhos das partículas e bolhas são similares e apresentam cargas opostas.

Uma relação da mudança do potencial zeta das partículas com o aumento das dosagens de coagulante para diferentes tempos de floculação pode ser observada na Figura 3.5. O gráfico apresenta um aumento logarítmico com o aumento dos valores de dosagem de alumínio.

Figura 3.5 - Mudança do potencial zeta com a dosagem de alumínio. A legenda mostra o tempo de floculação. (HAN *et. al.* 2001)

As partículas sem coagulante apresentam potencial zeta de -13 mV, tornando-se menos negativo com a adição de alumínio e alcançando a 0 mV com uma dosagem próxima de 10 mg/L

Para a ótima eficiência de remoção das partículas dois parâmetros importantes devem ser avaliados com cuidado, por isso HAN *et. al.* (2001) desenvolveram um gráfico (Figura 3.6) que mostra o contorno da eficiência de remoção no plano de tempo de floculação e potencial zeta.

Figura 3.6 - Eficiência de remoção em função do tempo de floculação e potencial zeta.
(HAN *et. al.* 2001)

A Figura 3.6 mostra que a maior remoção ocorreu quando o potencial zeta foi +10 mV depois de um tempo de 5 minutos de floculação, ou levemente positivo e tempo de floculação excedendo a 10 min., sendo que após este tempo a remoção das partículas não aumenta. O uso de tempos de floculação longos (30 minutos) não é economicamente praticável.

3.2 Características de um Sistema FAD

3.2.1 Unidade de Geração de Microbolhas

Uma correta concepção e uma adequada operação dos equipamentos que compõem uma unidade de geração de microbolhas são de grande relevância para aquisição de bons resultados no processo de flotação, pois está diretamente ligado à geração de bolhas em número suficiente e com distribuição de tamanhos adequados.

Segundo REALI (1991), uma unidade convencional de geração de microbolhas é composta essencialmente de um conjunto moto-bomba para pressurização da água de recirculação, uma câmara de saturação que recebe ar comprimido de um compressor e um dispositivo de despressurização.

A produção de ar em quantidade suficiente é considerada como pré-requisito para uma boa eficiência do processo. Estudos recentes focados na determinação da quantidade de ar necessário para arrastar efetivamente os flocos em suspensão aceitam a faixa de 8 a 10 mg/L para a maioria das aplicações destinadas a clarificação da água (HAARHOFF, 2006).

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

De acordo com SCHOFIELD (2001), muitos projetos de bocais para liberação da massa ar-água têm sido desenvolvidos e apresentam características semelhantes tais como: i) queda de pressão o mais próximo possível do ponto de injeção; ii) a queda de pressão ocorre

em tempo reduzido (menos que 1,5 ms); iii) a trajetória do fluxo oferece uma ou mais mudanças bruscas de direção; entre outras. Entretanto nenhum dos sistemas de bocais é capaz de produzir apenas microbolhas na faixa de 40 a 70 μm e inevitavelmente bolhas maiores são produzidas o que reduz efetivamente a eficiência operacional do sistema.

Atualmente, diversas tecnologias vêm sendo projetadas com o objetivo de substituir a câmara de saturação por outro mecanismo de produção de microbolhas a fim de melhorar sua eficiência e otimizar os custos operacionais.

Em trabalho desenvolvido, HAN *et al.* (2007) estudaram a utilização de um gerador de bolhas com baixo requerimento de energia, o qual apresentava simultaneamente as funções de uma bomba de recirculação, compressor e tanque de pressão. O princípio de geração de bolhas é a simultânea sucção de ar e água para dentro da bomba. Além disso, segundo os autores o mecanismo apresenta condições de produzir bolhas de tamanhos desejados, sendo necessárias mudanças nas condições de operação e na estrutura interna da câmara de mistura. Como resultado deste trabalho foi determinado que o tamanho médio das bolhas produzidas pelo gerador (34 - 43 μm) foi ligeiramente maior que as produzidas pela FAD convencional (28 - 41 μm) para as correspondentes pressões de operação (6 - 3 atm), entretanto analisando a distribuição do tamanho das bolhas produzidas pelo gerador verificou-se que a taxa do número de bolhas são menores, encontrando valores de 15 μm para pressões de 5 e 6 atm comparado ao modelo FAD convencional que apresentou valores de 28 μm . Porém por tratar-se de dispositivo objeto de solicitação de patente, verificou-se neste trabalho a falta de maiores informações sobre a metodologia aplicada.

LEE *et al.* (2007) desenvolveram uma pesquisa utilizando uma bomba geradora de microbolhas. O sistema foi operado em escala real e não se usou nenhum saturador ou tanque de pressurização. A bomba é especialmente projetada para dissolver ar no interior do meio líquido formando finas microbolhas, utilizando para isto um mecanismo de alta pressão de

bombas centrífugas. Testes foram realizados para determinação do tamanho e distribuição das bolhas utilizando um analisador de imagens e um analisador de partículas e verificou-se a geração de microbolhas com diâmetro médio de 43,3 a 53,4 μm . Trabalhando 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 apresentou as seguintes vantagens: ausência de câmara de saturação e compressor de ar, controle simplificado e longo tempo de retenção.

3.2.2 Tanque de Flotação

De acordo com REALI (1991), o critério a ser levado em consideração para a determinação do tamanho da célula FAD é a taxa de aplicação superficial (TAS). O autor ressalta também que para se alcançar uma determinada eficiência no processo de clarificação, o valor da TAS a ser adotada na câmara depende basicamente da velocidade de ascensão do conjunto bolha-floco e que por sua vez depende do volume de ar aderido aos flocos, além do tamanho e densidade dos mesmos.

A zona de contato em especial possui um importante papel no desempenho da FAD, mostrando grande interesse pelos pesquisadores a fim de estudar as melhores condições de operação.

Segundo REALI e MORUZZI (2007), um dos passos mais importantes do processo de FAD ocorre na zona de contato: formação de agregados estáveis bolhas-floco em função da eficiência de colisão e aderência.

No estudo, os autores verificaram as mudanças na distribuição do tamanho das bolhas em função das seguintes condições de operação: tempo de detenção hidráulica na zona de contato, concentração de ar dissolvido e pH. Os ensaios foram realizados em planta piloto e as

bolhas foram medidas por método apropriados baseados em sistema de aquisição de imagem não-intrusivo. Dez condições foram investigadas mantendo fixos a pressão de saturação de 450 ± 10 kPa, temperatura da água de 22 ± 1 °C e o sistema de aquisição de imagem sempre na mesma posição

Os resultados obtidos por REALI e MORUZZI (2007) apontaram o diâmetro das bolhas na faixa de 10 a 100 μ m independentemente das condições investigadas e diâmetro médio variando de 20 a 30 μ m, confirmando assim os dados apresentados na literatura. Considerando a análise de frequência volumétrica, foi demonstrado que os parâmetros investigados podem modificar a distribuição do tamanho das bolhas na zona de contato depois do ponto de liberação e conseqüentemente causarem mudanças na cinética do processo de FAD. Entretanto, pesquisas são necessárias para verificar os efeitos das mudanças na eficiência de remoção de partículas sólidas por FAD.

Outro ponto que atualmente gera grande curiosidade e interesse dos pesquisadores é estudar a influência da geometria da zona de contato no processo de FAD, como observado nos trabalhos de LUNDH *et. al.* (2002) e REALI e PATRIZZI (2007).

LUNDH *et. al.* (2002), em estudo experimental, analisaram modificações realizadas nas dimensões da zona de contato e conseqüentemente na taxa de aplicação superficial, verificando assim as mudanças na estrutura de escoamento do tanque de flotação. Os dados obtidos foram mediante observações realizadas por um medidor acústico Doppler que é baseado no Efeito Doppler, averiguando as principais características do escoamento no interior da zona de contato (ZC) do tanque de flotação. Para análise dos perfis de velocidade foi adotado pelos autores na ZC um sistema de coordenadas definidas em xyz como referência para os pontos de medição. Foram estabelecidas nove diferentes configurações em relação à altura, comprimento e inclinação da placa defletora que funciona como barreira entre as zonas de contato e separação.

As medidas foram realizadas para as mesmas condições de operação e como resultado, LUNDH *et. al.* (2002) concluíram que mudanças na estrutura da unidade modificam a direção de escoamento, sendo que a taxa de aplicação superficial na zona de contato (TAS_{ZC}) de 65 m/h, a velocidade cross-flow (V_{CF}) de 48 m/h, o tempo de detenção hidráulica na zona de contato (T_{ZC}) de 45 s e altura da placa defletora na zona de contato de 91 cm proporcionaram as melhores características na estrutura de escoamento no interior da ZC. No entanto, essas recomendações foram somente baseadas nas questões hidrodinâmicas.

Ainda de acordo com os autores, a água ao alcançar a parede à jusante da placa defletora é forçada a retornar no sentido da mesma (escoamento estratificado). Desta forma, após o escoamento estratificado com a camada menos densa na parte superior (grande quantidade de microbolhas), ocorre o escoamento tendendo a plug-flow na parte inferior (pouca quantidade de bolhas), como pode ser verificado na ilustração da Figura 3.7.

Figura 3.7 - Escoamento idealizado para uma unidade FAD de alta carga hidráulica. Adaptado de LUNDH *et. al.* (2002)

Foi definido também pelos autores que a inclinação da placa defletora da zona de contato não apresentou mudanças significativas no processo, tendo pouca influência na estrutura de escoamento.

Seguindo a mesma linha, REALI e PATRIZZI (2007) verificaram a influência da taxa de aplicação superficial e do tempo de detenção hidráulica na estrutura de escoamento da zona de contato (ZC), além de observarem a eficiência de remoção de cor e turbidez do sistema em função de mudanças nas características da ZC de uma instalação piloto FAD alimentada com água sintética. Para observação da estrutura de escoamento foi utilizado um medidor acústico Doppler. O princípio do procedimento usando este sensor é explicado em detalhes por LUNDH *et al.* (2002).

Os ensaios foram realizados em uma unidade piloto de grande escala com capacidade de até $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$, alimentada com água sintética colorida ($52 \pm 3 \text{ PtCo}$) e de baixa turbidez ($11 \pm 2 \text{ NTU}$). A parede da zona de conato foi mantida na vertical e oito diferentes configurações, em termos de altura e comprimento, foram investigadas. Desta forma foram obtidas diferentes taxas de aplicação superficial - TAS_{ZC} (67, 90, 127 e 180 m/h), diferentes tempos de detenção hidráulicos - T_{ZC} (16, 24, 34, 65 e 88 s) e diferentes valores de velocidade cross-flow - V_{CF} (9 a 45 m/h).

REALI e PATRIZZI (2007) concluíram que o melhor desempenho da planta piloto de FAD foi obtida para uma TAS_{ZC} de 180 m/h (diferente do sugerido por LUNDH *et al.* 2002, TAS_{ZC} de 40 a 98 m/h), associado com T_{ZC} de 34 s, V_{CF} de 45 m/h (confirmando o sugerido por LUNDH *et al.* 2002, $V_{CF} > 37 \text{ m/h}$) e velocidade na entrada da zona de contato (V_{EZC}) de 59 m/h , o que resultou em remoção de 98,3 % de turbidez e 96,4 % de remoção de cor.

Deve-se ressaltar a necessidade da realização de experimentos com velocidades cross-flow acima de 45 m/h , para um melhor entendimento da influência desta variável na eficiência do processo.

Estudos sobre as características geométricas das instalações piloto FAD estão sendo desenvolvidos, já que o tema possibilita diversas pesquisas a fim de definir sua influência na clarificação das águas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Considerações Iniciais

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas nas atividades experimentais as unidades dispostas no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas – LATAR e no Setor de Instalações Piloto vinculadas ao grupo de estudo do Departamento de Hidráulica e Saneamento – SHS/EESC/USP.

O presente trabalho foi dividido em duas Fases, sendo a Fase I realizada em laboratório e utilizando o equipamento **Flotatest** (escala laboratorial) em regime de batelada, onde foram estabelecidas as condições apropriadas de coagulação e floculação em função do tipo de água sintética em estudo.

As condições de coagulação química foram estabelecidas com o uso de sulfato de alumínio como coagulante e de barrilha como alcalinizante (controle do pH de coagulação).

A Fase II foi desenvolvida na unidade de flotação por ar dissolvido em escala piloto (**coagulação, floculação e flotação**) onde foi analisada a interferência das mudanças realizadas na característica física da câmara de flotação, mais precisamente na entrada da zona de contato e constatando sua influência na eficiência de remoção de cor aparente e turbidez.

4.2 Descrição das Unidades Utilizadas

4.2.1 Flotatestes – Escala de laboratório

O aparelho flotatestes é composto por uma câmara de saturação alimentada por água natural e ar (compressor); quatro colunas independentes que funcionam como floculador ou flotador dependendo da função que lhe é estabelecida e um equipamento eletrônico regulador de tensão para controle da rotação das hastes giratórias.

As colunas são confeccionadas em acrílico e possuem hastes removíveis em formato que proporciona uma boa agitação no processo de floculação no interior da câmara, já para a flotação estas hastes são retiradas. As colunas apresentam dois pontos de coleta cada uma, posicionada em alturas pré-definidas e sendo operadas em regime de batelada.

Na câmara ocorre a saturação da água com o ar à alta pressão, sendo a mistura posteriormente transferida através de bocais redutores de pressão (válvula agulha) para as colunas onde o ar inicialmente saturado em meio líquido surge na forma de microbolhas, promovendo assim a flotação dos flocos em suspensão presentes na água.

