

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

ERIKA REESINK CERSKI

**ESTUDO DE SEPARAÇÃO DE ALGAS CULTIVADAS EM UMA LAGOA DE
ALTA TAXA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS POR
COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO COM
ÊNFASE NA ESTABILIDADE DO MATERIAL FLOTADO**

**Porto Alegre
2017**

ERIKA REESINK CERSKI

**ESTUDO DE SEPARAÇÃO DE ALGAS CULTIVADAS EM UMA LAGOA DE
ALTA TAXA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS POR
COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO COM
ÊNFASE NA ESTABILIDADE DO MATERIAL FLOTADO**

**Dissertação submetida ao
Programa de Pós Graduação em
Engenharia de Minas, Metalúrgica
e de Materiais da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito à obtenção do
título de Mestre em Engenharia na
modalidade acadêmica.**

Orientador: Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues

**Área de concentração:
Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa**

**Porto Alegre
2017**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Reitor: Rui Vicente Oppermann
Vice-Reitor: Jane Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA
DIRETOR: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Vice-Diretora: Carla Ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGE3M)

Cerski, Erika Reesink
Estudo de Separação de Algas Cultivadas
em uma Lagoa de Alta Taxa no Tratamento
de Efluentes Sanitários por Coagulação-Floculação
e Flotação por Ar Dissolvido com Ênfase na Estabilidade
do Material Flotado, 2017.
150 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

Orientador: Rafael Teixeira Rodrigues

1. Flotação por Ar Dissolvido.
2. Estabilidade do material flotado
3. Separação de microalgas.
4. Coagulação/Floculação.
5. Análise de Imagem

ERIKA REESINK CERSKI

ESTUDO DE SEPARAÇÃO DE ALGAS CULTIVADAS EM UMA LAGOA DE ALTA TAXA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS POR COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO COM ÊNFASE NA ESTABILIDADE DO MATERIAL FLOTADO

Esta dissertação foi analisada e julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, na modalidade acadêmica, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues

Aprovada em: 31/01/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Ruth Marlene Campomanes Santana
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. Luiz Olinto Monteggia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. Elvis Carissimi
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Dedico áqueles que são os pilares de minha vida, Carlos Thadeu Schmidt Cerski e Marcelle Reesink Cerski.

E, por conseguinte aos meus queridos avós, Tadeu Cerski e Helga Erika Schmidt Cerski; e, Johannes Reesink e Grietje Reesink Stevens.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em especial ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) pela oportunidade de aprendizado. Agradeço, também, ao meu orientador, Prof. Dr. Rafael Teixeira Rodrigues pelas horas dedicadas ao longo do mestrado e pelo seu envolvimento com esta pesquisa.

Agradeço imensamente a turma do Instituto de Pesquisa Hidráulicas (IPH), em especial ao Prof. Luiz Olinto Monteggia por ter cedido a lagoa de alta taxa, e ao Mestre José Carlos Alves Barroso Júnior por toda a atenção prestada. Assim como, agradeço as empresas Floerger e Tanac pelo fornecimento das amostras.

Agradeço a todos os profissionais que cruzaram minha trajetória até os dias de hoje, com os quais pude amadurecer profissionalmente. Um muito obrigado a Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano Regional (METROPLAN); a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES-RS); a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM); e a consultoria ABG e Meio Ambiente. Desse modo, também agradeço as outras instituições que fizeram parte de minha formação, a Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), a Universidade Internacional de Andaluzia (UNIA) e Universidade de Huelva (UHU).

Agradeço aos amigos por compreenderem a minha ausência em determinados momentos, e por se fazerem presentes em outros cruciais. Agradeço a minha grande família, em especial as minhas irmãs, as quais sempre me apoiaram, cada qual com sua maneira.

E por fim, agradeço aos meus pais e doutores Carlos Thadeu Schmidt Cerski e Marcelle Reesink Cerski, por todo apoio e amor incondicional a mim sempre dedicado. Sobretudo, aos exemplos prestados de nunca pararem de estudar.

Só na foz do rio é que se ouvem os
murmúrios de todas as fontes.

Guimarães Rosa

RESUMO

A separação de microrganismos fotossintetizantes no tratamento de efluentes possui dois aspectos fundamentais. O primeiro refere-se à qualidade do efluente tratado e seu impacto sobre os recursos hídricos e, o segundo, refere-se ao potencial deste material como fonte de energia renovável. Diversos trabalhos tem demonstrado elevada eficiência na separação de algas no tratamento de efluentes. Entretanto, quando considerado o cultivo de microalgas para utilização da biomassa como matéria prima, para produção de biocombustível por exemplo, mais estudos científicos são necessários. Entre as operações de separação sólido-líquido, normalmente empregadas no tratamento de efluentes, a flotação por ar dissolvido tem se mostrado uma tecnologia vantajosa, pois, além de ser capaz de separar partículas com diâmetro reduzido e baixa velocidade de sedimentação, também permite a obtenção de um material flotado com maior percentual de sólidos, desejável para redução dos custos de processamento da biomassa algal. O objetivo deste trabalho foi avaliar a separação de microalgas cultivadas em uma lagoa de tratamento de esgoto de alta taxa através do processo de coagulação-floculação e flotação por ar dissolvido. Como contribuição aos estudos de separação por FAD, foi avaliado a estabilidade do material flotado submetido a uma agitação mecânica, utilizando a técnica de captura e análise de imagens digitais, segundo um parâmetro chamado porcentagem de área (α). Este parâmetro é definido como o percentual de pixels pretos em relação ao total de pixels da imagem, e demonstra a instabilidade do material flotado. Os coagulantes cloreto férrico e Tanfloc SG (Tanac®) e os floculantes sintéticos do tipo poliácridamidas (SNF Floerger®) catiônico (FO4550SH), aniônico (FA920SH) e não iônico (FA920SH) foram investigados em diferentes dosagens e combinações. O presente estudo mostrou que a separação de algas através deste sistema é viável tecnicamente, sendo que os melhores resultados apresentaram uma remoção de turbidez de 92% para a combinação de cloreto férrico (20mg/L) + FO4550SH (2mg/L) e 97% para Tanfloc SG (20mg/L) + AN956SH (1mg/L). Em relação à estabilidade do material flotado, as amostras que continham apenas coagulantes apresentaram valores de α entre 4,26 e 5,49, indicando uma baixa estabilidade do material flotado. Enquanto as combinações de cloreto férrico (20mg/L) + FO4550SH(0.5mg/L) e Tanfloc SG (20mg/L) +FO4550SH (1 e 2mg/L) foram as que produziram um material flotado com maior estabilidade, apresentando $\alpha=0,35$ e $\alpha=0,40$, respectivamente, demonstrando que o uso dos polímeros proporciona uma maior estabilidade do material flotado, quando este está sujeito a turbulências.

Palavras-chaves: Flotação por ar dissolvido, Estabilidade do material flotado, Separação de microalgas, Coagulação-floculação, Análise de imagens.

ABSTRACT

Separation of photosynthetic microorganisms in the effluent treatment has two fundamental aspects. The first refers to the quality of the treated effluent and its impact on water resources, and the second refers to the potential of this material as a source of renewable energy. Several studies show high efficiency in the separation of algae in effluent treatment. However, more scientific studies are required considering the cultivation of microalgae for the use of them as a raw material for biomass, like biofuel for instance. Among solid-liquid separation operations normally employed in effluents treatment, dissolved air flotation has been shown to be an advantageous technology in order to separate algae, because allows not only the separation of particles with reduced diameter and low sedimentation velocity, but also produces a floating material with higher percentage of solids, which is desirable for reducing the processing costs of the algal biomass. The aim of this work was to evaluate the separation of microalgae originated on a high rate pond through the coagulation, flocculation and dissolved air flotation (DAF) processes. As a contribution to the DAF separation studies, the stability of the floating material was evaluated against mechanical agitation, using the technique of digital image analysis, according to a parameter called area percentage (α). This parameter is defined as the percentage of pixels in relation to the total pixels of the image, and demonstrates the instability of the floating material. The ferric chloride and Tanfloc SG (Tanac®) coagulants and the synthetic flocculants polyacrylamide types (SNF Floerger®) cationic (FO4550SH), anionic (FA920SH) and nonionic (FA920SH) were investigated in different concentrations and combinations. The present study showed that algae separation through this system is technically feasible. The best results showed a turbidity removal of 92% for the combination of ferric chloride (20mg/L) + FO4550SH (2mg/L) and 97% for Tanfloc SG (20mg/ L) + AN956SH (1mg/L). In relation to the stability of the floated material, the samples containing only coagulants presented values of α between 4.26 and 5.49, indicating a low stability of the floated material. While the ferric chloride (20mg / L) + FO4550SH (0.5mg / L) and Tanfloc SG (20mg / L) + FO4550SH (1 and 2mg / L) combinations were the ones that produced a floated material with greater stability, 0.35 and $\alpha = 0.40$, respectively, demonstrating that the use of the polymers provides greater stability of the floated material when it is subjected to turbulence.

Key words: Dissolved air flotation, Stability of the floating material, Microalgae separation, Coagulation/flocculation, Image analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Definição esquemática da formação de pontes entre partículas com aplicação de polímeros orgânicos.....	37
Figura 2. Dupla camada de cargas ao redor de uma partícula coloidal negativamente carregada e a variação do potencial eletrostático em função da distancia a partir da superfície da partícula..	38
Figura 3. Estrutura molecular do Tanfloc.....	41
Figura 4. Mecanismos propostos para a quebra de flocos sob diferentes condições	49
Figura 5. Uma visão esquemática da técnica micromecânica.	50
Figura 6. Uma visão esquemática da técnica micromanipulação.....	50
Figura 7. Valor teórico, previsto pela lei de Henry, do volume de ar precipitado por litro de água saturada em função da pressão e da temperatura.	57
Figura 8. Compressão total do efluente na FGD.....	59
Figura 9. Compressão parcial do efluente na FGD.....	59
Figura 10. Compressão do efluente clarificado na FGD.....	60
Figura 11. Mecanismos responsáveis pela adesão microbolha-partícula na FAD	63
Figura 12. Localização da ETE São João Navegantes/ Dmae, Porto Alegre – RS.....	68
Figura 13. Representação da planta piloto.....	69
Figura 14. Reator UASB em escala piloto.	70
Figura 15. Lagoas de alta taxa, planta piloto.....	71
Figura 16. Representação da LAT (♦ ponto de coleta das amostras).....	72
Figura 17. Anionicidade e massa molar de polímeros (♦ polímeros utilizados).....	75
Figura 18. Cationicidade e massa molar dos polimeros (♦ polímero utilizado)..	75
Figura 19. Fluxograma das etapas empregadas.	76

Figura 20. Equipamento de testes de jarros (previamente a realização da coagulação e floculação).	77
Figura 21. Características dimensionais do sistema de agitação do teste de jarros.	77
Figura 22. Desenho esquemático do sistema de FAD.	78
Figura 23. Etapas do experimento de flotação realizado.	79
Figura 24. Representação do sistema de agitação mecânica do material flotado empregado nos ensaios de estabilidade do material flotado.	80
Figura 25. Representação da posição e do campo de visão fotografado nos ensaios.	81
Figura 26. Imagens da zona de líquido clarificado após agitação do material flotado.	82
Figura 27. Remoção da turbidez em função das concentrações do coagulante cloreto férrico e dos valores de pH.	84
Figura 28. Remoção da turbidez em função das concentrações do coagulante Tanfloc SG e dos valores de pH.	85
Figura 29. Remoção da turbidez conforme concentração e polímero para cloreto férrico.	89
Figura 30. Remoção da turbidez conforme concentração e polímero para Tanfloc SG.	90
Figura 31. Ensaio fotográfico da amostra branco.	95
Figura 32. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico a uma concentração de 20mg/L.	96
Figura 33. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico a uma concentração de 60mg/L.	97
Figura 34. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG a uma concentração de 20mg/L.	98
Figura 35. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG a uma concentração de 60mg/L.	99
Figura 36. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero AN956SH (0,5mg/L).	103
Figura 37. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero AN956SH (1,0mg/L).	104

Figura 38. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero AN956SH (2,0mg/L).....	105
Figura 39. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero AN956SH (3,0mg/L).....	106
Figura 40. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero AN956SH (0,5mg/L).....	107
Figura 41. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero AN956SH (1,0mg/L).....	108
Figura 42. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero AN956SH (2,0mg/L).....	109
Figura 43. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero AN956SH (3,0mg/L).....	110
Figura 44. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FO4550SH (0,5mg/L).	113
Figura 45. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FO4550SH (1,0mg/L).	114
Figura 46. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FO4550SH (2,0mg/L).	115
Figura 47. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FO4550SH (0,5mg/L).	116
Figura 48. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FO4550SH (1,0mg/L).	117
Figura 49. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FO4550SH (2,0mg/L).	118
Figura 50. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FA920SH (0,5mg/L).	121
Figura 51. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FA920SH (1,0mg/L).	122
Figura 52. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FA920SH (2,0mg/L).	123

Figura 53. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FA920SH (3,0mg/L)	124
Figura 54. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FA920SH (0,5mg/L)	125
Figura 55. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FA920SH (1,0mg/L)	126
Figura 56. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FA920SH (2,0mg/L)	127
Figura 57. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FA920SH (3,0mg/L)	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Conteúdos de diversas espécies de microalgas.....	26
Tabela 2. Diâmetros equivalentes mais comuns usados para caracterizar os flocos.	42
Tabela 3. Métodos utilizados para obter tamanho do floco	44
Tabela 4. Revisão das técnicas usadas para determinar a resistência do floco.....	51
Tabela 5. Comparação do tamanho das bolhas geradas nos processos de flotação por gás induzido e gás dissolvido.	65
Tabela 6. Características físicas do Reator UASB.....	70
Tabela 7. Características físicas das dimensões das lagoas de alta taxa.	71
Tabela 8. Análise quali-quantitativa de microalgas presentes na LAT em julho de 2012. ...	72
Tabela 9. Análise quali-quantitativa de microalgas presentes na LAT em agosto de 2012.	73
Tabela 10. Valores da turbidez conforme concentrações dos coagulantes e faixas de pH.	87
Tabela 11. Percentual de remoção de turbidez conforme concentrações dos coagulantes e faixas de pH.	88
Tabela 12. Valores da turbidez conforme concentrações dos polímeros e natureza dos coagulantes em pH 7.....	91
Tabela 13. Percentual de remoção de turbidez conforme concentrações dos polímeros e natureza dos coagulantes em pH 7.....	92
Tabela 14. Valores da turbidez após FAD e após agitação mecânica para os coagulantes.	93
Tabela 15. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para os coagulantes.....	93
Tabela 16. Valores do α para os ensaios dos coagulantes e do branco.....	94
Tabela 17. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero AN956SH.....	100

Tabela 18. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero AN956SH.....	101
Tabela 19. Valores do α para os ensaios com o polímero AN956SH.....	102
Tabela 20. Valores de turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero FO4550SH.....	111
Tabela 21. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero FO4550SH.....	112
Tabela 22. Valores do α para os ensaios com o polímero FO4550SH.....	112
Tabela 23. Valores da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero FA920SH.	119
Tabela 24. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero FA920SH.	120
Tabela 25. Valores do α para os ensaios com o polímero FA920SH.	120

LISTA DE SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
FAI	Flotação por Ar Induzido
FGD	Flotação por Gás Dissolvido
FGI	Flotação por Gás Induzido
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LAT	Lagoas de Alta Taxa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Estrutura da dissertação	20
1.2	Objetivos	20
1.3	Limitações do trabalho.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	Microalgas e seu potencial de uso	23
2.1.1	Microalgas	23
2.1.2	Biocombustíveis	29
2.1.3	Lagoas.....	32
2.2	Coagulação e floculação.....	35
2.2.1	Potencial zeta	37
2.2.2	Coagulantes e floculantes	39
2.2.3	Propriedades estruturais dos flocos.....	41
2.2.4	Coagulação, floculação e microalgas	52
2.3	Flotação.....	53
2.3.1	Flotação eletrolítica.....	54
2.3.2	<i>Sparger flotation</i>	54
2.3.3	Flotação por ar induzido	55
2.3.4	Flotação por ar dissolvido	55
2.3.5	Diferenças entre FAD e FAI	64
2.3.6	Diferenças entre FAD e sedimentação.....	65
2.3.7	Flotação e microalgas.....	66
3	EXPERIMENTAL.....	68
3.1	Materiais	68
3.1.1	Microalgas	68
3.1.2	Reagentes.....	74
3.2	Métodos	76
3.2.1	Coagulação-floculação	76
3.2.2	Flotação por ar dissolvido	78
3.2.3	Estabilidade do material flotado	80
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	84
4.1	Estudos de coagulação-floculação e FAD.....	84

4.2 Estudos de coagulação-floculação e FAD com auxílio de polímeros	88
4.3 Estudos de estabilidade do material flotado	92
4.3.1 Ensaios branco e com coagulantes	92
4.3.2 Ensaios com polímero aniônico	100
4.3.3 Ensaios com polímero catiônico.....	111
4.3.4 Ensaios com polímero não iônico	119
5 CONCLUSÕES.....	129
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

1 INTRODUÇÃO

A separação de microalgas no tratamento de efluentes domésticos é essencial para o desenvolvimento sustentável, uma vez que está relacionada não somente com a preservação dos corpos hídricos, mas também com o potencial que a biomassa algal possui como fonte de energia limpa. Esta biomassa é um recurso abundante e renovável que pode ser convertido em diferentes produtos químicos, biocombustíveis e outros materiais de valor agregado (Chum e Overend, 2001; Dismukes et al, 2008).

De acordo com Barroso (2015), as microalgas quando controladas possuem elevado potencial energético e também auxiliam no tratamento de esgotos, através da remoção de nutrientes como fósforo e nitrogênio. As bactérias e algas das lagoas de alta taxa (LAT) atuam de maneira consorciada, onde a degradação da matéria orgânica ocorre em ambiente aeróbio pela atividade de bactérias e, conseqüentemente, a geração de gás carbônico (CO₂), que juntamente com demais nutrientes, servem como fonte de crescimento de microalgas. Resultando em uma associação vantajosa para produção da biomassa de baixo custo concomitantemente com o tratamento de esgotos.

Até o presente momento, diversos trabalhos demonstraram elevada eficiência na separação de microalgas (Edzwald e Wingler, 1990; Liu et al., 1999; Teixeira e Rosa, 2006; Teixeira e Rosa, 2007; Edzwald et al., 2006; Teixeira et al., 2010, e, Borges, 2014) e remoção de matéria orgânica e nutrientes (Kitchener e Gochin, 1981; Edzwald, 1995; Van Puffelen et al., 1995; Gregory e Edzwald., 2010; e, Barroso, 2015) no tratamento de efluentes via coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido (FAD). No entanto, existem poucos estudos voltados para avaliação conjunta do tratamento de efluentes aliado à viabilidade de recuperação da biomassa como fonte de energia, agregando um viés sustentável a estas operações além da diminuição dos custos de tratamento.

Neste contexto, a separação sólido-líquido (algas-água) via flotação por ar dissolvido (FAD) aparece com grande potencial, pois caracteriza-se pela produção de elevado número de microbolhas, proporcionando uma elevada eficiência para flotação de microalgas. Ademais, a FAD é capaz de arrastar substâncias voláteis e produzir um lodo (material flotado) com maior percentual de sólidos, reduzindo assim os custos de processamento com vistas à obtenção de biocombustíveis. Soma-se a isto uma maior taxa de aplicação ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$) e o fato de requerer menores dosagens de coagulantes e polímeros, alcançando o mesmo desempenho de separação, quando comparada a sedimentação (Reali, 1991).

O tamanho das microbolhas geradas na FAD é de suma importância para a eficiência de separação sólido-líquido e, por isso, muitos trabalhos (Han et al., 2002; Han et al., 2007; Rodrigues, 2013; Vinnett e Silva; 2015) vêm sendo publicados visando desenvolver técnicas de análise de tamanho de bolhas na flotação. Por outro lado, a estabilidade do material flotado, normalmente, não é avaliada, embora, este parâmetro seja de grande importância, pois a desestabilização dos agregados flotados pode impactar fortemente na eficiência de separação. Por este motivo, o presente estudo considera que, assim, somente a avaliação da turbidez do líquido clarificado não representa a real condição da operação de separação na prática.

1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1, **introdução**, alia duas questões essenciais em prol de um ambiente mais sustentável, baseado na busca de uma matriz energética limpa no Brasil através do uso dos biocombustíveis e o tratamento de efluentes domésticos. Descreve ainda de maneira sucinta a flotação por ar dissolvido (FAD) e sua aplicabilidade na remoção de algas. Posteriormente, apresenta o objetivo global e os específicos deste estudo, além de suas limitações.

O capítulo 2, **revisão bibliográfica**, detalha os seguintes temas: microalgas; biocombustíveis; lagoas de estabilização, com destaque a lagoa de alta taxa; coagulação e floculação; propriedades estruturais dos flocos; e flotação, com ênfase ao processo de flotação por ar dissolvido.

O capítulo 3, **experimental**, define os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste estudo. Inicialmente caracteriza as algas, especificando o local no qual foi realizada a coleta para este estudo, e os reagentes. Posteriormente, define os procedimentos amostrais adotados.

O capítulo 4, **resultados e discussões**, apresenta os resultados do trabalho seguido de discussões baseadas no referencial teórico. Analisa e discute a eficiência da separação de algas pelo processo de flotação por ar dissolvido para as diversas combinações testadas, em especial visando a estabilidade do material flotado.

O capítulo 5, **conclusões**, descreve as principais conclusões obtidas a partir dos resultados alcançados por este estudo, atendendo assim ao objetivo global e aos específicos inicialmente propostos. Também abrange potenciais pesquisas futuras identificadas a partir do presente trabalho. E que, por conseguinte, venham a complementá-lo.

1.2 OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo geral avaliar a aplicação da coagulação-floculação e flotação por ar dissolvido para a separação de microalgas

provenientes de uma lagoa de alta taxa tendo como parâmetros de resposta a remoção de turbidez e a estabilidade do material flotado. Para isso, foram realizados diversos experimentos nos quais foram avaliadas diferentes dosagens e combinações entre coagulantes e floculantes (natural e sintético). A seguir, estão listados os objetivos específicos.

- ❖ Avaliar, em escala de bancada, a separação de algas através da coagulação-FAD, utilizando distintas dosagens de coagulantes (cloreto férrico e Tanfloc SG) para diferentes valores de pH (6, 7, 8 e 9).
- ❖ Avaliar a separação de microalgas através da coagulação-floculação-FAD utilizando três polímeros sintéticos (catiônico, aniônico e não iônico).
- ❖ Desenvolver uma técnica para avaliar a estabilidade do material flotado. E posteriormente, aplicá-la empregando diferentes coagulantes e floculantes.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A principal limitação deste trabalho foi a variação das datas entre os ensaios realizados e as amostras coletadas na lagoa de alta taxa. Como a execução do experimento demandava um longo período para cada ensaio (em média 40 minutos para a preparação e 30 minutos na execução), e considerando que os mesmos foram realizados em triplicata, não foi possível concluir as amostras no mesmo dia da coleta.

Ademais, as características físico-químicas da lagoa estão em continua mudança e não havendo tempo hábil e/ou equipamentos e pessoal disponíveis para que a realização do experimento acontecesse em um curto intervalo de tempo, esta foi uma limitação experimental intrínseca ao procedimento experimental adotado.

Todavia, os resultados obtidos foram aceitáveis. A diferença nos valores alcançados pode ser atribuída as diferentes condições das microalgas na lagoa de alta taxa, as quais dependem da radiação solar, temperatura, pH e disponibilidade de CO₂ dentro da lagoa.