A Figura 4.1 apresenta uma vista geral do Flotatestes, equipamento em escala de laboratório.

Figura 4.1 - Flotatest utilizado para ensaios em escala de laboratório.

4.2.2 Unidade Piloto de Flotação por Ar Dissolvido – FAD

A unidade piloto utilizada neste projeto associa numa mesma estrutura os processos de coagulação, floculação e flotação, resultando em um sistema bastante compacto e de fácil operação.

A unidade operou em escoamento contínuo com vazão de água bruta afluyente igual a $4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo alimentada por água sintética proveniente de três reservatórios com capacidade de 15 m^3 cada. Vale ressaltar que a unidade é operada de forma semi-automatizada sendo acionada por painel eletrônico e o software mostrado em tela de entrada de dados e apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Conjunto eletro-eletrônico utilizado na pesquisa: **(a)** Painel de controle da unidade piloto FAD e **(b)** software de controle da unidade visualizado na tela de entrada de dados.

A Figura 4.3 a seguir apresenta a instalação piloto retangular de flotação por ar dissolvido (FAD) de escoamento contínuo.

Figura 4.3 – Vista geral da unidade piloto FAD utilizada nos ensaios.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 estão representados a planta e o corte longitudinal da unidade piloto FAD.

Figura 4.4 - Planta da unidade piloto FAD.

Figura 4.5 - Corte A-A da unidade piloto FAD.

4.2.3 Partes Integrantes do Sistema

As seguintes partes compuseram o sistema utilizado na pesquisa durante a Fase II.

- Câmara de Flotação dividida em dois compartimentos (Figura 4.6): zona de contato, região onde ocorre o contato entre a água floculada e a água recirculada (aglomerados bolha-floco) e zona de separação, região onde ocorre a separação da água tratada e o lodo gerado.

Figura 4.6 - (a) Fotografia mostrando uma vista superior em planta da zona de contato vazia seguida da zona de separação da unidade piloto FAD e (b) Fotografia mostrando a formação da manta branca de microbolhas de ar sobre a zona de contato e a formação da camada de lodo sobre a zona de separação.

- Câmaras de floculação com dois compartimentos em série (cada uma possuindo volume de $0,50 \text{ m}^3$) contendo hastes agitadoras, misturadores verticais acionados por inversores de frequência, como pode ser visualizado nas Figuras 4.7 (a) e (b). Os agitadores são compostos de quatro braços e duas paletas por braço.

Figura 4.7 - (a) Vista superior da parte interna das câmaras de floculação com respectivos agitadores e **(b)** inversores de frequência integrados para controle da rotação dos agitadores.

- Unidade de geração de microbolhas composta pela câmara de saturação que recebe o fluxo de água recirculada e o ar comprimido do compressor, além do sistema de despressurização composto de três bocais difusores (válvulas agulha) instaladas na parte inferior da zona de contato. As imagens são visualizadas pelas Figuras 4.8 a 4.10.

Figura 4.8 - Vista geral da câmara de saturação da instalação FAD piloto.

Figura 4.9 - Esquema ilustrativo da câmara de saturação.

A Figura 4.10 mostra o sistema de despressurização composto por três válvulas de agulha.

Figura 4.10 - Detalhes do sistema de despressurização (Válvulas de agulha) integrante do conjunto gerador de microbolhas.

- Comporta - Mecanismo desenvolvido para ajuste da altura na entrada da zona de contato (h_e), proporcionando diferentes velocidades (V_{EZC}) e conseqüentes gradientes médios de velocidade (G_{EZC}). As imagens do mecanismo são visualizadas pelas Figuras 4.11 e 4.12

Figura 4.11 - (a) Vista geral do mecanismo projetado para controle da comporta e (b) detalhe da régua milimetrada para controle da h_e .

Figura 4.12 - Vista interior mostrando a entrada da zona de contato e a comporta para controle da h_e .

- Unidade de mistura “*in-line*” responsável pela mistura rápida do coagulante (Figura 4.13). Esse processo ocorre através de um injetor acoplado à tubulação que possui em seu interior chapas metálica em formato helicoidal.

Figura 4.13 - Vista da unidade de mistura rápida “*in-line*” utilizada para aplicação do produto químico.

- Reservatórios cilíndricos de água com capacidade de 15 m³ cada, ver Figura 4.14 (a) e uma caixa d’água com controle de nível (bóias), ver Figura 4.14 (b). Nos reservatórios são adicionados ácido húmico comercial e caulinita em dosagens previamente determinadas em laboratório. Para a mistura e homogeneização dos produtos, os reservatórios contam com agitadores de eixo vertical capazes de manter a água preparada sob agitação contínua ao longo de todo o período do ensaio. A caixa d’água tem como função controlar a carga hidráulica e proporcionar um fluxo contínuo durante todo o experimento, além de evitar a turbulência e conseqüentemente a formação de bolhas na entrada da tubulação.

Figura 4.14 - (a) Conjunto de reservatórios utilizados para armazenamento da água sintética e (b) sistema de caixa d'água e bóias para controle de nível.

- Aquecedor a gás “*in-line*” instalado antes da unidade de mistura rápida com função de aquecer a água e deixa - lá na temperatura desejada para operação (Figura 4.15).

Figura 4.15 - Aquecedor a gás “*in-line*” utilizados para controle da temperatura da água bruta afluyente durante os ensaios com a unidade piloto FAD.

- Bombas centrífugas. Uma bomba de entrada – THEBE, modelo TH – 16 AL, com motor de 2,0 CV, 3500 rpm, trifásico (Figura 4.16 a) e uma bomba de recirculação – JACUZZI, modelo 5H4A16 – T, com motor de 0,5 CV, 3480 rpm, indução trifásico (Figura 4.16 b).

Figura 4.16 - (a) Bomba centrífuga utilizada para alimentação do sistema FAD e (b) bomba centrífuga utilizada para o sistema de recirculação da água (alimentação da câmara de saturação)

- Sistema composto de dois reservatórios com capacidade de 250 litros cada e duas bombas dosadoras empregadas para dosagem dos produtos químicos (sulfato de alumínio e carbonato de sódio - barrilha) utilizados no processo de coagulação e controle do pH, como pode ser visualizado pelas Figuras 4.17 (a) e (b) respectivamente.

Figura 4.17 - (a) Sistema composto por reservatórios e (b) bombas dosadoras de produtos químicos.

- Medidores de Vazão. Sistema composto de medidores eletromagnéticos – INCONTROL (sinal de saída – pulso), modelo VM5019A2204001 (Figura 4.18 a e b) e medidores verticais (Rotâmetros) para determinação das vazões de entrada e de recirculação (Figura 4.19 a e b).

Figura 4.18 - (a) Medidor de vazão eletromagnético utilizado para controle automático de alimentação da instalação piloto e (b) da vazão de recirculação pressurizada.

Figura 4.19 - Medidores de vazão verticais (Rotômetros) utilizados para calibração e aferição periódica das vazões apresentadas pelos medidores eletromagnéticos, sendo: (a) rotômetro instalado na linha de alimentação de água bruta sintética da instalação piloto e (b) rotômetro implantado junto à linha de recalque da recirculação pressurizada.

4.2.4 Layout da Instalação

O layout da instalação e seus principais componentes utilizados durante a pesquisa podem ser visualizados na Figura 4.20.

O primeiro passo para início do experimento foi a captação da água utilizada no estudo, feita no poço artesiano localizada no campus da USP/São Carlos, sendo bombeada até os reservatórios onde foram adicionados os produtos químicos (ácido húmico e caulinita) e conseqüente agitação e homogeneização de tais produtos na água, através de agitadores contínuos instalados no interior dos reservatórios. Neste ponto também foi adicionado carbonato de sódio (*barrilha*) para correção do pH de todo o volume de água a ser tratado.

Junto aos reservatórios foi instalada uma caixa d'água com controle de nível para ajudar a eliminar interferências devido à carga hidráulica dos reservatórios e evitar a entrada de ar pela tubulação. À jusante da caixa d'água foi instalado um aquecedor a gás “*in-line*” pela qual um volume de água passava com objetivo de controlar a temperatura à 26 ± 1 °C antes de entrar no sistema e dar início ao tratamento.

Foram instalados dois medidores de vazão para controle do fluxo de entrada ao sistema, um medidor eletromagnético antes da mistura rápida e um medidor mecânico vertical (*rotâmetro*) após a mistura rápida.

O processo de mistura rápida com a aplicação do coagulante (sulfato de alumínio) ocorreu através de um injetor acoplado a tubulação, que possuía em seu interior chapas metálicas em formato helicoidal que promoviam a mistura entre o efluente e o coagulante.

Em seguida o fluxo de água seguia para os flocladores da unidade piloto, duas câmaras em série operadas através de inversores de frequência com valores de gradiente médio de velocidade (G) igual a 110 s^{-1} .

Entre a última câmara de floclação e a unidade de flotação foi instalada uma comporta com função de promover a variação da área na entrada da zona de contato da unidade de flotação e conseqüentemente proporcionar diferentes valores de velocidade e gradiente neste local.

O fluxo de água previamente coagulado e floclado eram direcionado para tratamento na unidade de flotação (FAD). Para o processo de saturação da água recirculada e formação das microbolhas foram utilizadas câmara de saturação e sistema de despressurização composto por três válvulas de agulha. Com objetivo de controlar a parcela de água recirculada a ser injetada na unidade de flotação foi instalado um medidor de vazão vertical (rotâmetro) antes da entrada na câmara de saturação e um medidor de vazão eletromagnético entre a câmara de saturação e as válvulas de agulha.

Figura 4.20 - Layout da instalação com seus principais componentes.

4.3 Água de Estudo

A fim de estabelecer condições desejáveis de experimento, o trabalho foi desenvolvido utilizando-se para alimentação da unidade piloto a água sintética, na qual foi preparada com a adição de determinadas concentrações de ácido húmico comercial e caulinita, conferindo cor aparente e turbidez à água homogeneizada. A água empregada neste estudo foi captada diretamente de poço artesiano situado no campus da EESC/USP. (Figura 4.21)

Figura 4.21 - Sistema de captação de água do poço da USP/São Carlos utilizada na preparação da água sintética.

4.3.1 Preparação da Água de Estudo – “Água Sintética”.

Em algumas pesquisas envolvendo tratamento de água adota-se como procedimento utilizar uma água sintética, pois é possível proporcionar diferentes características à água, estabelecendo assim condições desejáveis de experimento. Pode-se, portanto, definir

características de turbidez e cor em função da concentração de produtos químicos adicionados à água.

A água utilizada nos estudos foi preparada obedecendo aos mesmos padrões estabelecidos em trabalho realizado por REALI e PATRIZZI (2007), ou seja, nesta etapa a água de estudo apresentou concentrações de 1 mg/L de ácido húmico comercial (Aldrich 1,675-2) para obtenção de cor aparente e 8,5 mg/L de caulinita (Fluka 60609) para obtenção de turbidez moderada.

Inicialmente, determinou-se a massa dos produtos químicos em função das concentrações e do volume de água no reservatório, definindo assim a quantidade total de ácido húmico e caulinita a serem adicionados.

$$m_{produto} = C_{produto} \times V_{total} \quad (1)$$

$m_{produto}$: massa do produto químico (mg)

$C_{produto}$: concentração do produto químico (mg/L)

V_{total} : volume total (L)

Antes da aplicação, todos os reservatórios eram previamente enchidos com água captada do poço. Cada produto era preparado em recipientes individuais e misturado a 1 L de água para dissolução da massa. Em seguida, eram adicionados ao volume total de água pela parte superior do reservatório. Os agitadores de eixo vertical eram acionados antes da aplicação dos produtos e posteriormente realizava-se a agitação e homogeneização por um período mínimo de 2 h.

Todo esse procedimento era realizado no dia anterior ao experimento. No dia dos experimentos, antes de iniciar-los, os agitadores eram ligados e novamente realizava-se a mistura por um período mínimo de 2 h. Após o início dos trabalhos mantinham-se os agitadores ligados até o final do experimento.

4.4 Procedimentos adotados na preparação e aplicação dos produtos químicos.

Para controlar o valor desejado de pH foi utilizado o carbonato de sódio (20 mg/L), sendo adicionado a massa do produto químico diretamente no reservatório (15 m³), posteriormente a aplicação do ácido húmico e da caulinita. Após o período de homogeneização a água era encaminhada pela tubulação até receber o coagulante e entrar na unidade de tratamento.

O produto químico utilizado como coagulante foi o sulfato de alumínio PA, apresentando dosagens de 42,5 e 22,5 mg/L obtidos previamente em ensaios realizados em laboratório. A solução era preparada separadamente em reservatório de 250 L, onde se dissolvia a massa do produto em um volume conhecido de água. Assim, obtinha-se uma solução na qual era bombeada para o sistema de tratamento através de bomba dosadora.

Os cálculos de concentração da solução de sulfato de alumínio no reservatório e vazão da bomba dosadora foram realizados a partir das equações (2) e (3).