Não obstante, a dificuldade citada anteriormente não invalida a importância desta pesquisa. Uma vez que, em escala industrial, a aplicação da flotação por ar dissolvido para separação de algas provenientes de uma lagoa de alta taxa estará sujeita a estas mudanças diariamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MICROALGAS E SEU POTENCIAL DE USO

2.1.1 Microalgas

As microalgas estão presentes em todos os ecossistemas existentes, não apenas no meio aquático (marinho e água doce), mas também no terrestre, sendo consideradas responsáveis ao menos por 60% da produção primária do planeta Terra (Chisti, 2004, Richmond, 2004). No atual momento ainda se desconhece a quantidade total de espécies microalgais, entretanto alguns autores estimam a existência de 200.000 exemplares. Tal diversidade reflete na composição bioquímica das mesmas, ou seja, as microalgas são fonte de uma vasta gama de produtos químicos (Norton et al., 1996; Pulz & Gross, 2004).

O termo microalgas é desprovido de valor taxonômico, abrange microrganismos algais com clorofila a e outros pigmentos fotossintéticos capazes de realizar a fotossíntese oxigênica. Sua caracterização sistemática baseia-se em uma série de critérios (Hoek et al., 1995; Raven et al., 2001). Segundo Tomaselli (2004), tais critérios referem-se aos tipos de pigmentos, a natureza química dos produtos de reserva e os constituintes da parede celular. Igualmente considera-se também os aspectos citológicos e morfológicos, como a ocorrência de células flageladas, a estrutura dos flagelos, os processos de formação do núcleo e da divisão celular, a presença e a caracterização de envoltório dos cloroplastos e a possível conexão entre o retículo endoplasmático e a membrana nuclear.

Devido a sua heterogeneidade estrutural (multicelular, unicelular ou simples) são capazes de crescer rapidamente e viver em condições ambientais

adversas Richmond, 2004. Em termos de abundancia, Oshe et al (2007), descreve as quatro classes de algas mais importantes:

[1] **Diatomiceas (*Bacillariophyceae*):** são as algas dominantes nos oceanos, sendo também encontradas em água salobra e doce. Aproximadamente 100.000 espécies são conhecidas. Possuem paredes celulares impregnadas com sílica polimerizada (frústulas). Todas as células armazenam carbono, na forma de óleo natural ou de um polímero de carboidratos conhecido como crisolaminarina. São células eucarióticas, forma de vida unicelular cocóide, colônia filamentosa e outras formas. Seu complexo coletor de luz engloba a clorofila a e c, b-caroteno, xantofilas (fucoxantina, diatoxantina, diadinoxantina), conferindo-lhes uma coloração dourado amarronzada. Sua reprodução ocorre por divisão binária ou sexuada com formação de auxósporos.

[2] **Algas verdes (*Chlorophyceae*):** este grupo é especialmente abundante em água doce. Forma de vida unicelular ou formando colônias, as quais podem ser: colonial flagelada, cenobial, palmelóide, filamentosa (simples ou ramificada). A principal forma de reserva é o amido, porém sob certas condições podem armazenar óleo. Possuem coloração verde, devido aos pigmentos clorofila a e b, b-caroteno xantofilas (violaxantina, neoxantina, luteína). Sua parede celular geralmente é celulósica, apresentando cloroplastos com pirenoides, estigma e um a dois pares de flagelos de tamanhos iguais com inserção apical. Sua reprodução pode ser por divisão binária, esporos assexuais e reprodução sexual.

[3] **Algas verde-azuladas (*Cyanophyceae*):** são células procarióticas, muito semelhantes em estrutura e em organização às bactérias. Tem forma de vida unicelular, colonial e filamentosa. Apresentam como reserva o amido das cianofíceas, glicogênio e cianoficina. Sua coloração é verde-azulada, verde, violeta, vermelho e castanho, que se deve a composição de pigmentos que

possuem: clorofila a, ficocianina, alofococianina, ficoeritrina, b-caroteno e xantofila. Possuem parede celular contendo peptidoglicano ou mureína mais lipopolissacarídeos (bactérias gram negativo). Sua reprodução ocorre por divisão binária. Estas algas desempenham um papel muito importante na fixação do nitrogênio atmosférico. Aproximadamente 2.000 espécies são conhecidas e encontradas nos mais variados habitats.

[4] **Algas douradas (*Chrysophyceae*):** este grupo de algas é similar as diatomáceas, principalmente pela pigmentação e composição bioquímica. Elas possuem um sistema de pigmentos mais complexo (clorofila a e c, b-caroteno, xantofila, dentre elas a fucoxantina), podendo ser de coloração amarela, marrom ou laranja. Suas células são eucarióticas, sendo que a maioria dos gêneros unicelulares são flagelados ou colonial. Possuem como reserva óleos naturais e crisolaminarina. Sua reprodução é por divisão binária ou sexual com formação de um cisto silicoso. Aproximadamente 1.000 espécies são conhecidas, principalmente em sistemas de água doce.

Na natureza, o acúmulo de lipídios nas células das microalgas aumenta sob certas condições (Sellner et al, 2003), contudo muitas espécies podem ser induzidas a acumular maiores quantidades, a fim de maximizar a produção de óleo. O teor médio de lipídios em microalgas varia de 1 a 70% em peso seco. A Tabela 1 apresenta o conteúdo lipídico e a produtividade de biomassa e lipídios em espécies de microalgas marinha e de água doce.

Tabela 1. Conteúdos de diversas espécies de microalgas.

Espécies marinhas e de água doce	Conteúdo lipídico (% massa seca)	Produtividade lipídica (mg.L ⁻¹ .dia ⁻¹)	Produtividade de biomassa (g.L ⁻¹ .dia ⁻¹)	Produtividade por área (g.m ⁻² .dia ⁻¹)
<i>Ankistrodesmus sp</i>	24.0–31.0	–	–	11.5–17.4
<i>Botryococcus braunii</i>	25.0–75.0	–	0.02	3.0
<i>Chaetoceros muelleri</i>	33.6	21.8	0.07	–
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	14.6–16.4/39.8	17.6	0.04	–
<i>Chlorella emersonii</i>	25.0–63.0	10.3–50.0	0.036–0.041	0.91–0.97
<i>Chlorella protothecoides</i>	14.6–57.8	1214	2.00–7.70	–
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19.0–22.0	44.7	0.23–1.47	–
<i>Chlorella vulgaris</i>	5.0–58.0	11.2–40.0	0.02–0.20	0.57–0.95
<i>Chlorella sp.</i>	10.0–48.0	42.1	0.02–2.5	1.61–16.47/25
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2.0	–	2.90–3.64	72.5/130
<i>Chlorella</i>	18.0–57.0	18.7	–	3.50–13.90
<i>Chlorococcum sp.</i>	19.3	53.7	0.28	–
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20.0–51.1	–	10	–
<i>Dunaliella salina</i>	6.0–25.0	116.0	0.22–0.34	1.6–3.5/20–38
<i>Dunaliella primolecta</i>	23.1	–	0.09	14
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16.7–71.0	–	0.12	–
<i>Dunaliella sp.</i>	17.5–67.0	33.5	–	–
<i>Ellipsoidion sp.</i>	27.4	47.3	0.17	–
<i>Euglena gracilis</i>	14.0–20.0	–	7.70	–
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25.0	–	0.05–0.06	10.2–36.4
<i>Isochrysis galbana</i>	7.0–40.0	–	0.32–1.60	–
<i>Isochrysis sp.</i>	7.1–33	37.8	0.08–0.17	–
<i>Monodus subterraneus</i>	16.0	30.4	0.19	–
<i>Monallanthus salina</i>	20.0–22.0	–	0.08	12
<i>Nannochloris sp.</i>	20.0–56.0	60.9–76.5	0.17–0.51	–
<i>Nannochloropsis oculata.</i>	22.7–29.7	84.0–142.0	0.37–0.48	–
<i>Nannochloropsis sp.</i>	12.0–53.0	37.6–90.0	0.17–1.43	1.9–5.3
<i>Neochloris oleoabundans</i>	29.0–65.0	90.0–134.0	–	–
<i>Nitzschia sp.</i>	16.0–47.0	–	–	8.8
<i>Oocystis pusilla</i>	10.5	–	–	40.6–45.8
<i>Pavlova salina</i>	30.9	49.4	0.16	–
<i>Pavlova lutheri</i>	35.5	40.2	0.14	–
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18.0–57.0	44.8	0.003–1.9	2.4–21
<i>Porphyridium cruentum</i>	9.0–18.8/60.7	34.8	0.36–1.50	25
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11.0–55.0	–	0.004–0.74	–
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1.9–18.4	35.1	0.19	–
<i>Scenedesmus sp.</i>	19.6–21.1	40.8–53.9	0.03–0.26	2.43–13.52
<i>Skeletonema sp.</i>	13.3–31.8	27.3	0.09	–
<i>Skeletonema costatum</i>	13.5–51.3	17.4	0.08	–
<i>Spirulina platensis</i>	4.0–16.6	–	0.06–4.3	1.5–14.5/24–51
<i>Spirulina maxima</i>	4.0–9.0	–	0.21–0.25	25
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	20.6	17.4	0.08	–
<i>Tetraselmis suecica</i>	8.5–23.0	27.0–36.4	0.12–0.32	19
<i>Tetraselmis sp.</i>	12.6–14.7	43.4	0.30	–

Fonte: Mata, Martins e Caetano, 2010.

Como mostrado na Tabela 1, o teor de óleo em microalgas pode chegar a 75% em peso seco, mas este valor está associado com uma baixa produtividade na espécie *Botryococcus braunii*. A maioria das algas comuns, tais como, *Chlorella*, *Cryptocodinium*, *Cylindrotheca*, *Dunaliella*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Nannochloropsis*, *Neochloris*, *Nitzschia*, *Phaeodactylum*, *Porphyridium*, *Schizochytrium*, *Tetraselmis* têm níveis de óleo entre 20% e 50%. Essa porcentagem pode ser manipulada visando uma maior produtividade (Metting, 1996, Qin, 2005, Spolaore et al., 2006, Chisti, 2007, Schenk et al., 2008).

Muitas pesquisas têm descrito as vantagens da aplicação de microalgas para a produção de biodiesel em comparação com outras matérias-primas disponíveis (Chisti, 2007, Li, 2008, Rodolfil, 2009). De um ponto de vista prático, as microalgas são fáceis de cultivar, capazes de crescer com pouca ou nenhuma atenção, utilizam água imprópria para o consumo humano e obtêm nutrientes facilmente.

As microalgas se reproduzem usando a fotossíntese através da conversão de energia solar em energia química, completando todo o ciclo de crescimento em poucos dias (Sheehan et al., 1998). Além disso, elas podem crescer em diferentes ambientes expostos à luz solar e requerem alguns nutrientes simples, embora as taxas de crescimento possam ser aceleradas pela adição específica de nutrientes e arejamento suficiente (Aslan et al., 2006).

Elas possuem elevadas taxas de crescimento e produtividade quando comparadas a silvicultura convencional, culturas agrícolas, e outras plantas aquáticas, ou seja, possuem uma maior produção (Mata et al., 2010, Reda et al., 2011). Ao contrário das plantações, as microalgas crescem em volume ocupando menor área (Hu et al., 2008), utilizando menor quantidade de água e ainda são capazes de assimilar água salobra ou residual (Chisti, 2007, Dismukes et al., 2008).

Diferentes espécies de microalgas podem se adaptar para viver em uma variedade de condições ambientais. Assim, é possível encontrar espécies mais

adequadas para determinados locais ou com características específicas de crescimento, o que não é possível com outras matérias-primas de biodiesel, como a soja, colza, girassol e óleo de palma (Mata et al., 2010).

Em razão das características citadas anteriormente, as microalgas não necessitam de terras aráveis (Hu et al., 2008) e nem exigem a aplicação de inseticidas ou herbicidas (Rodolfi et al., 2009). Somado ao fato de que não competem com culturas alimentícias pois são produzidas a partir de fontes não alimentares.

As microalgas podem fornecer matéria-prima para vários tipos de combustíveis renováveis, como o biodiesel, o metano, o hidrogênio e o etanol. Microalgas utilizadas na fabricação de biodiesel não contém enxofre e tem um desempenho tão favorável quanto o diesel de petróleo. São ainda capazes de reduzir as emissões de materiais particulados, CO₂, hidrocarbonetos e SO_x, porém para determinados modelos de motores emitem uma quantidade maior de NO_x (Delucchi, 2003).