Na Tabela 4.1 são apresentadas as características de trabalho do coagulante utilizado na pesquisa $[Al_2(SO_4)_3]$, definindo além da dosagem de alumínio (Al^{+3}), a concentração da solução e a vazão da bomba dosadora empregados no processo de clarificação da água.

$$C_{\text{solução}} = m_{\text{produto}} / V_{\text{total}} \quad (2)$$

$C_{\text{solução}}$: concentração da solução (mg/L)

m_{produto} : massa do produto químico (mg)

V_{total} : volume total utilizado para a preparação do produto (L)

$$Q_{\text{bomba}} = \frac{D_{\text{produto}} \times Q_{\text{afluente}}}{C_{\text{solução}}} \quad (3)$$

Q_{bomba} : vazão da bomba dosadora (L/h)

Q_{afluente} : vazão de entrada na unidade piloto FAD (L/h)

D_{produto} : dosagem do produto químico (mg/L)

$C_{\text{solução}}$: concentração da solução (mg/L)

Tabela 4.1 - Parâmetros estabelecidos ao produto químico para utilização durante os ensaios na instalação FAD piloto ($Q_{\text{entrada}} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$).

Sulfato de Alumínio Hidratado $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$		
	Conjunto A e B de ensaios	Conjunto C e D de ensaios
Dosagem do coagulante	42,5 mg/L	22,5 mg/L
Dosagem de Alumínio (Al^{+3})	3,63 mg/L	1,92 mg/L
Concentração da solução	11,25 g/L	11,25 g/L
Vazão da bomba dosadora	18,4 L/h	9,3 L/h

4.5 Procedimentos adotados para operação da câmara de saturação.

O bom desempenho do processo de dissolução do ar na água de recirculação está relacionado a uma ótima eficiência da câmara de saturação. Um dos principais fatores é a pressão estabelecida durante a saturação da água recirculada. Para atingir e manter a pressão constante durante todo o experimento, alguns procedimentos devem ser levados em consideração no início da operação do sistema de geração de microbolhas.

1. Inicialmente fecham-se todos os registros de entrada de ar e saída de água;
2. Enche-se completamente de água a câmara, liberando todo o ar em seu interior;
3. Em seguida, regula-se as válvulas agulha permitindo uma vazão de água recirculada de 10% da vazão de projeto e pressão na câmara (*manômetro*) de 4,5 atm. A câmara deve estar toda sem ar;
4. No aparelho regulador de ar instalado junto à câmara, regular em torno de 4,0 atm a pressão;
5. Abrir a válvula de ar e iniciar sua injeção;
6. Abrir o descarte de água e deixar o nível baixar até próximo ao ponto de instalação do regulador de ar;
7. Fechar o descarte;
8. Ajustar a pressão no regulador de ar para 4,5 atm;
9. Esperar a câmara estabilizar e iniciar a operação.

O esquema ilustrativo do sistema gerador de microbolhas pode ser visualizado pela Figura 4.22.

Figura 4.22 - Esquema ilustrativo do sistema gerador de microbolhas.

4.6 Procedimentos adotados na entrada da zona de contato da unidade FAD.

4.6.1 Desenvolvimento do mecanismo de variação da altura na entrada da zona de contato (h_e).

O principal objetivo da pesquisa foi avaliar a influência da velocidade e o seu respectivo gradiente de velocidade gerado na entrada da zona de contato sobre a eficiência de clarificação. A fim de desenvolver um mecanismo que possibilitasse atingir esse objetivo,

projetou-se uma comporta ajustável através de uma haste rosqueada e uma régua graduada em milímetros, precisamente posicionada como pode ser verificado nas Figuras 4.11 e 4.12.

A abertura na entrada da zona de contato possuía originalmente 0,2 m. Com o dimensionamento da comporta foi possível alcançar todas as medidas desejáveis dentro dessa extensão.

O mecanismo foi projetado de modo a evitar qualquer tipo de interferência na zona de contato da câmara de flotação, deixando-a totalmente livre para o movimento ascensional do fluxo de água e do aglomerado floco-bolha.

O mecanismo projetado pode ser melhor visualizado pela Figura 4.23.

Figura 4.23 - Esquema ilustrativo do mecanismo para controle da altura na entrada da zona de contato (h_c) – comporta.

4.6.2 Metodologia adotada para determinação da área, velocidade e valor estimado do gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato (A_{Ezc} , V_{Ezc} , G_{Ezc}).

Para cada estudo realizado, foi efetuado uma variação na área de entrada da zona de contato (A_{Ezc}) e o procedimento teve como ponto de partida as seguintes dimensões: 0,20 m (altura) x 0,40 m (largura), seguindo como base o trabalho desenvolvido por REALI e PATRIZZI (2007).

Sabendo-se a vazão de projeto (Q) em m^3/h e obtendo o valor da A_{Ezc} em m^2 , determinou-se a velocidade de entrada na zona de contato (V_{Ezc}) em m/h pela equação (4):

$$Q = V_{Ezc} \times A_{Ezc} \quad (4)$$

A determinação do valor estimado do gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato (G_{Ezc}) em s^{-1} depende das propriedades físicas da água, entretanto estas variáveis estão em função da temperatura. Em condições de operação foi adotada temperatura (T) de 26 °C. Para uma estimativa do valor de G_{Ezc} a equação (5) foi empregada:

$$G_{Ezc} = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu} * V_{Ezc} * J} \quad (5)$$

γ : Peso específico da água = 996,95 kg/m^3 (26 °C)

μ : Viscosidade da água = 0,0000934 $kg.s/m^2$ (26 °C)

J : perda de carga unitária na entrada da zona de contato (m/m)

Para a determinação da perda de carga unitária (J) foi utilizado a expressão definida por Manning:

$$n = \frac{A_{EZC} * R_h^{2/3} * J^{1/2}}{Q} \quad (6)$$

com,

$$J^{1/2} = \frac{n * V_{EZC}}{R_h^{2/3}} \quad (7)$$

n: parâmetro que depende da rugosidade da parede

R_h : raio hidráulico (m)

V_{EZC} : velocidade na entrada da zona de contato (m/s)

Assim, substituindo a expressão (7) em (5) pode-se definir a fórmula geral para determinação do valor estimado do G_{EZC} :

$$G_{EZC} = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} * V_{EZC}^{3/2} * \frac{n}{R_h^{2/3}} \quad (8)$$

Em função das características do material na entrada da zona de contato foi adotado “n” igual a 0,012 (chapa de aço).

Com base nas equações (4) a (8) previamente definidas, foi possível determinar os valores da A_{EZC} , V_{EZC} e o valor estimado do G_{EZC} a serem empregados nos conjuntos de ensaios (A, B, C e D) da Fase II realizados na instalação piloto, como pode ser verificado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores de área, velocidade e gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato obtidos em função dos parâmetros de projeto, sendo estimados antes da realização dos conjuntos de ensaios (A, B, C e D) da Fase II realizados na unidade FAD piloto.

Ensaio	h_e (mm)	A_{EZC} (m²)	$Q_{entrada}$ (m³/h)	V_{EZC} (m/h)	V_{EZC} (m/s)	G_{EZC} (s⁻¹)
1	200	0,074	4,6±0,1	62,2	0,017	0,6
2	150	0,055	4,6±0,1	82,9	0,023	1,0
3	100	0,037	4,6±0,1	124,3	0,034	2,2
4	69	0,026	4,6±0,1	180,2	0,050	4,7
5	50	0,018	4,6±0,1	248,6	0,069	9,2
6	20	0,007	4,6±0,1	621,6	0,173	63,6
7	10	0,004	4,6±0,1	1.243,2	0,345	280,6
8	8	0,003	4,6±0,1	1.554,0	0,432	453,5
9	5	0,002	4,6±0,1	2.486,5	0,691	1.248,9
10	3	0,001	4,6±0,1	4.144,1	1,151	3.764,1
11	1	0,0004	4,6±0,1	12.432,4	3,453	40.538,4

4.7 Programação dos Ensaios

4.7.1 Fase I: Ensaios com Flotatestes para determinação da dosagem adequada de coagulante, pH de coagulação e medição do potencial zeta das partículas, gradiente médio de velocidade de floculação e tempo médio de floculação.

Nesta fase foram realizados ensaios com o equipamento flotatestes, sendo dividido em duas etapas. **Etapa 1:** Determinação da dosagem adequada de coagulante, pH de coagulação e medição do potencial zeta das partículas para o tratamento da água em estudo. **Etapa 2:** Determinação do gradiente médio de velocidade e tempo médio de floculação mais adequados para a flotação, adotando-se as melhores condições de coagulação obtidas na etapa anterior.

Na **Etapa 1** foram aplicadas diferentes dosagens de sulfato de alumínio (D_{coag} , igual a 7,5; 10,0; 12,5; 15,0; 17,5; 20,0; 22,5; 25,0; 27,5; 30,0; 32,5; 35,0; 37,5; 40,0; 42,5; 45,0 e 47,5 mg/L) e para controle do pH foram adicionados diferentes dosagens de ácido sulfúrico ou carbonato de sódio para diminuir ou elevar respectivamente seu valor.

Para cada ensaio realizado com uma específica dosagem de coagulante aplicado foram medidos os valores de potencial zeta das partículas gerados em função de cada pH de coagulação. Sabe-se que as melhores eficiências de remoção das partículas são encontradas para valores de carga superficial próximo a zero ou para valores de cargas opostas entre partículas e bolhas, conforme HAN *et. al.* (2001).

Desta forma, determinaram-se duas dosagens de coagulantes a serem utilizadas na Etapa II, sendo que em ambas as condições verificaram-se floculação eficiente, uma que proporcionou potencial zeta próximo de zero e outra para potencial zeta positivo, pois de

acordo EDZWALD (2010) a carga elétrica superficial nas microbolhas de ar em processo de flotação de águas naturais é negativa.

Para a realização dos ensaios da Etapa 1 foi necessária a fixação dos parâmetros apresentados na Tabela 4.3, os quais foram adotados com base em estudos anteriores realizados por REALI e PATRIZZI (2007), com a mesma água de estudo.

Tabela 4.3 - Condições fixadas durante os ensaios da Etapa 1 (Fase I).

Gradiente médio de velocidade para mistura rápida (G_{MR}) - s^{-1}	800
Tempo médio de mistura rápida (T_{MR}) - s	20
Gradiente médio de velocidade para floculação ($G_{floc.}$) - s^{-1}	80
Tempo médio de floculação ($T_{floc.}$) - min	20
Pressão na câmara de saturação (p) - kPa	450±10
Temperatura da água (t) - °C	26±1
Razão de recirculação (R) - %	10

No final de cada teste foram analisadas as amostras coletas para se obter as eficiências de remoção da turbidez e cor aparente.

O fluxograma representativo dos ensaios realizados em laboratório é apresentado pela Figura 4.24.

Figura 4.24 - Fluxograma dos ensaios realizados na Fase I - Etapa 1.

Dosagem de coagulante, pH de coagulação e medição do potencial zeta das partículas (PZ).

Na **Etapa 2**, após definição dos valores adequados de dosagem de coagulante, dosagem de barrilha e pH de coagulação foi feito um estudo em função de diferentes gradientes médios de velocidade de floculação (70, 80, 90, 100 e 110 s^{-1}) e tempos médios de floculação (12, 16 e 20 min), a fim de encontrar os parâmetros adequados para o tipo de água em estudo.

Na Figura 4.25 pode ser visualizado o esquema ilustrativo dos ensaios realizados da Etapa 2.

Os parâmetros mantidos fixos durante todos os ensaios da Etapa 2 com base em estudo realizado por REALI e PATRIZZI (2007) são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Condições fixadas durante os ensaios da Etapa 2 (Fase 1).

Gradiente médio de velocidade para mistura rápida (G_{MR}) - s^{-1}	800
Tempo médio para a mistura rápida (T_{MR}) - s	20
Pressão na câmara de saturação (p) - kPa	450±10
Temperatura da água (t) - °C	26±1
Razão de recirculação (R) - %	10

Os ensaios foram monitorados e avaliados para determinação dos valores mais adequados de floculação na obtenção dos resultados mais eficientes de remoção de turbidez e cor aparente para a água de estudo.

Figura 4.25 - Fluxograma dos ensaios realizados na Fase I - Etapa 2.

Gradiente médio de velocidade de floculação (G_{floc}) e Tempo médio de detenção hidráulica de floculação (T_{floc}).

4.7.2 Fase II: Ensaios com Unidade em Escala Piloto – FAD.

Esta fase foi realizada utilizando a unidade piloto de flotação por ar dissolvido – FAD localizada no setor de instalações piloto da EESC/USP, onde foi utilizado o mecanismo desenvolvido e implantado na entrada da zona de contato.

Para a obtenção de diferentes valores de velocidade na entrada da zona de contato (V_{EzC}) foram realizados ensaios na qual foram adotados onze diferentes aberturas, com valores compreendidos entre a abertura máxima permitida pelas dimensões da piloto (200 mm) e a abertura mínima igual a apenas 1 mm. Foram investigados os seguintes valores para a abertura na entrada da zona de contato (h_e): **200; 150; 100; 69; 50; 20; 10; 8; 5; 3 e 1 mm.**

Os valores de h_e foram adotados com objetivo de determinar o ponto limite de estrangulamento da comporta, momento onde se evidenciaria um decaimento da eficiência de clarificação e a partir do qual se tornaria inviável o tratamento, além de determinar a região ótima de eficiência de tratamento, a qual proporcionaria menor interferência sobre as partículas anteriormente floculadas e menores efeitos da turbulência no contato da água floculada com a água previamente saturada.

Dentre as aberturas utilizadas incluiu-se a medida de 69 mm, pois esta proporciona V_{EzC} semelhante ao valor da taxa de aplicação superficial na zona de contato igual a 180 m/h.

Os ensaios foram realizados para duas condições determinadas na Etapa 1, ou seja, duas condições diferentes de dosagem de coagulante, pH de coagulação e valor do potencial zeta das partículas.

Na Fase II foram realizados quatro conjuntos de ensaios (**conjuntos A, B, C e D**), sendo que a primeira condição (conjuntos A e B de ensaios) foi desenvolvida para dosagem de coagulante igual a 42,5 mg/L e potencial zeta das partículas positivo e a segunda condição

(conjuntos C e D de ensaios) para dosagem de coagulante igual a 22,5 mg/L e potencial zeta das partículas próximo de zero.

As Figuras 4.26 (a) a (f) apresentam imagens de todas as medidas da entrada da zona de contato (h_e) na qual foram realizados os ensaios.

Figura 4.26 (a) - Vista de h_e igual a 200 mm.

Figura 4.26 (b) - Vista de h_e igual a 150 mm.

Figura 4.26 (c) - Vista de h_e igual a 100 mm.

Figura 4.26 (d) - Vista de h_e igual a 69 mm.

Figura 4.26 (e) - Vista de h_e igual a 50 mm.

Figura 4.26 (f) - Vista de h_e igual a 20 mm.

Figura 4.26 (g) - Vista de h_e igual a 10 mm

Figura 4.26 (h) - Vista de h_e igual a 8 mm

Figura 4.26 (i) - Vista de h_e igual a 5 mm

Figura 4.26 (j) - Vista de h_e igual a 3 mm

Figura 4.26 (k) - Vista de h_e igual a 1 mm

Figura 4.26 (l) - Vista de h_e igual a 0 mm

Com exceção das variações realizadas pela comporta, todas as demais características físicas foram mantidas fixas na zona de contato: $L_{ZC} = 0,40$ (comprimento da zona de contato) m; $B_{ZC} = 0,071$ m (largura da zona de contato) e $H_{ZC} = 1,70$ m (altura da zona de contato). Toda essa configuração foi adotada respeitando os critérios apresentados por REALI e PATRIZZI (2007) a fim de produzir os melhores resultados da unidade piloto.

A vazão de projeto (Q) adotada foi de $4,6 \pm 0,1$ m³/h e a vazão de recirculação ($Q_{rec.}$) correspondente a 10 % igual a $0,46 \pm 0,01$ m³/h, o que proporcionou em função dos dados da zona de contato uma $TAS_{ZC} = 180 \pm 4$ m/h e $T_{ZC} = 34 \pm 1$ s.

Os ensaios também apresentaram os seguintes valores de operação na unidade piloto de flotação: $TAS_{CLAR.} = 184 \pm 4$ m/d e $V_{CF} = 45 \pm 1$ m/h.

Os demais parâmetros de operação foram ajustados no início de cada experimento e controlados durante toda a realização dos ensaios. Os valores são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros controlados durante a Fase II.

Conjunto de ensaios	* D_{Coag} (mg/L)	*pH	* G_{floc} (s^{-1})	* T_{floc} (min)	T (°C)	**P (kPa)	**R (%)
A e B	42,5	6,35±0,05	110	12	26±1	450±10	10
C e D	22,5	6,40±0,05	110	12	26±1	450±10	10

* Valores determinados na Fase I – Etapa 1. Dosagem do coagulante (D_{Coag}), pH de coagulação, gradiente médio de velocidade de floculação (G_{floc}) e tempo médio de detenção hidráulica de floculação (T_{floc}).

** Pressão na câmara de saturação (P) e razão de recirculação (R).

Mantidos os parâmetros de projeto, foi possível realizar todos os ensaios da Fase II como pode ser visualizado no esquema ilustrativo apresentado na Figura 4.27.

Para cada ensaio dos conjuntos A, B, C e D foram coletadas e preparadas amostras compostas, as quais passaram por análises a fim de determinar as melhores eficiências do processo de flotação da unidade piloto em função dos parâmetros estabelecidos na pesquisa (turbidez e cor aparente).

Figura 4.27 - Esquema ilustrativo dos ensaios realizados na Fase II

Taxa de aplicação superficial na zona de clarificação (TAS_{CLAR}); Taxa de aplicação superficial na zona de contato (TAS_{ZC}); Tempo de detenção na zona de contato (T_{ZC}); Velocidade cross-flow (V_{CF}); Pressão de saturação (P); Razão de recirculação (R); Dosagem de coagulante (D_{coag}); Altura na entrada da zona de contato (h_e).

4.8 Monitoramento dos Ensaios

Os ensaios realizados nesta pesquisa foram devidamente monitorados de modo a alcançar as melhores condições experimentais.

Para obtenção dos resultados, foram realizadas análises físico-químicas seguindo criteriosamente as normas estabelecidas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005) e desenvolvido no Laboratório de Tratamento Avançado e Reúso de Águas – LATAR/SHS/EESC/USP.

4.8.1 Fase I

Na Fase I, para as amostras coletadas nos ensaios realizados no flotatestes bem como as amostras da água brutas foram realizadas apenas medidas de turbidez e cor aparente. Deve-se destacar, no entanto, que em todas as análises realizadas no flotatestes foram indispensáveis as correções dos valores encontrados. Este método é necessário, pois neste equipamento ocorreu a mistura entre a água sintética a ser tratada e a água contida no interior da câmara de saturação (proveniente da torneira), a qual é recirculada para as colunas de flotação. A determinação dos valores corrigidos foi obtida através da seguinte fórmula:

$$L_{real} = \frac{L_{mistura} \times (V_{amostrabruta} + V_{recirculação})}{V_{amostrabruta}} \quad (9)$$

$L_{mistura}$: valor da amostra obtido na análise

L_{real} : valor da amostra corrigida

$V_{amostrabruta}$: volume da amostra bruta

$V_{recirculação}$: volume de água recirculada

4.8.2 Fase II

Na Fase II realizada na unidade piloto de FAD, inicialmente fez-se o ajuste das variáveis envolvidas no processo e durante os ensaios fez-se necessário o controle destas variáveis operacionais sendo monitorado entre cada coleta das amostras.

Os seguintes itens foram controlados:

- Vazão de entrada;
- Vazão de recirculação;
- Pressão na câmara de saturação;
- Concentração de coagulante;
- Potencial Zeta das partículas.

Após procedimentos de controle, esperou-se a estabilização da unidade piloto por período de 30 minutos e iniciaram-se as coletas das amostras pontuais de água floculada e de água flotada (clarificada) em intervalos de 10 min. Para estas amostras foram realizadas medidas de cor aparente e turbidez.

Verificando o ponto de estabilização de cada ensaio e com os melhores resultados obtidos nas amostras pontuais foram preparadas amostras compostas.

A Tabela 4.6 apresenta as análises realizadas para as amostras compostas de água bruta, água floculada e água clarificada

Tabela 4.6 - Parâmetros físico-químicos analisados para a água em estudo.

Parâmetros	Água Bruta	Água Floculada	Água Flotada
Temperatura	X		X
pH	X	X	
Cor Aparente	X		X
Turbidez	X		X
Absorbância 254nm	X		X
Alcalinidade	X		X
Condutividade	X		X

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 FASE I – Ensaio em Flotatestes para determinação das dosagens adequadas de coagulante, pH de coagulação e medição do potencial zeta das partículas, gradiente médio de velocidade de floculação e tempo médio de floculação para o tratamento da água bruta sintética em estudo.

Para o início dos trabalhos foram definidos alguns importantes parâmetros de projeto, sendo estes baseados em estudos realizados por REALI e PATRIZZI (2007).

O valor da vazão afluente adotado foi de 4,6 m³/h e taxa de recirculação de 10%. A taxa de aplicação superficial (zona de clarificação) equivalente a 184,0 m/dia ($V_F = 12,8$ cm/min).

5.1.1 ETAPA 1: Determinação da dosagem de coagulante, pH de coagulação e medição do potencial zeta das partículas.

Para a determinação dos valores adequados da dosagem de coagulante - $Al_2(SO_4)_3$ -, diferentes dosagens foram aplicadas à água de estudo ($D_{coag} = 7,5; 10,0; 12,5; 15,0; 17,5; 20,0; 22,5; 25,0; 27,5; 30,0; 32,5; 35,0; 37,5; 40,0; 42,5; 45,0$ e $47,5$ mg/L) para definir a quantidade de produto químico necessário ao apropriado tratamento da água sintética na unidade piloto FAD.

Os resultados obtidos nesta ETAPA podem ser visualizados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados referentes aos ensaios no Flotatesto ($V_F = 12,8$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC. *Continua...*

D_{COAG} (mg/L)	pH de Coagulação	Turbidez (NTU)	Cor Aparente (uC)	Eficiências (%)	
				Turbidez	Cor Aparente
7,5	6,12	1,70	13	77,9	80,0
	6,26	1,23	8	84,1	87,7
	6,41	1,69	12	78,1	81,5
	6,64	3,63	28	52,9	56,9
10,0	5,96	5,81	38	24,7	41,5
	6,33	0,66	8	91,5	87,7
	6,45	0,87	9	88,7	86,2
	6,61	1,10	13	85,8	80,0
12,5	5,91	5,16	38	33,2	41,5
	6,26	0,66	7	91,5	89,2
	6,46	0,75	7	90,3	89,2
	6,68	1,08	9	86,0	86,1
15,0	5,84	5,86	38	24,1	41,5
	6,16	0,66	6	91,5	90,8
	6,44	0,59	4	92,4	93,8
	6,75	0,73	8	90,4	87,7
17,5	6,00	5,92	38	23,3	41,5
	6,13	0,56	4	92,7	93,8
	6,41	0,40	2	94,8	96,9
	6,77	0,79	12	89,7	81,5
20,0	6,02	7,88	40	0	38,3
	6,13	0,46	2	94,0	96,9
	6,50	0,40	1	94,8	98,5
	6,84	0,77	4	90,0	93,8
22,5	6,07	3,34	32	56,7	50,8
	6,35	0,36	1	95,3	98,5
	6,58	0,34	1	95,6	98,5
	6,89	0,69	4	91,1	93,8
	6,98	0,99	7	86,9	89,2
25,0	6,16	10,7	-	0	0
	6,28	9,20	-	0	0
	6,37	0,75	6	90,8	90,8
	6,55	0,64	5	92,3	92,3
	6,73	0,91	6	90,8	90,7
	6,93	0,98	7	89,2	89,2
27,5	6,11	12,2	-	0	0
	6,22	10,40	-	0	0
	6,33	0,83	7	89,2	89,2
	6,56	0,62	4	92,0	93,8
	6,79	0,71	6	90,8	90,8
	6,97	1,01	7	88,5	89,2

*Os resultados iguais a zero representam ineficiência dos ensaios realizados no flotatesto.

...Continuação. **Tabela 5.1** - Resultados referentes aos ensaios no Flotatesto ($V_F = 12,78$ cm/min).
 Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

DOS _{COAG} (mg/L)	pH de Coagulação	Turbidez (NTU)	Cor Aparente (uC)	Eficiências (%)	
				Turbidez	Cor Aparente
30,0	6,30	2,75	24	64,4	63,1
	6,38	0,69	6	91,1	90,8
	6,55	0,66	3	91,5	95,4
	6,87	0,65	6	91,6	90,8
	6,97	0,80	7	89,6	89,2
	7,07	1,00	8	87,0	87,7
32,5	6,23	7,44	53	3,62	18,5
	6,36	0,87	6	88,7	90,8
	6,44	0,65	3	91,9	95,4
	6,88	0,69	5	91,3	92,3
	7,09	0,79	10	90,2	84,6
35,0	6,20	9,79	56	0	0
	6,32	0,88	5	88,6	92,3
	6,49	0,71	3	90,8	95,4
	6,74	0,60	6	92,2	90,8
	7,15	1,12	13	85,5	86,2
37,5	6,15	8,81	60	0	0
	6,25	0,77	7	90,0	89,2
	6,39	0,54	3	93,0	95,4
	6,50	0,56	3	92,7	95,4
	6,93	0,68	4	91,1	93,8
	7,08	1,22	8	84,4	87,7
40,0	6,26	0,93	8	88,0	87,7
	6,38	0,71	5	90,8	92,3
	6,47	0,56	4	92,7	93,8
	6,59	0,61	3	92,1	95,4
	6,78	0,60	4	92,2	93,8
	6,97	0,67	6	91,3	90,8
42,5	6,21	9,57	60	0	0
	6,39	0,53	4	93,1	93,8
	6,63	0,55	2	92,9	96,9
	6,96	0,56	3	92,7	95,4
	7,10	1,77	16	77,0	75,4
45,0	6,17	10,30	4	0	93,8
	6,51	0,54	4	93,0	93,8
	6,88	0,75	13	90,3	80,0
	7,09	1,31	50	83,0	0
47,5	6,17	10,60	54	0	0
	6,51	0,57	3	92,6	95,4
	6,91	0,81	4	89,5	93,8
	7,12	1,61	12	79,1	81,5

*Os resultados iguais a zero representam ineficiência dos ensaios realizados no flotatesto.

Com base nos resultados mostrados na Tabela 5.1 e nos gráficos apresentados nos **APÊNDICES A e B**, foi possível construir os diagramas de remoção dos parâmetros analisados (Figuras 5.1 e 5.2), que mostram para cada dosagem de coagulante a faixa de pH onde é possível obter eficiência de remoção maior ou igual a 90% (área azul do gráfico) e eficiência de remoção maior ou igual a 92% (área vermelha do gráfico) na etapa de clarificação da água.