A utilização de microalgas para a produção de biocombustíveis também possui outros fins:

- ❖ Remover o CO₂ dos gases de combustão industrial através da biofixação algal (Wang, 2008);
- ❖ Tratar águas residuais por remoção de hidróxido de amônia, nitrato e fosfato, fazendo com que as algas cresçam utilizando estes contaminantes como nutrientes (Wang, 2008);
- ❖ Após a extração do óleo, a biomassa algal resultante pode ser processada em etanol, metano, alimentação do gado, adubo orgânico devido à sua elevada razão N:P, ou simplesmente queimada para a cogeração de energia (electricidade e calor)(Wang, 2008);
- ❖ Combinado sua capacidade de crescer sob condições mais severas, e a sua reduzida necessidade por nutrientes, elas podem ser cultivadas em áreas inadequados para fins agrícolas,

independentemente das mudanças climáticas sazonais, portanto, não competem por terra arável, e podem utilizar águas residuais como meio de cultura, não exigindo a utilização de água doce potável (Mata et al., 2010);

- ❖ Dependendo das espécies de microalgas outros compostos podem ser extraídos, com aplicações importantes em diferentes setores industriais, incluindo uma grande variedade de produtos de química fina e produtos a granel, tais como gorduras, ácidos graxos, poliinsaturados, óleo, corantes naturais, açúcares, pigmentos, antioxidantes e compostos de alto valor bioativo (Raja et al., 2008, Li et al., 2008);
- ❖ Devido a sua variedade biológica e seus derivados de alto valor, com possíveis aplicações comerciais, as microalgas possuem um grande potencial para revolucionar distintos campos da biotecnologia, tais como biocombustíveis, cosméticos, produtos farmacêuticos, nutrição e aditivos alimentares, aquicultura, e a prevenção da poluição (Rosenberg et al., 2008, Raja et al., 2008).

2.1.2 Biocombustíveis

Paulatinamente as fontes de biomassa estão se tornando mais atraentes, devido a potencial escassez de combustíveis fósseis convencionais, ao aumento das emissões de poluentes gerados por combustão, e seus crescentes custos de fabricação (Senoz et al., 2000). Ademais, os combustíveis a base de petróleo estão geograficamente limitados e á beira de atingir o seu pico de produção (Sheehan, 1998).

Um combustível alternativo aos derivados de petróleo deve ser tecnicamente viável, economicamente competitivo, ambientalmente aceitável, e facilmente disponível. Dentro destas características, podemos qualificar o biodiesel. O biodiesel pode oferecer outros benefícios, incluindo a redução da

emissão dos gases de efeito estufa, desenvolvimento regional e estrutura social, especialmente nos países em desenvolvimento. O uso do biodiesel vai permitir um equilíbrio a ser encontrado entre agricultura, desenvolvimento econômico e meio ambiente (Demirbas, 2007).

Biocombustível é definido comumente como um combustível derivado de materiais biológicos, incluindo matéria orgânica morta que não esteja fossilizada, e também proveniente de produtos metabólicos de organismo vivos (Demirbas, 2009).

Por razões científicas e políticas, os biocombustíveis foram divididos por Clark (2009) em duas categorias "primeira geração" e "segunda geração". As principais diferenças da segunda geração são: as matérias primas aplicadas não são constituídas por culturas alimentares e nem competem com estas; há um melhor aproveitamento da matéria prima empregada; e, ocorre uma redução na demanda de água doce.

O uso de culturas terrestres não comestíveis como matéria prima para biocombustíveis, visto por alguns como desejável, muitas vezes ocupam terras que seriam direcionadas a produção alimentar, e mesmo que sejam cultivadas, nenhum tipo pode competir com o elevado potencial de produtividade das microalgas (Leite et al., 2013). Destaca-se que os biocombustíveis de segunda geração ainda estão em fase de desenvolvimento, demandando por avanços tecnológicos e custos competitivos (Tampier, 2009).

Os custos de combustíveis provenientes de microalgas ainda são elevados, por exemplo, Chisti (2007) calculou que o custo de produção de biodiesel de algas deve cair quase 10 vezes para ser competitivo com o petróleo bruto em US \$ 100/barril. E, embora, seja necessário subsídios do governo para que haja uma competição com o diesel fóssil no mercado, pesquisas estão sendo realizadas para transformar o biodiesel de algas em um combustível economicamente viável (Kanel et al., 1999, Bijl et al., 2004, Yokochi et al., 2003).

Segundo Schenk et al (2008) as maiores vantagens da segunda geração de biocombustíveis baseada em sistemas de cultivo de microalgas são:

- ❖ maior taxa de conversão de radiação (como evidenciado pelo aumento do rendimento de biomassa por hectare);
- ❖ pode ser cultivado por "lotes" o ano inteiro, proporcionando um rendimento confiável e contínuo de óleo;
- ❖ possibilita a utilização de águas com traços de sal e/ou águas residuárias, reduzindo o consumo de água doce;
- ❖ pode neutralizar a emissão de CO₂ através da captura de CO₂ pelas algas;
- ❖ produz combustíveis não tóxicos e altamente biodegradáveis.

Barroso (2015) defende que utilização de esgotos domésticos como fonte de carbono e nutrientes pode reduzir os custos de cultivo das algas, onde a maioria dos sistemas são mixotróficos, o que possibilita a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos e a captação do gás carbônico gerado por estes pelas algas. Desta maneira fica atendida a demanda de carbono inorgânico das algas, tendo como consequência uma maior produtividade de biomassa, possibilitando assim a remoção de nutrientes do meio líquido para geração de novas células de microalgas. Uma oportunidade atrativa é o cultivo de biomassa como um subproduto do tratamento de águas residuais, sendo possível a sua realização em lagoas de alta taxa. A produção em larga escala de biocombustíveis de algas utilizando LAT para o tratamento de águas residuárias foi proposto primeiramente por Oswald e Golueke (1960).

A biomassa de algas produzidas e extraídas a partir destes sistemas de tratamento pode ser convertido em biocombustíveis através de vários caminhos, por exemplo, a digestão anaeróbia para o biogás, transesterificação de lipídios para o biodiesel, fermentação de carboidratos para bioetanol e conversão em alta temperatura para bioóleo (Craggs et al., 2010).

2.1.3 Lagoas

2.1.3.1 Lagoas de estabilização

As lagoas de estabilização simulam os fenômenos biológicos observados na natureza, e por este motivo são empregadas para a depuração de águas residuárias. De modo geral, pode-se descrevê-las como grandes tanques de pequena profundidade, definidos por diques de terra, nos quais as águas residuárias brutas são tratadas inteiramente por processos naturais, envolvendo principalmente algas e bactérias (Silva & Mara, 1979).

Segundo Neto (1997) as lagoas de estabilização são classificadas de acordo com a atividade metabólica predominante na degradação da matéria orgânica, tais como: anaeróbias, facultativas e de maturação ou aeróbias. A profundidade, por sua vez, determina a fração da massa líquida com maior penetração de luz e conseqüentemente, maior taxa fotossintética.

A principal finalidade das lagoas anaeróbias (2 a 5 m de profundidade) é a remoção de DBO (eficiência na faixa de 50% a 70%) e sólidos suspensos (eficiência em torno de 70%). Estes sólidos são sedimentados no fundo da lagoa, sendo digeridos, posteriormente, pela ação das bactérias anaeróbias. A redução de DBO somente ocorre após a formação de ácidos, produzidos pelos microrganismos metanogênicos. Neste tipo de lagoa, a redução de coliformes não é significativa, quando comparadas com as facultativas e de maturação (Silva Filho. 2007).

O mesmo autor define que a função das lagoas facultativas (1,5 m a 3 m de profundidade) é a remoção de DBO e patógenos. O processo de estabilização da matéria orgânica ocorre em três zonas distintas: zona aeróbia, facultativa e anaeróbia. A presença de oxigênio nessas lagoas é suprida pelas algas, que produzem, por meio de fotossíntese, oxigênio durante o dia e o consomem durante a noite. Na zona fótica, parte superior, a matéria orgânica dissolvida é oxidada pela respiração aeróbia, enquanto na afótica, zona inferior,

a matéria orgânica sedimentada é convertida em gás carbônico, água e metano.

Por sua vez, as principais finalidades da lagoa de maturação são remoção de patógenos e nutrientes. Elas objetivam, principalmente, a desinfecção do efluente das lagoas de estabilização. São mais rasas (profundidade de 0,8 m a 1,5 m), permitindo a eficaz ação dos raios ultravioleta sobre os microrganismos presentes em toda a coluna d'água. Os fatores que influenciam no processo de remoção de bactérias, vírus e outros microrganismos presentes em sua massa líquida são: menor profundidade, alta penetração da radiação solar, elevado pH e elevada concentração de oxigênio dissolvido. A eficiência na remoção de patógenos é de 99,99% para uma série de mais de três lagoas.

As lagoas de estabilização também possuem aplicabilidade como uma alternativa para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, pelo fato de apresentarem simplicidade operacional similar a reconhecida para estes reatores (Sperling. 1996). Entretanto, segundo Asisse et al. (2001) apud Monteggia e Tessele (2001) uma etapa adicional de tratamento é requerida quando o sistema de tratamento de efluente doméstico consiste de reator anaeróbio seguido de lagoas de polimento, pois, muitas vezes, a qualidade do efluente não atende aos valores preconizados na legislação.

2.1.3.2 Lagoas de alta taxa

As lagoas de alta taxa possuem profundidade reduzida (0,30 m a 0,80 m) e de acordo Oswald et al (1997) são capazes de substituir vantajosamente as lagoas facultativas e de maturação em termos de eficiência de tratamento, mediante remoção de matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos. Esta profundidade reduzida, juntamente com elevadas cargas de nitrogênio e de fósforo provenientes das águas residuárias, permite que as microalgas proliferem a altas concentrações. Além de ser considerada um

sistema com um processo de tratamento de baixo custo que, maximizando a utilização da energia solar, possibilita maior absorção de nutrientes dos esgotos, se comparado ao sistema de lagoa convencional (Teixeira Pinto & Onoyama. 1991).

De um modo geral, pode-se dizer que a lagoa de alta taxa é uma adaptação das lagoas de estabilização que incorpora um sistema de mistura simples e controladores de fluxo (*baffles*) para otimização da produção de oxigênio através da fotossíntese (Fallowfield et al. 1996). O misturador é usado para mover a cultura e deve fornecer velocidade média da água na faixa de 0,15 - 0,30 m/s gerando vórtices turbulentos que fornecem a mistura vertical (Craggs et al., 2014). A mistura vertical aumenta o crescimento de microalgas, assegurando frequente exposição das células a luz solar, evitando a sedimentação das microalgas e flocos bacterianos e aumentando também a difusão de nutrientes em torno da célula (Hadiyanto et al. 2013).

A LAT foi desenvolvida para proporcionar um tratamento mais eficiente e consistente do que a lagoa facultativa, possibilitando ainda a produção de microalgas (Craggs et al., 2014). Também oferece a possibilidade de uma maior incorporação do P e N aumentando a biomassa algal (Powell et al., 2010), para que esta possa ser aproveitada em energias renováveis (biocombustíveis). Nos últimos anos, o potencial de uso de efluentes como matéria prima para o cultivo de algas para a produção de biocombustíveis tem recebido atenção considerável (Rawat et al, 2011).

As características ideais de espécies de algas para cultivo em LAT alimentadas a partir de águas residuárias são: (i) alta taxa de crescimento (alta produtividade) quando alimentada com nutrientes de águas residuais, onde são predominantemente N-amoniaco e P-fosfato; (ii) tolerância a variações sazonais e diurnas em condições de crescimento ao ar livre; (iii) formação de agregados permitindo uma simples colheita através da gravidade, (iv) altos níveis de componentes de células de algas valiosos como lipídios para a produção de biodiesel (Oswald. 1991).

A LAT é considerada uma opção viável para a produção de biocombustíveis em escala comercial, devido ao seu design e construção mais simplificados, bem como o capital de investimento e custos operacionais mais reduzidos (Hadiyanto et al., 2013). Entretanto, a LAT é suscetível a aparição de protozoários herbívoros e zooplâncton (rotíferos e cladóceros) podendo reduzir a concentração de algas a níveis inferiores em poucos dias (Van Harmelen e Oonk, 2006; Benemann, 2008).

2.2 COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

A água pode conter diversas impurezas, tais como partículas coloidais, matéria orgânica dissolvida e organismos em geral, que normalmente apresentam carga superficial negativa, impedindo assim sua agregação. O processo de coagulação-floculação tem como objetivo remover o material sólido em suspensão e/ou coloidal (Di Bernardo et al., 2010; Pavanelli, 2001).

Segundo Alves (2007), no processo de coagulação, quando o agente químico é adicionado ao efluente ocorre a hidrólise, a polimerização e a reação com a alcalinidade, formando hidróxidos comumente chamados de gel, compostos de íons positivos. Como a maioria das partículas coloidais e em suspensão possuem cargas negativas em sua superfície, os íons formados na hidrólise desestabilizam as cargas destas partículas, reduzindo o potencial zeta até próximo à zero, permitindo a aproximação e agregação das partículas e, com consequente formação de coágulos. Desse modo, os aglomerados podem ser separados na decantação, flotação ou filtração.

Outros autores definem coagulação como a etapa de desestabilização das partículas coloidais com formação de micro flocos e a floculação como a aglomeração destas partículas originando flocos maiores (Gregor et al., 1997).

Segundo Santos (2001), a formação de flocos ocorre em duas etapas, inicialmente pela mistura rápida, conhecida como coagulação; e posteriormente pela mistura lenta, a floculação. Após a coagulação, as partículas apresentam

tamanhos variados entre 0,5 μm e 5 μm e são chamadas de partículas primárias. Na floculação os flocos formados são maiores e capazes de sedimentar, com tamanho de 0,1 mm a 5 mm.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a coagulação e floculação são consideradas resultado individual ou combinado da ação de quatro mecanismos distintos:

[1] Compressão da camada difusa: concentrações elevadas de íons positivos e negativos (força iônica grande) na água acarretam acréscimo do número de íons na camada difusa, que, para se manter eletricamente neutra, necessariamente tem seu volume reduzido (diminuição da espessura), de modo tal que as forças de van der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática.

[2] Adsorção e neutralização de cargas: a desestabilização de uma dispersão coloidal consiste nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente. Como o coagulante se dissolve, os cátions servem para neutralizar a carga negativa do colóide, isso ocorre antes da formação visível do floco. A agitação rápida é efetiva nesta fase. Microflocos são então formados os quais retém a carga positiva na faixa ácida devido à adsorção de H^+ . Esses microflocos também servem para neutralizar e cobrir as partículas coloidais (Eckenfelder, 1989).

[3] Varredura: dependendo da quantidade adicionada de coagulante, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a formação de precipitados do tipo $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Estes precipitados possuem espaços vazios capazes de envolver o colóide e as partículas suspensas. Em geral, os flocos obtidos com esse mecanismo são maiores e sedimentam ou flutam mais facilmente que os flocos obtidos com a coagulação realizada no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas.

[4] Adsorção e formação de pontes: este mecanismo caracteriza-se por envolver o uso de polímeros de grandes cadeias moleculares, os quais servem de ponte entre a superfície a qual estão aderidos e outras partículas. Este mecanismo é desenvolvido por intermédio da utilização de compostos orgânicos (polímeros) sintéticos ou naturais, que podem apresentar sítios ionizáveis ao longo de suas cadeias podendo ser classificadas como: catiônicas, aniônicas e não iônicas. Este mecanismo é ilustrado na Figura 1.

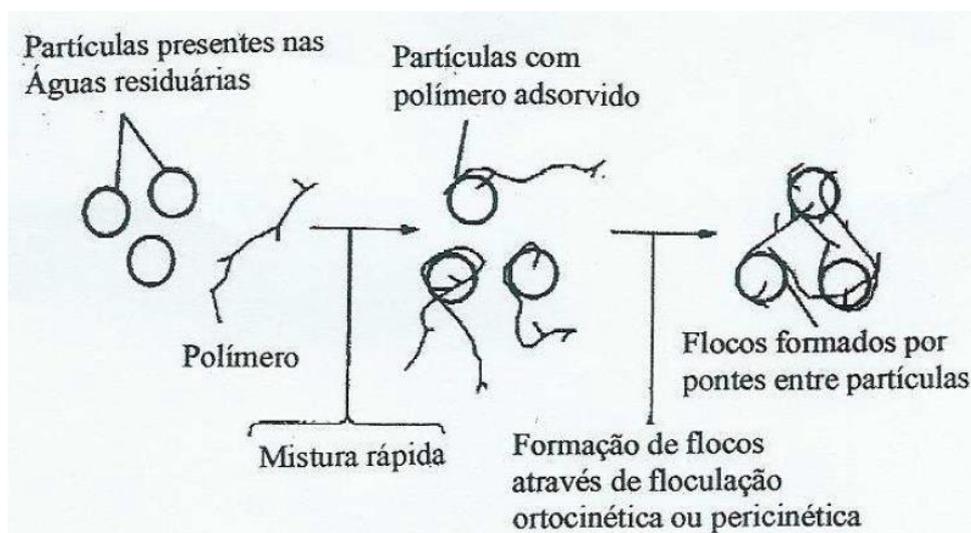


Figura 1. Definição esquemática da formação de pontes entre partículas com aplicação de polímeros orgânicos. Fonte: Metcalf, 1991.

2.2.1 Potencial zeta

Conforme Borges (2014) o coloide negativo e sua atmosfera carregada positivamente produzem um potencial elétrico reativo à solução. Este potencial tem um valor máximo na superfície e diminui gradualmente com a distancia, aproximando-se de zero fora da camada difusa.

As cargas primárias em um coloide, que podem ser tanto positivas quanto negativas, atraem íons de cargas opostas da solução. Estas cargas opostas são chamadas de contraíons. Se as cargas primárias são

suficientemente grandes, os contraíons atraídos podem formar uma camada compacta em volta das cargas primárias. Esta camada é chamada camada Stern. Os contraíons, por sua vez, atraem seus próprios contraíons que são chamados co-íons das cargas primárias que formam uma nova camada. Esses co-íons acabam ficando difusos e originam uma camada difusa chamada de Gouy. Portanto, as camadas de Stern e Gouy formam um envelope de dupla camada envolvendo as cargas primárias.

Todas as cargas na camada Stern se movem com o coloide, por isso, constituem uma camada fixa. Na camada Gouy, parte da camada pode se mover com a partícula coloidal. A camada pode ser cisalhada além do limite da camada fixa de Stern, de forma que parte das cargas da camada difusa move-se junto com a partícula. Assim, as cargas são elétricas e possuem potencial eletrostático. O potencial medido na distancia do plano de cisalhamento é chamado de potencial zeta. Quanto maior o valor deste potencial, maior a força de repulsão e mais estável é o coloide (Figura 2).

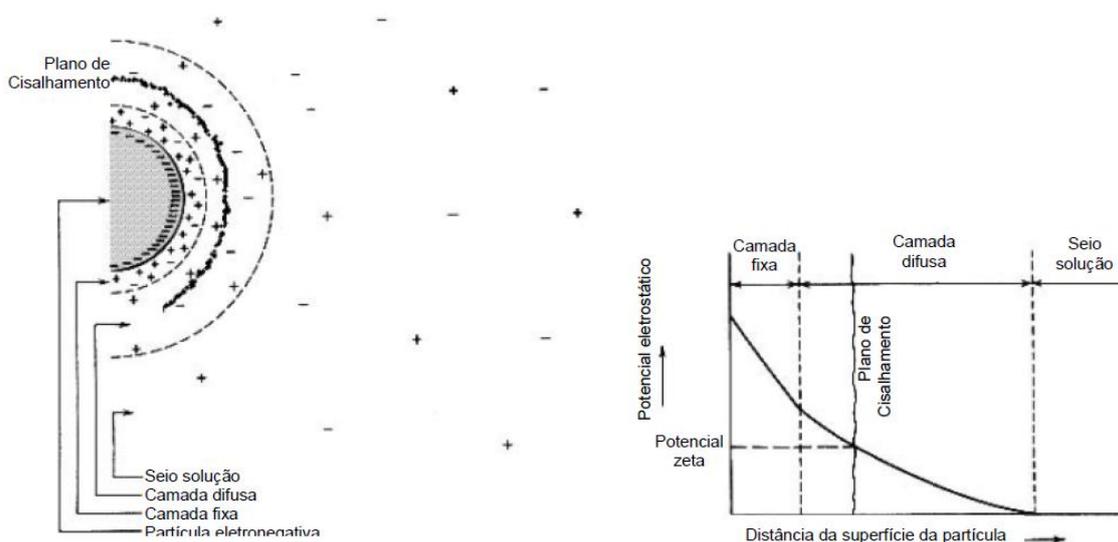


Figura 2. Dupla camada de cargas ao redor de uma partícula coloidal negativamente carregada e a variação do potencial eletrostático em função da distancia a partir da superfície da partícula. Fonte: Sincero e Sincero, 2003.

2.2.2 Coagulantes e floculantes

Segundo Figueiredo (2009), produtos químicos podem melhorar a remoção de contaminantes e são usualmente associados às unidades de tratamento físico, como decantadores, flotadores ou filtros. De acordo com Letterman et al (1999), coagulantes são eletrólitos inorgânicos, normalmente sais hidrosolúveis, usados para desestabilizar uma suspensão e tipicamente são adicionados sob uma agitação vigorosa.

Os coagulantes habitualmente empregados nos tratamentos de água e esgoto são o sulfato de alumínio, cloreto férrico, hidroxicloreto de alumínio e sulfato férrico (Pavanelli, 2001). O cloreto férrico (FeCl_3) comercial é uma solução acastanhada, solúvel em água (20°C) e insolúvel em solventes orgânicos. Atua em uma vasta faixa de pH e é amplamente utilizado para a remoção de cor e turbidez de águas residuárias (Di Bernardo et al., 2011).

Os polímeros, no tratamento de água, têm como finalidade auxiliar a etapa de floculação, tendo como objetivo a redução da concentração dos coagulantes (Libânio, 2010). Estes promovem a aglutinação das partículas que estão em suspensão no meio e conseqüentemente seu aumento de massa. Os polímeros orgânicos naturais ou sintéticos são chamados de polieletrólitos e apresentam longa cadeia molecular e elevado número de cargas. Apresentam ainda o agrupamento de cargas elétricas distribuídas assimetricamente ao longo da molécula, que podem ser positivas (polieletrólitos catiônicos), negativas (polieletrólitos aniônicos) ou nulas (polieletrólitos não iônicos) (Figueiredo, 2009).

Conforme Borges (2014) aborda em sua pesquisa, alguns autores fazem uso indistinto entre coagulantes e floculantes naturais orgânicos como no caso do polímero catiônico Tanfloc. A título de exemplo, Grahmam et al. (2008) observou o desempenho e caracterizou o Tanfloc como coagulante, contudo Beltran-heredia et al. (2010) trata o mesmo reagente com alto poder floculante. Por fim, a patente do produto (Lamb e Decusati, 2002), o define como um agente coagulante/floculante. Sendo que o produto patentado é composto em

massa por 44 a 56% de tanino, 17 a 32% de sais de amônia e 28 a 38% de aldeído. Neste estudo, o reagente foi considerado coagulante.

O Tanfloc é um reagente a base de tanino, tem como características baixa massa molar e carga elétrica positiva, agindo sobre os colóides através da neutralização de cargas e formação de pontes entre estas partículas. O Tanfloc SG é um polímero orgânico catiônico de origem vegetal, possui um largo espectro de aplicações e apresenta um aspecto importante nos processos de tratamento, não alterando o pH do líquido. Sua eficiência abrange uma faixa pH entre 4,5 e 8,0 (Figueiredo, 2009). A estrutura molecular do Tanfloc está representada na Figura 3.

Estudos com o Tanfloc foram realizados para a caracterização deste reagente em meio aquoso sem adição de sais. A perda de carga catiônica, pela desprotonação da amina, e de solubilidade com o pH são comportamentos que tornam o Tanfloc similar aos coagulantes de sais de ferro e alumínio. Os mecanismos propostos em função do pH foram descritos por Graham et al., 2008.