Figura 5.1 - Diagrama de remoção de turbidez por flotação, com aplicação de sulfato de alumínio, onde é mostrado a região (pH x dosagem de coagulante) que resultou em eficiências de remoção maiores ou iguais a 90% e maiores ou iguais a 92%.

Figura 5.2 - Diagrama de remoção de cor aparente por flotação, com aplicação de sulfato de alumínio, onde é mostrado a região (pH x dosagem de coagulante) que resultou em eficiências de remoção maiores ou iguais a 90% e maiores ou iguais a 92%.

Com base nos resultados mostrados na Tabela 5.1 e nas Figuras 5.1 e 5.2, observa-se que para as dosagens de sulfato de alumínio maiores ou iguais a 15 mg/L, a faixa de pH que forneceu as maiores eficiências de remoção de cor e turbidez (acima de 90 %) situou-se entre 6,3 e 6,6. Para esses valores de dosagem de sulfato de alumínio (maiores ou igual a 15 mg/L), verifica-se que a dosagem de 22,5 mg/L (para a faixa de pH entre 6,3 e 6,6) foi a que apresentou os melhores resultados de remoção de cor e turbidez (eficiência maior que 92 %), com residuais de cor aparente em torno de 1,0 uC (eficiência igual a 98,5 %) e de turbidez na faixa de 0,34 a 0,36 NTU (eficiência na faixa de 95,3 a 95,6 %).

O critério considerado para escolha do pH de coagulação foi estabelecido para valores que resultassem em residuais de turbidez menor que 1,0 NTU e que apresentassem uma ampla faixa de trabalho com bons resultados de clarificação.

Conforme comentado no Capítulo 4 (Material e Métodos), na presente pesquisa foram adotadas duas condições de coagulação/flotação que satisfizeram o critério citado, porém com dosagens distintas de coagulante, as quais produziram partículas desestabilizadas que apresentaram diferentes valores de potencial zeta: uma situação de partículas com PZ próximo de zero (dosagem de sulfato de alumínio igual a 22,5 mg/L) e outra que resultou em partículas com PZ positivo (dosagem de sulfato de alumínio igual a 42,5 mg/L).

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados de PZ obtidos pelo aparelho Zetameter em função dos valores de pH de coagulação para as duas dosagens de sulfato de alumínio escolhidas ($D_{coag} = 22,5 \text{ mg/L}$ e $42,5 \text{ mg/L}$).

Com os resultados obtidos foi possível gerar o gráfico que mostra o efeito do pH no potencial zeta das partículas após a adição de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para cada dosagem de coagulante escolhida, como pode ser visualizado na Figura 5.3.

Tabela 5.2 - Valores do potencial zeta em função do pH de coagulação para as dosagens de coagulante selecionadas.

Dosagem de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 22,5 \text{ mg/L}$	
pH de coagulação	Potencial Zeta (mV)
6,05	$15,9 \pm 0,3$
6,26	$4,1 \pm 0,6$
*6,42	$0,5 \pm 0,8$
6,61	$-3,9 \pm 0,4$
6,89	$-14,6 \pm 1,1$
7,17	$-22,2 \pm 0,5$
Dosagem de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 42,5 \text{ mg/L}$	
pH de coagulação	Potencial Zeta (mV)
5,46	$19,5 \pm 0,4$
5,94	$15,5 \pm 0,4$
6,26	$12,1 \pm 0,4$
*6,34	$9,7 \pm 0,6$
6,68	$-4,3 \pm 0,6$
6,88	$-16,2 \pm 0,6$

*Melhores eficiências de remoção.

Figura 5.3 - Efeito do pH no potencial zeta das partículas com a adição das dosagens de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ selecionadas.

Assim, ao analisar a Figura 4.41 observa-se que quando se aplica uma dosagem de coagulante de 22,5 mg/L, o pH de coagulação em torno de $6,40 \pm 0,05$ corresponde a faixa onde o PZ das partículas se aproxima de zero, situação essa que forneceu os melhores resultados de remoção de turbidez e cor aparente como comentado anteriormente. Também é possível verificar a relação do PZ para a dosagem de coagulante de 42,5 mg/L, na qual verificou-se para um PZ positivo (próximo de +10 mV) um pH de coagulação em torno de $6,35 \pm 0,05$, situação essa que também forneceu bons resultados de remoção de turbidez e cor aparente.

Estes resultados confirmam o exposto em trabalho desenvolvido por HAN *et. al.* (2001) que apontam para uma melhor eficiência de colisão entre partículas e bolhas quando ocorrem situações de PZ das partículas positivo e carga superficial das bolhas negativa.

5.1.2 ETAPA 2: Determinação do gradiente médio de velocidade de floculação e tempo médio de floculação.

Na ETAPA 2, como descrito no item 4.7.1, fez-se uma avaliação detalhada do gradiente médio de velocidade de floculação (G_{floc}) e do tempo médio de floculação (T_{floc}). Os ensaios foram realizados para G_{floc} de 70, 80, 90, 100 e 110 s^{-1} e T_{floc} de 12, 16 e 20 minutos.

Os resultados desta Etapa obtidos em laboratório (Flotateste) são apresentados na Tabela 5.3, sendo possível analisar e definir os valores de G_{floc} e T_{floc} a ser utilizado na unidade piloto FAD para tratamento da água sintética em estudo.

Tabela 5.3 - Resultados referentes aos ensaios no Flotateste ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,8 NTU; Cor aparente = 64 uC. $D_{coag} = 42,5$ mg/L.

G_{floc} (s^{-1})	T_{floc} (min.)	pH de coagulação	Turbidez (NTU)	Cor (uH)	Eficiências (%)	
					Turbidez	Cor Aparente
70	12	6,44	0,45	2	94,2	96,9
80	12	6,43	0,46	3	94,1	95,3
90	12	6,44	0,41	2	94,7	96,9
100	12	6,42	0,42	2	94,6	96,9
110	12	6,40	0,39	2	95,0	96,9
70	16	6,40	0,49	3	93,7	95,3
80	16	6,41	0,52	3	93,3	95,3
90	16	6,43	0,41	2	94,7	96,9
100	16	6,43	0,43	2	94,4	96,9
110	16	6,44	0,43	2	94,4	96,9
70	20	6,43	0,47	3	94,0	95,3
80	20	6,44	0,50	3	93,6	95,3
90	20	6,39	0,42	2	94,6	96,9
100	20	6,41	0,43	2	94,4	96,9
110	20	6,43	0,41	2	94,7	96,9

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.3, pode-se verificar que na maior parte dos ensaios realizados no Flotateste, a eficiência de remoção de turbidez e cor aparente residuais foram superiores a 93%, independentemente do gradiente médio de velocidade na floculação (G_{floc}) e tempo de detenção hidráulica médio na floculação (T_{floc}) investigados. Observa-se que os valores de G_{floc} e T_{floc} que apresentaram valores residuais de turbidez e cor aparente ligeiramente menor que os demais foram: G_{floc} igual a $110 s^{-1}$ e T_{floc} igual a 12 min.

Finalizado os ensaios da Fase I, os seguintes valores foram adotados e divididos em duas condições de trabalho: i) $D_{coag} = 42,5$ mg/L, pH de coagulação = $6,35 \pm 0,05$, PZ positivo em torno de 10 ± 2 mV, $G_{floc} = 110 s^{-1}$ e $T_{floc} = 12$ min.; ii) $D_{coag} = 22,5$ mg/L, pH de

coagulação = $6,40 \pm 0,05$, PZ próximo de zero em torno de 1 ± 2 mV, $G_{\text{floc}} = 110 \text{ s}^{-1}$ e $T_{\text{floc}} = 12$ min.

5.2 FASE II – Ensaios com unidade em escala piloto FAD para avaliação da influência da velocidade de entrada na zona de contato sobre a eficiência de clarificação de águas para abastecimento.

Na Fase II, avaliou-se a influência da velocidade de entrada na zona de contato sobre a eficiência de clarificação da água sintética em estudo, sendo aplicado em uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido.

Os ensaios foram separados em duas condições de trabalho em função da dosagem de coagulante aplicado como descrito anteriormente. Os parâmetros de projeto dos ensaios realizados nesta fase são apresentados na Tabela 5.4

É importante ressaltar que em todos os ensaios realizados procurou-se manter os parâmetros TAS_{ZC} , T_{ZC} , TAS_{CLAR} , V_{CF} , Razão de recirculação e Pressão de operação na câmara de saturação (apresentados no item 4.7.2, Tabela 4.5) fixados em faixas estreitas de valores, sendo variado apenas a altura de entrada na zona de contato - h_e (200, 150, 100, 69, 50, 30, 10, 8, 5, 3, 1 mm) na qual proporcionou para cada valor de h_e um correspondente valor de A_{EZC} , V_{EZC} e valores estimados do G_{EZC} na passagem entre a zona de floculação e a zona de contato. Tais valores foram estimados com emprego da formulação apresentada no item 4.6.2 e apresentado na Tabela 4.2.

Nos ensaios da Fase II, foram coletadas amostras de água sintética bruta e da água tratada pela unidade piloto a cada 10 minutos, totalizando seis amostras pontuais. Com base na estabilização das leituras de turbidez e cor aparente das amostras coletadas, obtiveram-se

as amostras compostas, as quais eram preparadas com a mistura das amostras pontuais coletadas ao longo de cada ensaio.

Os ensaios da Fase II foram desenvolvidos em duas condições diferentes em função do potencial zeta das partículas:

5.2.1 1ª Condição: Potencial Zeta das partículas Positivo (em torno de +10 mV).

Para a 1ª condição de estudo (conjunto A e B de ensaios) foi adotado PZ positivo (em torno de +10 mV) em todos os ensaios de cada conjunto. Nesses dois conjuntos de ensaios (A e B) foi aplicado uma dosagem de coagulante de 42,5 mg/L e pH de coagulação de $6,35 \pm 0,05$.

O conjunto A de ensaios com dosagens de 42,5 mg/L de sulfato de alumínio e PZ próximo de +10 mV, foi iniciado (Ensaio 1A) com abertura máxima na passagem da zona de floculação para a zona de contato (200 mm, correspondente a uma V_{EzC} de 62,2 m/h). Nos ensaios subsequentes do conjunto A, os valores dessa abertura foram diminuídas paulatinamente, conforme mostrado na Tabela 5.4. No conjunto B de ensaios, também realizado com dosagem de coagulante de 42,5 mg/L e PZ próximo de +10 mV, essa ordem foi invertida, ou seja, no ensaio 1B (ensaio 1 do conjunto B), a abertura imposta na passagem da zona de floculação para a zona de contato foi a mínima (1 mm, correspondente à V_{EzC} de 12.432,4 m/h). Nos ensaios subsequentes do conjunto B essa abertura foi paulatinamente aumentada conforme indicado na Tabela 5.5.

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam as características da água bruta e os resultados (residuais de turbidez, cor aparente, absorvância 254, alcalinidade total, condutividade elétrica) obtidos ao longo dos conjuntos A e B de ensaios realizados com a instalação piloto

de flotação. Estes valores correspondem às amostras compostas feitas a partir das amostras obtidas pontualmente.

As Tabelas citadas também apresentam os valores dos potenciais zeta das partículas medidos instantes após a coagulação durante cada variação da h_c .

A partir dos resultados mostrados nas Tabelas 5.4 e 5.5, construíram-se os gráficos apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5, os quais comparam os valores de eficiências de remoção de turbidez e cor aparente obtidos em cada ensaio dos conjuntos A e B.

Os valores pontuais de turbidez das amostras flotadas na unidade piloto durante a realização dos onze ensaios do conjunto A e do conjunto B são apresentados no **APÊNDICE C**.

Tabela 5.4 - Resultados finais referentes às amostras compostas para PZ positivo (**Conjunto A de ensaios**).
Sentido de $h_e = 200 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ mm}$

ÁGUA BRUTA	Turbidez (NTU)	6,93	Temperatura (°C)	25,0	Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	46,2
	Cor Aparente (uH)	33		6,48		Condutividade Elétrica (µs/cm)
	Absorbância 254 nm	0,043				

ENSAIO n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
* h_e (mm)	200	150	100	69	50	20	10	8	5	3	1
* V_{EzC} (m/h)	62,2	82,9	124,3	180,2	248,6	621,6	1.243,2	1.554,0	2.486,5	4.144,1	12.432,4
* G_{EzC} (s⁻¹)	0,6	1,0	2,2	4,7	9,2	63,6	280,6	453,5	1.248,9	3.764,1	40.538,4

Valores Residuais / Eficiência de remoção (%) obtidos nas amostras compostas de cada ensaio

Turbidez (NTU)	0,73/89,5	0,71/89,8	0,68/90,2	0,66/90,5	0,76/89,0	0,76/89,0	0,78/88,7	0,81/88,3	0,82/88,2	0,85/87,7	0,87/87,4
Cor Aparente (uC)	4/87,9	3/90,9	2/93,9	2/93,9	2/93,9	3/90,9	3/90,9	4/87,9	4/87,9	4/87,9	4/87,9
Temperatura (°C)	26,5	26,5	27,0	27,0	27,0	27,0	26,5	26,5	26,0	26,0	26,0
pH	6,37	6,35	6,33	6,38	6,35	6,37	6,38	6,39	6,35	6,32	6,35
**Potencial Zeta (mV)	7,5±0,5	8,2±0,4	7,2±0,3	8,1±0,5	7,9±0,8	7,1±0,4	8,5±0,8	7,0±0,8	7,9±0,1	8,9±0,7	7,7±0,5
Absorbância 254 nm	0,003	0,003	0,002	0,002	0,004	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,007
Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	32,9	34,4	34,4	30,8	35,4	33,4	34,4	34,4	32,4	31,2	33,4
Condutividade Elétrica (µs/cm)	132,5	137,8	133,3	135,9	125,8	128,7	125,3	124,8	128	123,9	121,7

Variáveis controladas durante os ensaios: $D_{coag} = 42,5 \text{ mg/L}$; $pH = 6,35 \pm 0,05$; $Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; ; $TAS_{CLAR} = 184 \pm 4 \text{ m/d}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$

* h_e = altura na entrada da zona de contato; V_{EzC} = velocidade na entrada da zona de contato; G_{EzC} = valor estimado do gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato.

**Valores médios de PZ obtidos em amostras coletadas logo após a mistura rápida, depois de cada variação de h_e .

Figura 5.4 - Gráfico das eficiências de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente monitorados durante a realização do conjunto A de ensaios com a instalação piloto de flotação – Fase II ($Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1$ m³/h; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4$ m/h; $TAS_{ZC} = 184 \pm 4$ m/dia; $V_{CF} = 45 \pm 1$ m/h; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = 450 ± 10 kPa).

Tabela 5.5 - Resultados finais referentes às amostras compostas para PZ positivo (**Conjunto B de ensaios**).

Sentido de $h_e = 1 \text{ mm} \rightarrow 200 \text{ mm}$

ÁGUA BRUTA	Turbidez (NTU)	7,11	Temperatura (°C)	25,0	Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	48,9
	Cor Aparente (uH)	31	pH	6,46	Condutividade Elétrica (µs/cm)	73,4
	Absorbância 254 nm	0,043				

ENSAIO n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
* h_e (mm)	1	3	5	8	10	20	50	69	100	150	200
* V_{EzC} (m/h)	12.432,4	4.144,1	2.486,5	1.554,0	1.243,2	621,6	248,6	180,2	124,3	82,9	62,2
* G_{EzC} (s⁻¹)	40.538,4	3.764,1	1.248,9	453,5	280,6	63,6	9,2	4,7	2,2	1,0	0,6

Valores Residuais / Eficiência de remoção (%) obtidos nas amostras compostas de cada ensaio

Turbidez (NTU)	0,93/86,9	0,91/87,2	0,88/87,6	0,85/88,0	0,85/88,0	0,82/88,5	0,77/89,2	0,70/90,2	0,74/89,6	0,79/88,9	0,82/88,5
Cor Aparente (uC)	5/83,9	4/87,1	4/87,1	4/87,1	4/87,1	3/90,3	2/93,5	2/93,5	2/93,5	3/90,3	4/87,1
Temperatura (°C)	26,0	26,0	26,5	27,0	27,0	27,0	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5
pH	6,32	6,33	6,37	6,35	6,38	6,37	6,38	6,35	6,36	6,33	6,35
**Potencial Zeta (mV)	8,7±0,2	8,3±0,6	7,3±1,3	7,9±0,9	8,5±0,1	7,6±0,4	8,0±1,2	9,1±0,4	9,3±0,9	8,4±1,4	8,1±1,5
Absorbância 254 nm	0,005	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,007	0,007	0,008	0,008	0,009
Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	35,4	32,4	33,4	31,2	35,4	33,4	34,4	32,4	32,4	31,2	33,4
Condutividade Elétrica (µs/cm)	119,9	113,3	114,3	117,6	114,3	109,1	110,9	106,6	106,8	104,2	105,8

Variáveis controladas durante os ensaios: $D_{coag} = 42,5 \text{ mg/L}$; $pH = 6,35 \pm 0,05$; $Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; ; $TAS_{CLAR} = 184 \pm 4 \text{ m/d}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$

* h_e = altura na entrada da zona de contato; V_{EzC} = velocidade na entrada da zona de contato; G_{EzC} = valor estimado do gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato.

**Valores médios de PZ obtidos em amostras coletadas logo após a mistura rápida, depois de cada variação de h_e .

Figura 5.5 - Gráfico das eficiências de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente monitorados durante a realização do conjunto B de ensaios com a instalação piloto de flotação – Fase II ($Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1$ m³/h; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4$ m/h; $TAS_{ZC} = 184 \pm 4$ m/dia; $V_{CF} = 45 \pm 1$ m/h; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = 450 ± 10 kPa).

Os resultados referentes ao conjunto A de ensaios (PZ em torno de +10 mV) apresentados nas Tabela 5.4 demonstraram que para a faixa de valores de V_{EZC} entre 62,2 a 12.432,4 m/h, os valores de turbidez permaneceram na faixa de 0,66 a 0,87 NTU (eficiência de remoção de 87,4 a 90,5 %), a cor aparente ficou entre 2 e 4 uC (eficiência de remoção de 87,9 a 93,9 %). Verifica-se assim que a adoção de valores extremamente elevados de velocidade na entrada da zona de contato (até 3,45 m/s ou 12.432,4 m/h) nos ensaios com água contendo partículas com PZ positivo, não causaram queda expressiva nas eficiências de remoção de turbidez e cor aparente como poderia se esperar.

A faixa de valores de V_{EZC} entre 124,3 a 180,2 m/h forneceu as melhores condições de flotação, sendo que dentro da faixa mencionada percebeu-se que a V_{EZC} de 180,2 m/h ($h_e = 69$ mm) proporcionou o melhor desempenho quando comparado aos demais, apresentando residual de turbidez igual a 0,66 NTU e eficiência de remoção de 90,5 % e residual de cor aparente igual 2 uC com eficiência de remoção de 93,9 %. Vale ressaltar que a V_{EZC} resultante para h_e igual a 69 mm apresenta o mesmo valor que a taxa de aplicação superficial adotado na zona de contato (TAS_{ZC}), 180 m/h.

A condição de entrada na zona de contato exerce influência na eficiência de flotação, porém essa influência não é tão expressiva quanto se poderia imaginar, pois, por exemplo, a turbidez para toda a faixa de valores de V_{EZC} estudada ficou na faixa de $0,75 \pm 0,08$ NTU e a cor aparente na faixa de 3 ± 1 uC.

A repetição dos ensaios do conjunto A, porém, na ordem decrescente de velocidade (V_{EZC}) denominado conjunto B de ensaios, apresentou resultados bastante próximos no que concerne à eficiência de remoção de cor aparente (de 83,9 % a 93,5 %) e de turbidez (de 86,9 % a 90,2 %). Nesse segundo conjunto de ensaios, também se observou (ver Figura 5.5) que os melhores resultados de remoção de cor aparente e turbidez foram obtidos para valores de

V_{EZC} entre 124,3 m/h e 180,2 m/h (mesma faixa de valores obtida com a realização do conjunto A de ensaios).

Tais constatações demonstram a obtenção de repetibilidade experimental.

5.2.2 2ª Condição: Potencial Zeta das partículas próximo a 0 mV.

Para a 2ª condição de estudo (conjunto C e D de ensaios) foi adotado PZ próximo a zero (em torno de +1 mV) em todos os ensaios. Nos conjuntos C e D foi aplicado uma dosagem de coagulante de 22,5 mg/L e pH de coagulação de $6,40 \pm 0,05$.

Assim como na primeira condição (conjunto A e B de ensaios) estabeleceu-se o mesmo procedimento experimental durante os estudos.

O conjunto C de ensaios com dosagens de 22,5 mg/L de sulfato de alumínio e PZ próximo de +1 mV, foi iniciado (ensaio 1C) com abertura máxima na passagem da zona de floculação para a zona de contato (200 mm, correspondente a uma V_{EZC} de 62,2 m/h). Nos ensaios subseqüentes do conjunto C, os valores dessa abertura foram diminuídos paulatinamente, conforme mostrado na Tabela 5.6. No conjunto D de ensaios, também realizado com dosagem de coagulante de 22,5 mg/L e PZ próximo de +1 mV, essa ordem foi invertida, ou seja, no ensaio 1D (ensaio 1 do conjunto D), a abertura imposta na passagem da zona de floculação para a zona de contato foi a mínima (1 mm, correspondente à V_{EZC} de 12432,4 m/h). Nos ensaios subseqüentes do conjunto D essa abertura foi paulatinamente aumentada conforme indicado na Tabela 5.7.

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam as características da água bruta e os resultados (residuais de turbidez, cor aparente, absorbância 254, alcalinidade total, condutividade elétrica) obtidos ao longo dos conjuntos C e D de ensaios realizados com a instalação piloto

de flotação. Estes valores correspondem às amostras compostas feitas a partir das amostras obtidas pontualmente.

As Tabelas 5.6 e 5.7 também apresentam os valores dos potenciais zeta das partículas medidos instantes após a coagulação durante cada variação da h_c .

A partir dos resultados mostrados nas Tabelas 5.6 e 5.7, construíram-se os gráficos apresentados nas Figuras 5.6 e 5.7, os quais comparam os valores de eficiências de remoção de turbidez e cor aparente obtidos em cada ensaio dos conjuntos C e D.

Os valores pontuais de turbidez das amostras flotadas na unidade piloto durante a realização dos onze ensaios do conjunto C e do conjunto D são apresentados no **APÊNDICE C**.

Tabela 5.6 - Resultados finais referentes às amostras compostas para PZ próximo de zero (**Conjunto C de ensaios**).
Sentido de $h_e = 200 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ mm}$

ÁGUA BRUTA	Turbidez (NTU)	7,21	Temperatura (°C)	25,0	Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	51,1
	Cor Aparente (uH)	36	pH	6,45	Condutividade Elétrica (μs/cm)	75,7
	Absorbância 254 nm	0,046				

ENSAIO n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
* h_e (mm)	200	150	100	69	50	20	10	8	5	3	1
* V_{EZC} (m/h)	62,2	82,9	124,3	180,2	248,6	621,6	1.243,2	1.554,0	2.486,5	4.144,1	12.432,4
* G_{EZC} (s⁻¹)	0,6	1,0	2,2	4,7	9,2	63,6	280,6	453,5	1.248,9	3.764,1	40.538,4

Valores Residuais / Eficiência de remoção (%) obtidos nas amostras compostas de cada ensaio

Turbidez (NTU)	1,03/85,7	0,98/86,4	0,95/86,8	0,93/87,1	0,97/86,5	1,02/85,9	1,01/86,0	1,03/85,7	1,07/85,2	1,09/84,9	1,09/84,9
Cor Aparente (uC)	4/88,9	4/88,9	3/91,7	3/91,7	3/91,7	4/88,9	4/88,9	5/86,1	5/86,1	5/86,1	5/83,3
Temperatura (°C)	26,0	26,0	26,5	27,0	27,0	27,0	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5
pH	6,39	6,38	6,41	6,40	6,37	6,42	6,39	6,39	6,40	6,37	6,38
**Potencial Zeta (mV)	1,3±1,3	0,8±0,4	1,9±0,9	1,1±1,2	2,2±0,8	0,7±0,4	1,5±0,8	1,1±1,3	0,0±0,8	0,5±0,7	-0,8±0,5
Absorbância 254 nm	0,004	0,003	0,003	0,003	0,005	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009	0,010
Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	36,5	33,4	34,4	33,9	33,4	32,3	33,4	32,9	30,3	32,9	30,8
Condutividade Elétrica (μs/cm)	96,8	93,7	92,1	89,9	91	93,8	90,5	91,7	88,7	85,3	86,1

Variáveis controladas durante os ensaios: $D_{coag} = 22,5 \text{ mg/L}$; $pH = 6,40 \pm 0,05$; $Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; ; $TAS_{CLAR} = 184 \pm 4 \text{ m/d}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$.

* h_e = altura na entrada da zona de contato; V_{EZC} = velocidade na entrada da zona de contato; G_{EZC} = valor estimado do gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato.

**Valores médios de PZ obtidos em amostras coletadas logo após a mistura rápida, depois de cada variação de h_e .

Figura 5.6 - Gráfico das eficiências de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente monitorados durante a realização do conjunto C de ensaios com a instalação piloto de flotação – Fase II ($Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1$ m³/h; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4$ m/h; $TAS_{ZC} = 184 \pm 4$ m/dia; $V_{CF} = 45 \pm 1$ m/h; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = 450 ± 10 kPa).