- ❖ pH 6-7: o mecanismo de coagulação deve envolver desestabilização de cargas e aprisionamento do tanino em fase sólida em comportamento análogo aos coagulantes inorgânicos;
- ❖ pH 7: o polímero perde carga e solubilidade, e os mecanismos prováveis são ligação direta e aprisionamento pela fase sólida;
- ❖ pH 8-9: a densidade de carga do polímero fica pequena e o mecanismo mais proeminente se torna a adsorção por efeito varredura.

Além disso, vale ressaltar que o Tanfloc por ser de origem vegetal é renovável. O seu uso aproveita um subproduto do plantio da acácia negra, planta útil para o meio-ambiente, pois recupera solos com baixa fertilidade através da deposição de folhagem rico em nitrogênio. Ainda auxilia no controle

da erosão devido a sua adaptabilidade a diferentes locais, inclusive em áreas onde houve perda de solo superficial (Hoeflich, 2003).

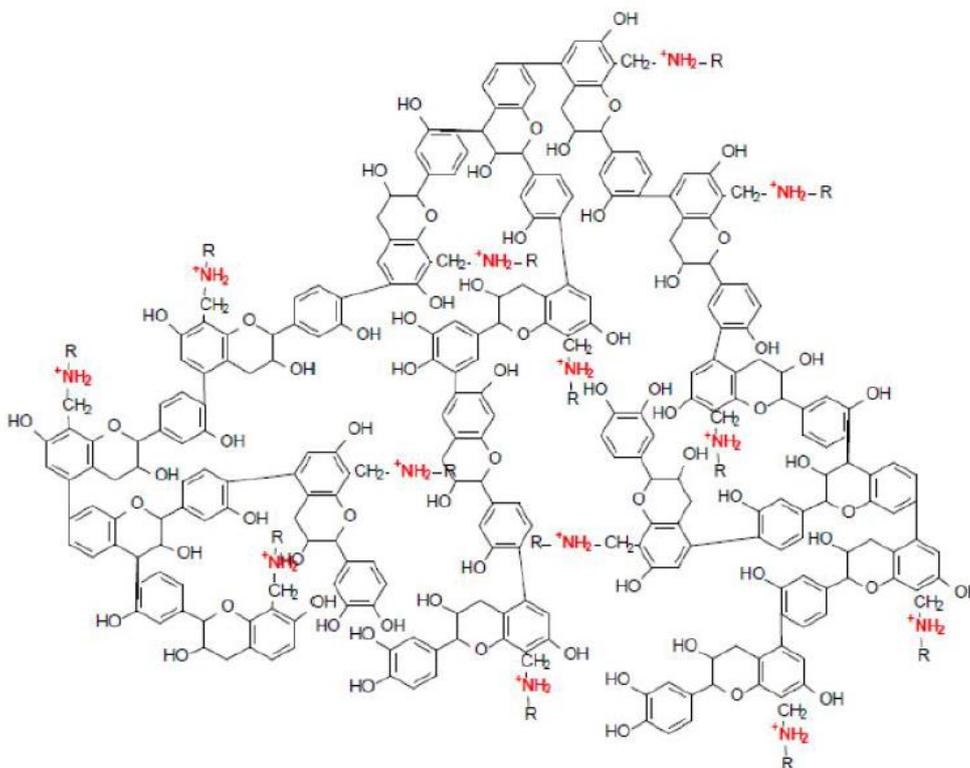


Figura 3. Estrutura molecular do Tanfloc. Fonte: Mangrich et al., 2013.

2.2.3 Propriedades estruturais dos flocos

A estrutura dos flocos é essencial para o correto funcionamento dos distintos métodos de tratamentos de água e esgoto em escala industrial (Waite, 1999). Nestes tratamentos o objetivo é a retirada das impurezas da água sob a remoção de partículas sólidas, através das técnicas de filtração, sedimentação, flotação e espessamento (Rebhun e Lurie, 1993). As características físicas do floco são essenciais para determinar sua eficiência de separação. Apesar da quantificação das características do floco ser dificultada devido a sua estrutura

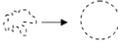
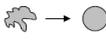
tridimensional altamente irregular, porosidade e natureza delicada inerente, é possível medir o tamanho do floco e a sua força de resistência (Jarvis et al., 2005).

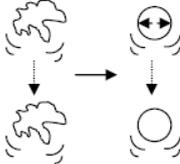
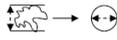
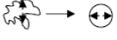
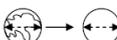
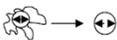
2.2.3.1 Tamanho do floco

Há diferentes métodos que proporcionam uma caracterização representativa do tamanho do floco. Por exemplo, uma maneira simples para dimensionar o tamanho do floco é determinar a sua dimensão mais longa. Entretanto, esta medida é de uso limitado, uma vez que apenas dá uma indicação do tamanho do floco em uma dimensão. Outra abordagem mais comum é encontrar a dimensão mais longa do floco no plano horizontal e a do plano vertical (Manning e Dyer, 1999), pois permite uma relação de altura x largura do floco.

Normalmente, ao dimensionar o tamanho do floco, realiza-se uma medição do diâmetro equivalente do floco (Cousin e Ganczarzyk, 1998). O uso de diâmetros equivalentes permite que a partícula seja definida como uma esfera ou círculo, que de alguma forma é equivalente a partícula. Tal medida padronizada permite uma comparação entre formas muito irregulares. Na Tabela 2 encontram-se os métodos mais comumente aplicados para o dimensionamento dos diâmetros.

Tabela 2. Diâmetros equivalentes mais comuns usados para caracterizar os flocos.

Descrição	Diagrama	Equação
O diâmetro de um círculo com o mesmo perímetro (P) da partícula medida.		$d_c = \frac{P}{\pi}$
O diâmetro de um círculo com a mesma área projetada (A).		$d = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$

O diâmetro de uma esfera com a mesma área de superfície (S).		$d_s = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$
Diâmetro de uma esfera com o mesmo volume (V).		$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$
O diâmetro de uma esfera com a mesma relação área / volume que o floco.		$d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2}$
O diâmetro de uma esfera tendo a mesma densidade e velocidade de queda livre que o floco no mesmo fluido com a mesma densidade e viscosidade. O diâmetro de uma partícula em queda livre na faixa de fluxo laminar (onde $Re < 0,2$).		$d_{st} = \frac{18\mu v}{\rho_f - \rho}$
O valor (médio) entre pares de tangentes paralelas ao contorno projetado da partícula.		-
O comprimento da corda paralela a uma direção fixa que divide a área projetada do floco em duas partes iguais.		-
O diâmetro do menor círculo que circunscreve o contorno do floco projetado.		-
O diâmetro do maior círculo que se encaixa dentro do contorno do floco projetado		-

Fonte: Adaptada de Jarvis (2005), apud Dharmarajah e Cleasby (1986) e Allen (1997).

Nenhum método de dimensionamento de partículas é perfeito para medir o tamanho do floco, cada técnica tem suas vantagens e desvantagens. Os requisitos exigentes para a preparação da amostra e transferência de flocos indicam que a microscopia não é a técnica mais adequada para encontrar o tamanho do floco.

A fotografia, por sua vez, proporciona uma melhoria considerável na medida em que os flocos não necessitam serem removidos do recipiente de floculação, mas são necessárias imagens de elevada qualidade para uma análise de imagem precisa. Já, os instrumentos de detecção de partículas não

são ideais devido aos problemas associados com apenas a capacidade de medir faixas estreitas de tamanho. A Tabela 3 apresenta alguns métodos empregados para medir o tamanho dos flocos, os quais serão explicados posteriormente.

Tabela 3. Métodos utilizados para obter tamanho do floco

Método de medição do floco	Características
Microscopia	Flocos estáticos
	Flocos dinâmicos
	Em suspensão
Análise de imagem	Em condição turbulenta
	Em condição laminar
Dispersão da luz	Pela frente/atrás do floco
Luz transmitida	Pela suspensão dos flocos
Sensores de partículas individuais	Detecção óptica
	Detecção elétrica

Fonte: Jarvis, 2005.

Microscopia: a microscopia tem sido utilizada há décadas como método para dimensionamento e contagem dos flocos (Droppo et al., 1996), antes do advento da análise de imagem obter dados confiáveis de tamanho de flocos era trabalhoso e altamente dependente da habilidade do microscopista. Entretanto, a microscopia ainda hoje é aplicada para medir o tamanho de partículas (Aguillar et al., 2003).

Para este método, é necessário que a sub amostra a ser investigada possua uma seleção não tendenciosa e uma quantidade representativa dos flocos. O tamanho do agregado é estimado por referência a uma escala de tamanho conhecido.

Na maioria dos casos, a colocação cuidadosa de uma pequena amostra da suspensão numa lâmina ou numa célula de medição é adequada para a análise do tamanho de partícula sob um microscópio (Wang e Gregory, 2002). No entanto, esta abordagem pode vir a alterar os flocos devido à compressão.

Como os flocos devem ser analisados *ex situ*, a microscopia exige métodos de extração e preparação dos agregados para estes serem dimensionados. Como o tubo de imersão (Farrow e Warren (1993), o uso de pipetas (Spicer and Pratsinis, 1996), a solução de agar (Cousin e Ganczarczyk, 1998) e o tubo de amostragem (Wang e Gregory, 2002).

A microscopia tem a vantagem de analisar partículas individualmente e com alta ampliação, permitindo assim o estudo da estrutura de cada agregado. Em muitas aplicações, a microscopia é o único método disponível para encontrar os valores relativos a porosidade e formas dos flocos. Além disso, a microscopia é um método relativamente barato. Todavia, há limitações em relação a profundidades na lâmina, além do alto investimento de tempo e esforço para obtenção de uma distribuição estatisticamente significativa (Allen, 1997).

Análise de imagem: análise de imagem é a manipulação de informações contidas dentro de uma imagem transformando-as em dados. A análise de imagem geralmente requer processamento de imagem que é a conversão de uma imagem em outra, isto é realizado para aperfeiçoar a qualidade da imagem para análise. Por exemplo, se uma imagem não tiver um contraste bem definido entre o objeto e o fundo, uma partícula pode ser dimensionada incorretamente devido a um limite desfocado entre os dois (Chakraborti et al., 2000).

Os estágios básicos são: captura da imagem, digitalização da imagem, melhoria da imagem, análise de dados e a extração dos dados. Já, os principais componentes de um moderno sistema de análise de imagem são uma câmera de dispositivo de acoplamento estreito ou câmera digital; um computador; e um software capaz de processar e analisar a imagem.

O advento da fotografia e da análise de imagem permitiu medições mais rápidas de um número quase inesgotável de diferentes medidas de tamanho de flocos, a serem realizados em uma amostra quando esta é comparada com a tradicional microscopia (Wang e Gregory, 2002).

Dispersão da luz: a medida que a luz atravessa uma suspensão de partículas, parte da luz é absorvida pelas partículas enquanto outra é dispersa. O resto da luz passa diretamente através da suspensão. A forma como a suspensão faz isto depende do tamanho das partículas e também da natureza das partículas e do meio de suspensão (Farrow e Warren, 1993). Em técnicas de dimensionamento de partículas de dispersão de luz, o padrão de dispersão medido de um laser aplicado é comparado com o padrão de dispersão previsto em um modelo óptico, gerando um tamanho de partícula (Selomulya et al., 2001).

A teoria de Lorenz-Mie é o modelo clássico para determinar o diâmetro de partícula a partir da dispersão de luz. É a base para todos os instrumentos de dimensionamento de partículas (Black et al., 1996). A equação para a teoria de Lorenz-Mie é:

$$x = \frac{\pi m d}{\lambda}$$

Eq. 1

Onde x é o parâmetro fundamental para a dispersão da luz; d é o diâmetro da partícula; m é o índice de refração das partículas e λ é o comprimento de onda do laser de entrada.

O modelo assume que as partículas são esféricas, o laser ilumina as partículas uniformemente e os raios laser são ondas de luz planas.