Tabela 5.7 - Resultados finais referentes às amostras compostas para PZ próximo de zero (**Conjunto D de ensaios**).
Sentido de $h_e = 1 \text{ mm} \rightarrow 200 \text{ mm}$

ÁGUA BRUTA	Turbidez (NTU)	6,97	Temperatura (°C)	25,0	Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	51,1
	Cor Aparente (uH)	35		pH		69,7
	Absorbância 254 nm	0,041				

ENSAIO n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
* h_e (mm)	1	3	5	8	10	20	50	69	100	150	200
* V_{EzC} (m/h)	12.432,40	4.144,10	2.486,50	1.554,00	1.243,20	621,6	248,6	180,2	124,3	82,9	62,2
* G_{EzC} (s⁻¹)	40.538,4	3.764,1	1.248,9	453,5	280,6	63,6	9,2	4,7	2,2	1,0	0,6

Valores Residuais / Eficiência de remoção (%) obtidos nas amostras compostas de cada ensaio

Turbidez (NTU)	1,20/82,8	1,16/83,4	1,14/83,6	1,10/84,2	1,10/84,2	1,07/84,6	1,03/85,2	0,97/86,1	0,97/86,1	1,06/84,8	1,10/84,2
Cor Aparente (uC)	7/80,0	6/82,9	5/85,7	5/85,7	5/85,7	4/88,6	4/88,6	3/91,4	3/91,4	4/88,6	4/88,6
Temperatura (°C)	25,0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
pH	6,40	6,38	6,37	6,40	6,41	6,43	6,39	6,36	6,42	6,37	6,38
**Potencial Zeta (mV)	1,6±0,9	0,9±0,7	- 0,4±1,4	1,0±1,3	0,5±2,0	0,2±0,2	1,8±0,8	0,7±0,2	1,2±0,8	1,6±0,9	2,1±1,2
Absorbância 254 nm	0,004	0,004	0,003	0,003	0,004	0,007	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009
Alcalinidade Total (mg CaCO₃/L)	33,4	32,9	34,4	33,9	33,4	32,3	33,4	32,9	33,4	32,9	34,4
Condutividade Elétrica (µs/cm)	93,20	92,00	92,60	89,40	91,20	90,80	89,10	89,80	88,70	89,30	88,90

Variáveis controladas durante os ensaios: $D_{coag} = 22,5 \text{ mg/L}$; $pH = 6,40 \pm 0,05$; $Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; ; $TAS_{CLAR} = 184 \pm 4 \text{ m/d}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$.

* h_e = altura na entrada da zona de contato; V_{EzC} = velocidade na entrada da zona de contato; G_{EzC} = valor estimado do gradiente médio de velocidade na entrada da zona de contato

**Valores médios de PZ obtidos em amostras coletadas logo após a mistura rápida, depois de cada variação de h_e .

Figura 5.7 - Gráfico das eficiências de remoção dos parâmetros turbidez e cor aparente monitorados durante a realização do conjunto D de ensaios com a instalação piloto de flotação – Fase II ($Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1$ m³/h; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4$ m/h; $TAS_{ZC} = 184 \pm 4$ m/dia; $V_{CF} = 45 \pm 1$ m/h; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = 450 ± 10 kPa).

Os resultados apresentados para PZ das partículas próximo a zero (conjunto C e D de ensaios) demonstraram que as variações da velocidade na entrada da zona de contato não exerceram uma forte influência durante os ensaios quando comparados aos ensaios dos conjuntos A e B.

Os resultados finais relativos ao conjunto C de ensaios (PZ próximo de 0 mV) apresentados na Tabela 5.6 mostraram que para a faixa de valores de V_{EzC} entre 62,2 m/h a 12.432,4 m/h, os valores de turbidez permaneceram na faixa de 0,93 a 1,09 NTU (eficiência de remoção de 84,9 a 87,1 %), a cor aparente permaneceu entre 3 e 4 uC (eficiência de remoção de 86,1 a 91,7 %). Constatou-se, portanto, que a adoção de valores extremamente elevados de V_{EzC} (12.432,4 m/h) nos ensaios com água contendo partículas com PZ próximo de zero, não ocasionou queda significativa nas eficiências de remoção de turbidez e cor aparente como poderia se esperar, corroborando o apresentado no conjunto A de ensaios.

Na faixa de valores de V_{EzC} entre 124,3 a 180,2 m/h foram identificadas as melhores condições de flotação, reproduzindo os resultados obtidos nos ensaios do conjunto A, onde também se obteve para a V_{EzC} de 180,2 m/h ($h_e = 69$ mm) o melhor desempenho quando comparado aos demais, apresentando residual de turbidez igual a 0,93 NTU e eficiência de remoção de 87,1 % e residual de cor aparente igual 3 uC com eficiência de remoção de 91,7 %.

Analisando os resultados finais dos onze ensaios realizados para o conjunto C, verificou-se que a turbidez para toda a faixa de valores de V_{EzC} estudada ficou na faixa de $1,01 \pm 0,08$ NTU e a cor aparente na faixa de 4 ± 1 uC.

Nos ensaios do conjunto D, a análise das velocidades (V_{EzC}) foi repetida, porém em ordem decrescente. Os resultados apresentados (ver Tabela 5.7) mostraram que os valores mantiveram-se próximos aos obtidos no conjunto C de ensaios em relação à eficiência de cor aparente (de 80,0 a 91,4 %) e de turbidez (de 82,8 a 86,1 %). No conjunto D de ensaios, do

mesmo modo observou-se que os melhores resultados de remoção de cor aparente e turbidez foram obtidos para valores de V_{EZC} entre 124,3 m/h e 180,2 m/h, mesma faixa de valores obtida com a realização do conjunto C de ensaios e do conjunto B de ensaios (onde se adotou o mesmo sentido de abertura da comporta).

Estas verificações demonstram novamente a obtenção de repetibilidade experimental durante a realização dos ensaios dos conjuntos C e D.

Analisando os resultados obtidos nas duas condições de estudo, verificou-se que houve um ligeiro aumento dos valores residuais de turbidez e cor aparente nas amostras dos ensaios realizados com PZ das partículas próximo de zero (conjunto C e D de ensaios) quando comparado aos ensaios onde se adotou PZ levemente positivo (conjunto A e B de ensaios).

O fato de que a condição de coagulação em que foram produzidas partículas levemente positivas terem resultado em maiores eficiências de clarificação por flotação parece respeitar a lógica do processo de aderência de microbolhas de ar - as quais apresentam carga superficial negativa em águas para abastecimento (EDZWALD, 2010; HAN *et. al.*, 2004) – aos flocos formados na etapa de coagulação/floculação, ou seja, era de se esperar que a obtenção de flocos positivos resultasse em melhores condições de formação de agregados “microbolhas + flocos” na zona de contato da unidade piloto de flotação.

Tais constatações corroboram as conclusões apresentadas por HAN *et. al.* (2001), quando foi investigada a influência da carga superficial e do tamanho das partículas na eficiência de flotação. O diagrama de eficiência de colisão de HAN *et. al.* (2001) mostra que a eficiência é elevada quando bolhas e flocos apresentam cargas superficiais opostas e são de tamanhos similares.

Desta forma, as variações realizadas na h_e não determinaram um efeito significativo na eficiência de tratamento utilizando a flotação por ar dissolvido (FAD) como técnica de pré-clarificação.

A FAD nas condições de coagulação do presente estudo mostrou-se constituir técnica capaz de operar com valores elevados de V_{EZC} (e de G_{EZC}), com pequena queda de eficiência quando foram impostos valores inferiores (até 62,2 m/h) ou superiores (até 12.432,4 m/h) aos valores ótimos de V_{EZC} (124,3 m/h a 180,2 m/h). Tal constatação é diferente da que se poderia imaginar, ou seja, esperava-se uma queda acentuada na eficiência de clarificação da água de estudo nas situações em que foram aplicados valores elevados de V_{EZC} e G_{EZC} na seção onde ocorre o contato entre a água inicialmente floculada e a água saturada injetada no interior da zona de contato. Estes elevados valores de G_{EZC} poderiam gerar no local turbulência exagerada, a qual poderia ter acarretado a ruptura dos flocos e conseqüente perda na eficiência da aderência entre flocos e bolhas, entretanto, tal fato não ocorreu de forma marcante.

Algumas hipóteses podem ser consideradas para entender os resultados obtidos: i) a não ruptura dos flocos com a intensidade esperada, pode ter sido devido a uma forte estrutura e conseqüente resistência das partículas ao gradiente de velocidade resultante no instante da passagem pela comporta nas situações com valores de V_{EZC} elevados.

ii) a turbulência gerada na entrada da zona de contato pode dentro de certos limites ter favorecido o contato entre a água floculada e a água saturada, facilitando a aderência entre bolhas e flocos, ou pelo menos não prejudicando tais contatos.

iii) mesmo havendo ruptura dos flocos, estes se mantiveram em uma faixa de tamanho que conduziu a uma cinética favorável de colisões entre flocos e microbolhas de ar, ou seja, a distribuição de tamanho de flocos após a passagem para a zona de contato mesmo em condições de elevados valores de gradiente médio de velocidade no instante da passagem, ainda assim permaneceu favorável ao processo de flotação subsequente.

Em relação à distribuição do tamanho dos flocos, EDZWALD (2007) comenta os efeitos destes na eficiência implicada na zona de contato. O resultado deste estudo é apresentado na Figura 5.8 sendo possível verificar que com o aumento do tamanho das

partículas (a partir de 1 μm) a eficiência na zona de contato melhora muito em função da interceptação dos flocos pelas bolhas (diâmetro das bolhas de 40, 60 e 80 μm). A produção de flocos maiores que 20 μm , geram uma eficiência de contato de no mínimo 99%, chegando a praticamente 100% para flocos maiores ou iguais a 100 μm . Entretanto, de acordo com tal modelo, não é imprescindível a produção de flocos tão grandes, já que seriam necessárias múltiplas bolhas para colidirem e proporcionarem a ascensão do conjunto bolhas-floco. De acordo com tal teoria, flocos de 20 a 50 μm já apresentariam condições adequadas na zona de contato, sendo favoráveis à cinética do processo de flotação.

Figura 5.8 - Gráfico da eficiência na zona de contato em função do diâmetro da partícula. (EDZWALD, 2007)

Para uma identificação precisa dos efeitos da turbulência na entrada da zona de contato sobre o tamanho das partículas é necessário realizar um estudo específico, utilizando a análise de imagem para obtenção de respostas quanto ao comportamento dos flocos.

6. CONCLUSÕES

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

1. Considerando as condições de coagulação adotadas no projeto, para $D_{\text{coag}} = 42,5 \text{ mg/L}$ e PZ positivo ($8,5 \pm 1,0 \text{ mV}$) os resultados apresentaram eficiências de clarificação melhores do que os resultados obtidos para $D_{\text{coag}} = 22,5 \text{ mg/L}$ e PZ próximo de zero ($0,5 \pm 1,5 \text{ mV}$), obtendo na primeira condição um residual de turbidez de 0,66 NTU e cor residual de 2 uC, enquanto a segunda condição alcançou um residual de turbidez de 0,93 NTU e cor residual de 3 uC. Muito provavelmente isto ocorreu devido ao fato das microbolhas apresentarem carga superficial negativa, o que aumentaria a efetividade/aderência das microbolhas aos flocos com carga ligeiramente positiva.
2. Embora para as duas condições de coagulação tenha se obtido uma faixa ótima de valores de V_{Ezc} , o aumento da V_{Ezc} não causou queda expressiva na eficiência de clarificação por flotação. Para a condição de coagulação com PZ ligeiramente positivo, nos melhores resultados a eficiência de remoção de turbidez caiu de 90,5 para 87,4 % quando a V_{Ezc} subiu de 180,2 m/h para 12.432,4 m/h. Já para a condição de coagulação com PZ próximo de zero, para os melhores resultados a eficiência de remoção de turbidez caiu de 87,1 para 84,9 %, quando a V_{Ezc} subiu de 180,2 m/h para 12.432,4 m/h. O mesmo tipo de comportamento foi observado quando o valor de V_{Ezc} foi reduzido para valores menores que 124,3 m/h, verificando-se ligeira queda na eficiência de remoção de turbidez e cor aparente.

3. Nas duas condições de coagulação investigadas (PZ positivo e PZ próximo de zero), a faixa de valores de V_{EZC} que proporcionou maior eficiência de clarificação por flotação situou-se sempre entre 124,3 m/h e 180,2 m/h, com residuais de turbidez em torno de $0,70 \pm 0,04$ NTU e cor aparente de 2 uC para a condição de coagulação com PZ positivo e turbidez em torno de $0,95 \pm 0,02$ NTU e cor aparente de 3 uC para condição de coagulação com PZ próximo de zero. Portanto, para o projeto de unidades de flotação semelhantes à investigada na presente pesquisa, sugere-se a adoção de valores de V_{EZC} na faixa de 124,3 a 180,2 m/h.

7. RECOMENDAÇÕES

1. Em relação à taxa de aplicação superficial na zona de clarificação recomenda-se que sejam realizados ensaios com taxas superiores ao empregado nesta pesquisa ($TAS_{CLAR} = 7,6$ m/h), a fim de investigar a influência de diferentes condições de taxas na zona de separação na dinâmica do conjunto “bolhas-floco” e conseqüentemente, sobre a eficiência de clarificação do processo de flotação.
2. Outro aspecto que merece maior compreensão está relacionado ao comportamento e distribuição do tamanho dos flocos na entrada da zona de contato. Portanto recomendam-se estudos complementares com análise de imagem a fim de verificar a influência da turbulência gerada neste local sobre a dinâmica das partículas e conseqüente desempenho da unidade piloto de flotação por ar dissolvido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL (2004), PORTARIA Nº 518, DE 25 DE MARÇO DE 2004, MINISTÉRIO DA SAÚDE. Procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.
- DE RIJK et. al. (1994). Bubble size in flotation thickening. Water Research, Great Britain, v. 28, n.2, p. 465-473.
- EATON, A. D. et. al. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters, 21th edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation.
- EDZWALD, J. K. e 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. (1995). Principles and applications of dissolved air flotation. Water Science and Technology, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 1-23.
- EDZWALD, J. K. (2007). 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.
- EDZWALD, J. K. (2010). Dissolved air flotation and me. Water Research, Elsevier, v. 44, p. 2077-2106, 29 páginas
- HAARHOFF, J. (2006). Dissolved air flotation: Progress and prospects for drinking water treatment. Water Science and Technology. South Africa.
- HAN, M. et al. (2001). Collision efficiency factor of bubble and particle (α_{pb}) in DAF: theory and experimental verification. Water science and technology, vol. 46 (8) p.139-144.
- HAN, M. et al. (2002). Effect of pressure on bubble size in dissolved air flotation. Water Science and Technology, vol. 50, n. 8, p.49-56.