Luz transmitida: outra técnica aplicada para monitorar o tamanho do floco é o analisador fotométrico de dispersão. Este equipamento fornece uma medição combinada do tamanho de partícula e frequência para sua suspensão de floclação. O dispositivo é constituído por uma fonte de luz, um detector e um equipamento de processamento que monitoram as flutuações de turbidez na amostra. Especificamente, este mede a luz média transmitida através de uma suspensão e o valor da raiz do quadrático médio do componente flutuante

(Gregory e Dupont, 2001). A proporção entre os dois fornece o índice de flocculação, que dá uma boa agregação.

O analisador fotométrico de dispersão mostra mudanças relativas no tamanho do floco, tal como durante as fases de crescimento e quebra de flocos e proporciona comparações qualitativas entre diferentes variáveis. Ao contrário de algumas das outras técnicas de dimensionamento, este método não informa distribuições de tamanho de flocos e se faz necessária uma elevada concentração para proporcionar um sinal fiável.

Sensores de partículas individuais: os sensores de partículas individuais medem partículas solitárias quando estas passam através de uma abertura em um campo elétrico (sensor elétrico) ou através de um feixe de luz (sensor óptico). Em ambas técnicas, a maior fonte de problemas para o dimensionamento de partículas provém da separação de agregados de flocos à medida que passam através da abertura da célula de medição.

No método do campo elétrico, as partículas são suspensas em uma solução de eletrólito e passadas através de um campo elétrico. A alteração na resistência causada pela partícula é proporcional ao tamanho de partícula com um pequeno fator de correção (Farrow e Warren, 1993). O contador Coulter é a técnica de detecção elétrica mais comum. Leentvaar e Rebhun (1983) descrevem que o contador de Coulter subestima significativamente o tamanho do floco quando comparado com a análise óptica, pois mede apenas o volume do sólido no floco e não o volume efetivo do floco incluindo poros e água.

Os métodos de detecção óptica medem partículas de tamanho inferiores a 10 μm . A quantidade de luz atenuada pelas partículas quando elas atravessam um feixe de luz é proporcional ao tamanho de partícula. Contudo, este método é limitado pela necessidade de uma baixa concentração de partículas para uma medição precisa.

2.2.3.2 Resistência dos flocos

Para que o processo de separação sólido-líquido de partículas agregadas seja eficiente o estudo do parâmetro que avalia a resistência do floco é importante. Os sistemas de tratamento de águas e efluentes são projetados para minimizar a quebra dos flocos, no entanto, muitas vezes ocorrem regiões de alto cisalhamento, expondo os flocos a elevadas tensões (McCurdy et al., 2004).

A resistência do floco é dependente das ligações inter-partículas entre os componentes do agregado, incluindo a força e o número de ligações simples dentro do floco (Bache et al., 1997). Portanto, um floco sofrerá uma ruptura se as forças cisalhantes forem maiores do que sua resistência (Boller e Blaser, 1998).

Pesquisas voltadas para o desenvolvimento de técnicas para quantificar a resistência dos flocos têm encontrado dificuldades devido à complexidade inerente, fragilidade, variação no tamanho, forma e composição dos flocos. Na literatura são relatados dois tipos de ruptura dos flocos: erosão superficial e fragmentação em grande escala (Parker et al, 1972. Francois, 1987; Yeung e Pelton, 1996; Mikkelsen e Keiding, 2002), .

Erosão superficial é a remoção de pequenas partículas a partir da superfície do floco, através de uma tensão de cisalhamento que age tangencialmente. A fragmentação em grande escala é a ruptura do floco em pedaços com tamanhos similares, próximo ao tamanho inicial, e ocorre a partir da tensão de tração em todo o floco (Figura 4).

De acordo com Zhang et al. (1999) em termos gerais a resistência do floco pode ser considerada como a energia necessária para romper o floco sob tração, cisalhamento ou compressão. Não há registro na literatura de ensaios normalizados para estabelecer a resistência do floco, todavia há diferentes técnicas aplicadas para sua avaliação.

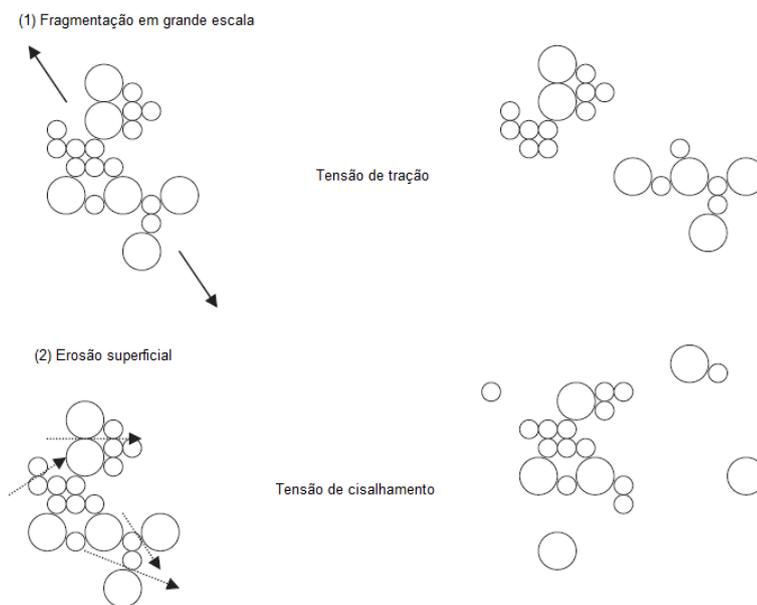


Figura 4. Mecanismos propostos para a quebra de flocos sob diferentes condições. Fonte: Jarvis et al., 2005.

Dois abordagens têm sido realizadas para avaliar a resistência dos flocos, uma macroscópica e outra microscópica. A primeira é voltada para a energia necessária a ruptura dos flocos e a segunda analisa a força dos flocos individualmente. A Tabela 4 apresenta uma revisão das técnicas para medir a resistência do floco.

Macroscopicamente há três técnicas: impulsor, ultrassom e o misturador *Multigrad*. A técnica do impulsor consiste em expor o floco a distintos níveis de tensões de cisalhamento em um recipiente, e compara o tamanho do floco antes e após sua ruptura. Também é possível medir a entrada de energia até a quebra dos flocos (Fitzpatrick et al, 2003). O ultrassom corresponde a aplicação de um campo de ultrassom pré-estabelecido a uma suspensão de flocos e observar sua erosão (Chu et al., 2001). O misturador consiste em flocos alocados em uma coluna vibratória sujeita a quantidades variáveis de oscilação, e em seguida a vibração é convertida em uma entrada de energia para o sistema (Bache et al., 1999).

As técnicas microscópicas podem ser divididas em micromecânica e micromanipulação. A micromecânica ocorre através da força necessária para quebrar e separar um único floco por tração (Figura 5) (Yeung e Pelton, 1996). A micromanipulação é a compressão de um único agregado em suspensão entre uma lâmina de vidro e uma sonda de fibra óptica, até ruptura dos flocos utilizando um transdutor de força (Figura 6) (Zhang et al., 1999).

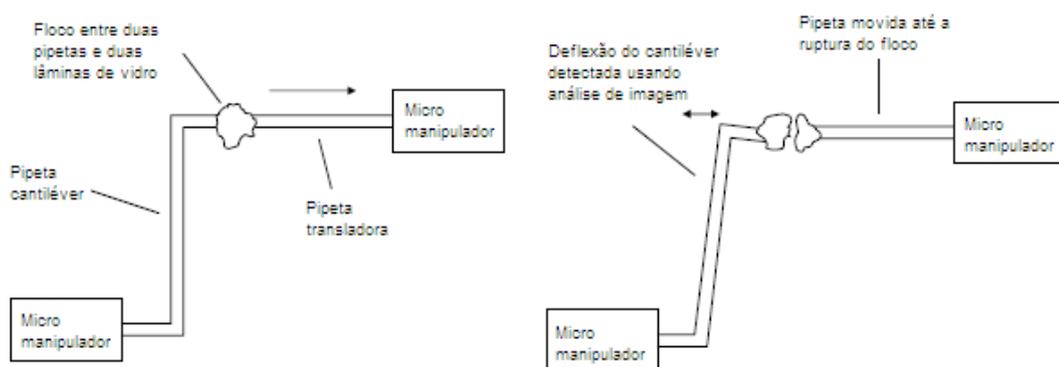


Figura 5. Uma visão esquemática da técnica micromecânica. Fonte: Adaptada de Jarvis et al., 2005.

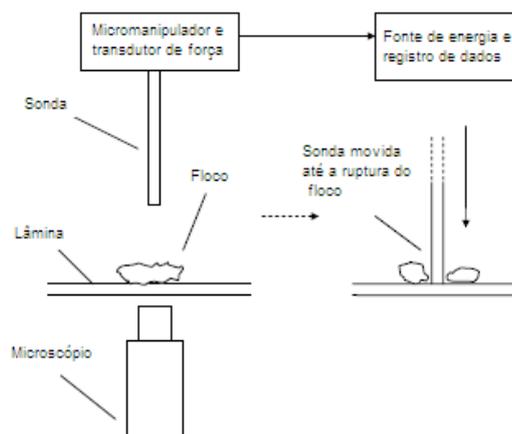


Figura 6. Uma visão esquemática da técnica micromanipulação. Fonte: Adaptada de Jarvis et al., 2005.

Tabela 4. Revisão das técnicas usadas para determinar a resistência do floco.

Técnica de resistência dos flocos	Descrição	Equação
Técnicas macroscópicas	Exposição de flocos a um único nível de alto cisalhamento dentro de um recipiente e comparação do tamanho do floco antes e depois da ruptura.	$\text{Strength factor} = \frac{d(2)}{d(1)} \times 100$ <p>Onde d(1) é o tamanho médio do floco antes da ruptura e d(2) é o tamanho do floco após a quebra.</p>
	Impulsor	$\log d_{\max} = \log C - \gamma \log G$ <p>Onde d_{max} é o diâmetro máximo do floco, C é o coeficiente da força do floco; G é o gradiente de velocidade médio e γ é a constante de tamanho de flocos estáveis. Um gráfico em relação ao tamanho máximo do floco e ao gradiente de velocidade médio proporciona um indicativo da resistência do floco e do modo de ruptura.</p>
	Ultrassom	$\frac{\delta}{\phi} = \frac{-0.78k^{0.5} \Delta \tau}{d_{f_0}^{-D/3} D \frac{dy}{dj} \Big _{j \rightarrow 0}}$ <p>Onde δ é a força de ligação do floco; φ é a potência do campo ultrassônico por volume e tempo; Δ é o tempo ultrassônico; d_{f0} é o tamanho do floco antes e após a sonificação; k é a constante de proporcionalidade; d_f^{2D/3D} é a dimensão fractal do floco e j é o tempo da ultrasonificação.</p>
Multigrid	Exposição dos flocos a tensões hidrodinâmicas a partir de um misturador oscilatório controlável. Colocação dos flocos em uma coluna vibratória, na qual estão sujeitos a variações de oscilação. A vibração é convertida em uma entrada de energia para o sistema.	$\sigma \approx \frac{\rho_w \varepsilon^{3/4} d^{1/3}}{\nu^{1/4}}$ <p>Onde σ é a resistência do floco; P_w é a densidade da água; ε é a dissipação da energia no momento da ruptura do floco; e d é o diâmetro do floco.</p>
Técnicas microscópicas	Micromecânica	$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi}{4} d^2}$ <p>Onde σ é a resistência do floco; d é o diâmetro do floco; e F é a força de ruptura do floco.</p> $F = C_s D,$ <p>Onde F é a força de ruptura do floco; C_s é a rigidez; e D é a deflexão.</p>

Micromanipulação	A compressão de um único floco em uma lâmina de vidro e uma sonda de fibra óptica até quebra do floco usando um transdutor de força.	$F = K(W_0 - W)$ Onde F é a força de ruptura dos flocos; K é a sensibilidade do transdutor de força; W é a saída de tensão e W ₀ é a tensão de linha de base do transdutor de força.
------------------	--	---

Fonte: Jarvis et al., 2005.