- HAN, M. et al. (2004). The effect of divalent metal ions on the zeta potential of bubbles. Water Science and Technology, Great Britain, vol. 2, n. 5-6, p.41-46.
- HAN, M. et al. (2007). The development of a generator to produce bubbles of tailored sizes. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, Seoul, Korea.
- KIURU, H. J. (2001). Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). Water Science and Technology, Great Britain, v. 43, n. 8, p. 1-7.
- LEE, C. H. et al. (2007). Full scale operation of dissolved air flotation process using micro-bubble generating pump. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, Seoul, Korea.
- LEPPINEN, D. M. and DALZIEL, S. B. (2004). Bubble size distribution in dissolved air flotation tanks. Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA (53.8)
- LUNDH, M. et al. (2002). The influence of contact zone configuration on the flow structure in a dissolved air flotation pilot plant. Water Research – (36) pp. 1585-1595.
- MORUZZI, R. B (2005). Flotação por Ar Dissolvido (FAD): Influência da Distribuição do Tamanho de Partículas e do Binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação do desempenho do processo. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MORUZZI, R. B. and REALI, M.A.P. (2007). Characterization of micro-bubbles sizes distribution in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, Seoul, Korea.
- REALI, M. A. P. (1984). Aplicação da Flotação por Ar Dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

- REALI, M. A. P. (1991). Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- REALI, M. A. P. and PATRIZZI, L. J. (2007). The influence of the contact zone configuration on the efficiency of a DAF pilot plant. In: The 5th International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems, Seoul, Korea.
- RYKAART, E. M.; HAARHOFF, J. (1995). Behaviour of air injection nozzles in dissolved air flotation. Water Science and Technology, Great Britain, v. 31, n. 3-4, p. 25-35.
- SCHOFIELD, T. (2001). Dissolved air flotation in drinking water production. Water Science and Technology, Great Britain, v. 43, n. 8, p. 9-18.
- ZABEL, T. (1984). Flotation in Water Treatment. In: IVES, K. J. (ed.) The Science Basis of Flotation. Boston: NATO ASA Series, p. 379-413.
- ZABEL, T. (1985). The Advantages of dissolved-air flotation for water treatment. Journal of American Water Works Association – AWWA, Management and Operations, 77(5), p. 42-46.

APÊNDICE A – Gráficos das eficiências de turbidez obtidas para cada dosagem de coagulante nos ensaios realizados na Etapa I - Fase I (Flotateste)

Figura A1- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=7,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A4- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=15 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC

Figura A2- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=10 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A5- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=17,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A3- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=12,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A6- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=20 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A7- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=22,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A10- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=30 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A8- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=25 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A11- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=32,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A9- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=27,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A12- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=35 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A13- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=37,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A16- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=45 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A14- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=40 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A17- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=47,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura A15- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=42,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

APÊNDICE B – Gráficos das eficiências de cor aparente obtidas para cada dosagem de coagulante nos ensaios realizados na Etapa I - Fase I (Flotatest)

Figura B1- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=7,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B4- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=15 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B2- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=10 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B5- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=17,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B3- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=12,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B6- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=20 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B7- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=22,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B10- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=30 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B8- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=25 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B11- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=32,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B9- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=27,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B12- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=35 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B13- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=37,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B16- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=45 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B14- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=40 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

Figura B17 Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=47,5 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 u

Figura B14- Gráfico da eficiência em função do pH para Dcoag=40 mg/L ($V_F = 12,78$ cm/min). Água bruta sintética: Turbidez = 7,7 NTU; Cor aparente = 65 uC.

APÊNDICE C – Resultados das amostras pontuais obtidas na Fase II realizada na unidade FAD piloto (Conjuntos A, B, C e D de ensaios).

Os resultados apresentados nas Tabelas C1 a C4 referem-se aos residuais de turbidez das amostras pontuais obtidas no decorrer de cada conjunto de ensaios (A, B, C e D), em função das condições de coagulação adotadas e potenciais zetas resultantes.

Tabela C1 - Resultados das amostras pontuais para PZ positivo (Conjunto A de ensaios).
Sentido de $h_e = 200 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ mm}$

ÁGUA BRUTA	Turbidez (NTU)	6,93	Temperatura (°C)		25,0	Alcalinidade Total (mg CaCO3/L)		46,2
	Cor Aparente (uH)	33	pH		6,48	Condutividade Elétrica (µs/cm)		60,4
	Absorbância 254 nm	0,041						

ENSAIO nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
he (mm)	200	150	100	69	50	20	10	8	5	3	1
V _{E2C} (m/h)	62,2	82,9	124,3	180,2	248,6	621,6	1243,2	1554,0	2486,5	4144,1	12432,4
G _{E2C} (s ⁻¹)	0,6	1,0	2,2	4,7	9,2	63,6	280,6	453,5	1248,9	3764,1	40538,4
Valores Residuais de Turbidez (NTU) das Amostras Pontuais											
Amostra 1	1,38	1,01	0,96	0,90	0,99	0,96	1,02	1,05	1,08	1,08	1,07
Amostra 2	0,95	0,96	0,85	0,80	0,96	0,90	0,94	0,96	1,01	0,99	1,03
Amostra 3	0,88	0,90	0,72	0,73	0,84	0,82	0,91	0,96	0,94	0,91	0,99
Amostra 4	0,75	0,70	0,70	0,69	0,78	0,76	0,84	0,82	0,84	0,85	0,92
Amostra 5	0,71	0,72	0,66	0,65	0,70	0,75	0,77	0,79	0,80	0,81	0,84
Amostra 6	0,69	0,65	0,67	0,64	0,69	0,72	0,74	0,77	0,76	0,79	0,80

Variáveis controladas durante os ensaios: $D_{\text{coag}} = 42,5 \text{ mg/L}$; $\text{pH} = 6,35 \pm 0,05$; $Q_{\text{AFL}} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $\text{TAS}_{\text{ZC}} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; ; $\text{TAS}_{\text{CLAR}} = 184 \pm 4 \text{ m/d}$; $V_{\text{CF}} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$.

Tabela C2 - Resultados das amostras pontuais para PZ positivo (**Conjunto B de ensaios**).
Sentido de $h_e = 1 \text{ mm} \rightarrow 200 \text{ mm}$

ÁGUA BRUTA	Turbidez (NTU)	7,11	Temperatura (°C)	25,0	Alcalinidade Total (mg CaCO3/L)	48,9
	Cor Aparente (uH)	31	pH	6,46	Condutividade Elétrica (µs/cm)	73,4
	Absorbância 254 nm	0,043				

ENSAIO nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
h _e (mm)	1	3	5	8	10	20	50	69	100	150	200
V _{E2C} (m/h)	12.432,4	4.144,1	2.486,5	1.554,0	1.243,2	621,6	248,6	180,2	124,3	82,9	62,2
G _{E2C} (s ⁻¹)	40.538,4	3.764,1	1.248,9	453,5	280,6	63,6	9,2	4,7	2,2	1,0	0,6

Valores Residuais de Turbidez (NTU) das Amostras Pontuais											
Amostra 1	1,54	1,18	1,15	1,11	1,13	1,10	1,07	1,01	1,05	1,05	1,07
Amostra 2	1,26	1,11	1,08	1,08	1,04	0,99	0,98	0,94	0,92	0,96	0,95
Amostra 3	1,05	1,02	0,94	0,92	0,94	0,92	0,90	0,83	0,86	0,92	0,89
Amostra 4	0,98	0,95	0,90	0,88	0,87	0,86	0,82	0,73	0,73	0,85	0,87
Amostra 5	0,92	0,89	0,85	0,80	0,79	0,78	0,71	0,62	0,67	0,72	0,77
Amostra 6	0,82	0,81	0,79	0,76	0,77	0,75	0,66	0,60	0,67	0,64	0,73

Variáveis controladas durante os ensaios: $D_{coag} = 42,5 \text{ mg/L}$; $pH = 6,35 \pm 0,05$; $Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; ; $TAS_{CLAR} = 184 \pm 4 \text{ m/d}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$.

Tabela C3 - Resultados das amostras pontuais para PZ próximo de zero (**Conjunto C de ensaios**).
Sentido de $h_e = 200 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ mm}$

ÁGUA BRUTA	Turbidez (NTU)	7,21	Temperatura (°C)		25,0	Alcalinidade Total (mg CaCO3/L)		51,1
	Cor Aparente (uH)	36	pH		6,45	Condutividade Elétrica (µs/cm)		75,7
	Absorbância 254 nm	0,046						

ENSAIO nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
he (mm)	200	150	100	69	50	20	10	8	5	3	1
V _{E2C} (m/h)	62,2	82,9	124,3	180,2	248,6	621,6	1243,2	1554,0	2486,5	4144,1	12432,4
G _{E2C} (s ⁻¹)	0,6	1,0	2,2	4,7	9,2	63,6	280,6	453,5	1248,9	3764,1	40538,4
Valores Residuais de Turbidez (NTU) das Amostras Pontuais											
Amostra 1	1,97	1,25	1,20	1,15	1,17	1,27	1,24	1,29	1,28	1,32	1,33
Amostra 2	1,52	1,19	1,12	1,04	1,11	1,20	1,19	1,20	1,20	1,23	1,29
Amostra 3	1,22	1,06	1,01	1,02	1,05	1,19	1,13	1,09	1,15	1,19	1,21
Amostra 4	1,09	0,99	0,96	0,95	0,94	1,07	1,10	1,05	1,10	1,13	1,16
Amostra 5	0,95	0,97	0,94	0,93	0,95	0,97	0,95	0,98	1,05	1,05	1,00
Amostra 6	0,91	0,92	0,90	0,89	0,90	0,92	0,94	0,96	0,99	0,98	0,99

Variáveis controladas durante os ensaios: $D_{coag} = 22,5 \text{ mg/L}$; $pH = 6,40 \pm 0,05$; $Q_{AFL} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $TAS_{ZC} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; ; $TAS_{CLAR} = 184 \pm 4 \text{ m/d}$; $V_{CF} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$.

Tabela C4 - Resultados das amostras pontuais para PZ próximo de zero (**Conjunto D de ensaios**).
Sentido de $h_e = 1 \text{ mm} \rightarrow 200 \text{ mm}$

ÁGUA BRUTA	Turbidez (NTU)	6,97	Temperatura (°C)		25,0	Alcalinidade Total (mg CaCO3/L)		51,1
	Cor Aparente (uH)	35	pH		6,45	Condutividade Elétrica (µs/cm)		69,7
	Absorbância 254 nm	0,041						

ENSAIO nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
h _e (mm)	1	3	5	8	10	20	50	69	100	150	200
V _{ZC} (m/h)	12.432,4	4.144,1	2.486,5	1.554,0	1.243,2	621,6	248,6	180,2	124,3	82,9	62,2
G _{ZC} (s ⁻¹)	40.538,4	3.764,1	1.248,9	453,5	280,6	63,6	9,2	4,7	2,2	1,0	0,6

Valores Residuais de Turbidez (NTU) das Amostras Pontuais											
Amostra 1	2,11	1,39	1,33	1,27	1,30	1,27	1,25	1,28	1,23	1,25	1,34
Amostra 2	1,67	1,33	1,30	1,19	1,21	1,23	1,19	1,17	1,11	1,19	1,22
Amostra 3	1,32	1,29	1,28	1,14	1,15	1,14	1,11	1,05	1,02	1,13	1,15
Amostra 4	1,22	1,19	1,20	1,08	1,09	1,09	1,05	1,02	0,99	1,08	1,13
Amostra 5	1,19	1,13	1,09	1,08	1,10	1,09	1,03	0,95	0,98	1,05	1,09
Amostra 6	1,13	1,09	1,06	1,03	1,04	1,01	0,97	0,93	0,92	0,96	0,99

Variáveis controladas durante os ensaios: $D_{\text{coag}} = 22,5 \text{ mg/L}$; $\text{pH} = 6,40 \pm 0,05$; $Q_{\text{AFL}} = 4,6 \pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$; $\text{TAS}_{\text{ZC}} = 180 \pm 4 \text{ m/h}$; ; $\text{TAS}_{\text{CLAR}} = 184 \pm 4 \text{ m/d}$; $V_{\text{CF}} = 45 \pm 1 \text{ m/h}$; Razão de recirculação = 10%; Pressão na câmara de saturação = $450 \pm 10 \text{ kPa}$.

Nome do arquivo: dissertação final
Diretório: C:\Users\Kisner\Desktop\MESTRADO FINAL\MESTRADO FINAL
08-11-2010
Modelo: C:\Users\Kisner\AppData\Roaming\Microsoft\Modelos\Normal.dotm
Título:
Assunto:
Autor: Kisner Anderson Maia
Palavras-chave:
Comentários:
Data de criação: 03/08/2010 17:03:00
Número de alterações: 111
Última gravação: 08/11/2010 16:19:00
Salvo por: Kisner
Tempo total de edição: 3.474 Minutos
Última impressão: 08/11/2010 16:25:00
Como a última impressão
Número de páginas: 119
Número de palavras: 22.830 (aprox.)
Número de caracteres: 123.286 (aprox.)