2.2.4 Coagulação, floculação e microalgas

Como dito anteriormente a coagulação e floculação são aplicadas para a remoção de sólidos suspensos, partículas de diâmetro maior ou igual a 1,2 µm, assim sendo as microalgas estão incluídas nesta classificação. A aplicação da coagulação e floculação é necessária devido ao grande volume de culturas de microalgas que devem ser processadas e a necessidade de um método universal que possa ser aplicável às distintas espécies (Uduman et al, 2010).

A floculação química pode ser usada com confiabilidade para remover pequenas algas (<5 µm) do efluente através da formação de grandes flocos (1-5 mm)(Sharma et al.,2006). Diversas espécies de algas, como *Scenedesmus sp.*, *Micractinium sp.*, *Actinastrum sp.*, *Pediastrum sp.*, *Dictyosphaerium sp.*, *Coelastrum sp.*, que predominam em sistemas de lagoas de alta taxa alimentadas por águas residuárias podem formar grandes colônias (50-200 µm) a partir da bio-floculação (Benemann, 1996; Park e Craggs, 2010; Craggs et al, 2010).

A eficiência de remoção de biomassa algal é essencial para o tratamento de águas residuais que atendam padrões de alta qualidade e também para a produção rentável de biocombustível (Benemann, 2008; Van Harmelen e Oonk, 2006).

Dentre as dificuldades para a extração das microalgas destaca-se o seu tamanho (<20 µm); densidade semelhante à da água (1,08 - 1,13 g/mL); forte carga negativa na superfície da célula, intensificada devido ao crescimento exponencial; reações químicas altamente sensíveis ao pH; e necessidade de doses elevadas de floculantes que podem gerar grandes quantidades de resíduos no lodo. (Lavoie e de la Noue, 1987; Moraine et al., 1979).

2.3 FLOTAÇÃO

Primeiramente o processo de flotação foi empregado no beneficiamento de minérios. Entretanto, este método tem provado sua eficiência em muitas áreas, dentre elas destaca-se o tratamento de efluentes industriais, já que é um processo imprescindível na remoção de óleos emulsificados de efluentes oriundos de refinaria de petróleo, indústria petroquímica, alimentícia e metal-mecânica (Bennett, 1988). Recentemente, também tem se mostrado eficaz no tratamento de águas e efluentes sanitários (Edzwald e Haarhoff, 2011).

Segundo Bennett (1988) o processo de flotação consiste das seguintes etapas:

1. Geração das bolhas de gás no interior do efluente;
2. Colisão entre as bolhas de gás e as partículas;
3. Adesão das bolhas de gás as partículas;
4. Ascensão dos agregados bolha-partícula até a superfície.

A probabilidade de flotação (P) dependerá de três eventos sucessivos, probabilidade de colisão bolha-partícula (P_c); probabilidade de adesão bolha-partícula (P_a) e probabilidade de formação de agregado estável bolha-partícula (P_s), onde:

$$P = P_c \times P_a \times P_s \quad \text{Eq. 2}$$

A separação de partículas por flotação obedece às mesmas leis de sedimentação, porém em um “campo de força reverso”. A velocidade de ascensão do agregado bolha-partícula obedece a Lei de Stokes:

$$V_t = \frac{gD^2(\rho_a - \rho_o)}{18\mu} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

V_t - Velocidade terminal de ascensão do agregado bolha-partícula (m/s);

g - Aceleração gravitacional (9,80 m/s²);

D - Diâmetro efetivo do agregado bolha-partícula (m);

ρ_a - densidade de fase contínua (kg/m³);

ρ_o - densidade do agregado bolha-partícula (kg/m³);

μ - viscosidade da fase contínua (kg/(m.s)).

Os processos de flotação podem ser classificados de acordo com o método de geração de bolhas em: flotação eletrolítica; flotação a vácuo; *Sparger flotation*; flotação por gás dissolvido (FGD) e flotação por gás induzido (FGI). Entre estes sistemas, todos são usados industrialmente, com exceção da flotação a vácuo. Há uma predominância dos processos de FGD e FGI.

2.3.1 Flotação eletrolítica

Neste método microbolhas (de hidrogênio e oxigênio) são geradas pela dissociação eletrolítica da água (Hosnv, 1992). Ou seja, as bolhas são geradas pela eletrólise da água que flui entre dois eletrodos, sendo reduzida para hidrogênio no cátodo e oxidada em oxigênio no ânodo. A vantagem da flotação eletrolítica é a formação de pequenas bolhas, que variam de tamanho na ordem de 20 a 40 μ m (Burns et al., 1997).

A flotação eletrolítica é aplicada para estações de tratamento de esgoto de pequenos municípios (Gregory e Edzwal, 2010). Além de ser utilizada em tratamentos de resíduos animais, efluentes de indústrias têxteis e efluentes industriais contendo emulsões e metais pesados (Edzwald e Haarhoff, 2011).

2.3.2 *Sparger flotation*

O gás é diretamente injetado no fluido por meio de um *sparger*. Normalmente são placas ou cilindros porosos de metal, vidro, materiais cerâmicos ou polímeros orgânicos.

2.3.3 Flotação por ar induzido

Este método de geração de bolhas consiste em introduzir o ar ou outro gás diretamente na célula de flotação. A flotação por ar induzido tem como base o princípio da adesão de algum material às bolhas de ar, podendo ocorrer por mecanismos de arraste ou colisão bolha-partícula. As bolhas de ar são formadas pelo cisalhamento do ar devido à diferença de pressão utilizando diferentes dispositivos aeradores (Rodrigues, 1999). Este processo atinge grandes tamanhos médios de bolhas geradas, em torno de 500 - 3000 μm (Matis e Zouboulis. 1995).

As principais vantagens do sistema de flotação por ar induzido consistem em tamanho compacto do sistema; baixo custo operacional e boa capacidade de remoção de óleos livres e sólidos suspensos. Entre as desvantagens, encontram-se os equipamentos para a pressurização do sistema e a dependência da eficiência baseada no regime hidráulico e tipo de floco formado.

2.3.4 Flotação por ar dissolvido

O processo de flotação por gás dissolvido (FGD) refere-se à flotação realizada na presença de gás dissolvido, como fonte geradora de bolhas. Na prática, qualquer gás pode ser utilizado, mas devido ao custo, o ar é comumente usado em grande parte das aplicações industriais. Assim, a flotação por gás dissolvido é denominada mais especificamente como flotação por ar dissolvido (FAD).

O processo de FGD caracteriza-se pela produção de um elevado número de microbolhas, com diâmetro entre 10 - 100 μm . Em um saturador sob pressão (300 – 600 kPa) o ar é dissolvido em água e quando esta água saturada com gás é injetada, à pressão atmosférica na câmara de flotação, o gás em excesso é liberado em forma de microbolhas, as quais aderem à fase em suspensão promovendo a sua flotação (Rodrigues, 2004).

A FAD é amplamente aproveitada em diversos setores industriais, tais como as indústrias de papel e processamentos alimentícios, petroquímicas, unidades de tratamento de água potável e sistemas de espessamento de lodos (Bratby e Marais, 1977, Solari, 1981). Entre as diversas aplicações, destacam-se a remoção de sólidos, íons, precipitados, macromoléculas, microrganismos, tintas, fibras, óleos e outros materiais da água, além da redução da demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

As três etapas fundamentais em um sistema FAD são:

1. Dissolução do ar na água;
2. Redução da pressão com formação de microbolhas;
3. Adesão bolha-partícula.

2.3.4.1 Dissolução do gás

Esta etapa controla a disponibilidade de gás na flotação. Como dito anteriormente, o ar é usualmente utilizado no processo. Entretanto, outros gases como o CO₂, N₂ e CH₄ tem sido testados (Bennett, 1988). A escolha do gás dependerá das características do efluente a ser tratado e do destino da água tratada e do gás liberado. O uso do ar também aumenta o conteúdo de oxigênio do efluente (Ellis e Fischer, 1973).

A quantidade teórica de gás que pode ser dissolvida na água é determinada pela lei de Henry, a qual estabelece que a solubilidade de um gás em um líquido é proporcional à pressão parcial do gás. Assim, a quantidade teórica de ar disponível para flotação quando a água saturada com ar a uma pressão nominal P é injetada na câmara de flotação, a pressão atmosférica, é dada pela seguinte equação:

$$V_a = K P_{sat}$$

Eq. 4

onde:

V_a - Volume teórico de ar disponível para flotação por litro de água saturada;

K - Constante de Henry, a qual expressa a solubilidade do gás por litro de água à pressão atmosférica em função da temperatura;

P_{sat} - Pressão de saturação.

Os sistemas de dissolução não são 100% eficientes, de modo que um fator que expresse a eficiência de saturação (f) é normalmente inserido na Equação 4. A eficiência de um saturador é medida em relação ao valor teórico predito pela Lei de Henry (Figura 7).

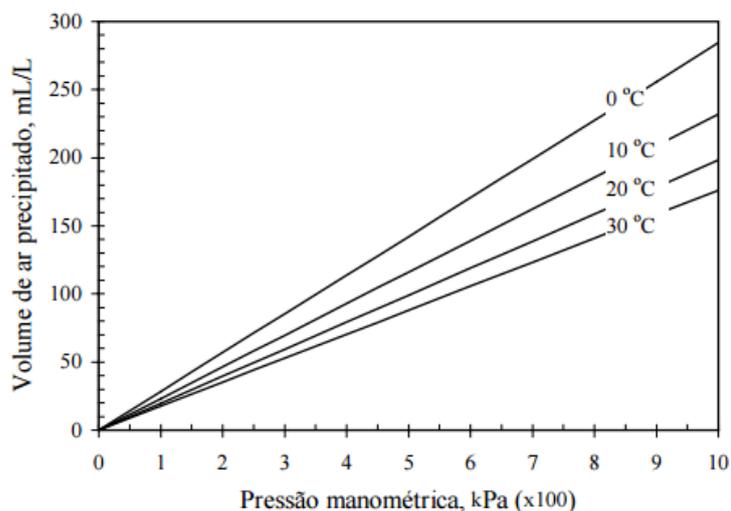


Figura 7. Valor teórico, previsto pela lei de Henry, do volume de ar precipitado por litro de água saturada em função da pressão e da temperatura. Fonte: Rodrigues, 1999 (vide Apêndice I).

Os sistemas de flotação por gás dissolvido são compostos pelas seguintes unidades: bomba pressurizadora, sistema de injeção de gás, vaso saturador, válvula despressurizadora, vaso de flotação e sistema de adição de reagentes. Diversos tipos de saturadores são empregados em unidades de

FGD, entre os quais os mais empregados são: saturadores com sistemas de difusão do gás (borbulhamento); saturadores com sistema de injeção de gás na sucção da bomba pressurizadora; e, saturadores com leito de percolação.

De acordo com Rodrigues (1999), a eficiência de saturação para sistemas que empregam métodos de difusão do gás dentro do saturador é dependente da vazão de gás injetado e do tempo de retenção da água no saturador. Normalmente valores próximos do teórico são alcançados para tempos de retenção maiores que 30 minutos e vazões de gás acima de 50 L/min.

No sistema de injeção de gás na sucção da bomba pressurizadora, o gás é imediatamente misturado com a água pela ação cisalhante do rotor. A mistura gás/água passa pelo vaso saturador o tempo necessário para dissolução. Com este método somente cerca de 25% do gás necessário para saturação é injetado devido ao risco de cavitação. A saturação completa pode ser alcançada pela injeção de mais gás após a bomba ou difusão no saturador.

O método que apresenta melhor desempenho é o do sistema de leito de percolação (*packed saturators*). Neste sistema utiliza-se um leito de percolação através do qual a água percola a uma atmosfera mantida à pressão de saturação. O gás é introduzido no topo do saturador a uma vazão suficiente para repor o que foi dissolvido.

Solari (1981) classifica os processos FAD segundo o modo de compressão do efluente em:

[1] Sistema de compressão total do efluente: todo efluente é pressurizado e saturado com gás. Este modo requer pressões menores de saturação, pois a probabilidade de adesão bolha-partícula é maximizada. Por outro lado, não é aconselhado nos casos em que o efluente precisa de uma etapa de pré-floculação devido ao rompimento dos flocos causado pelo efeito cisalhante da bomba e válvula controladora de pressão (Figura 8).

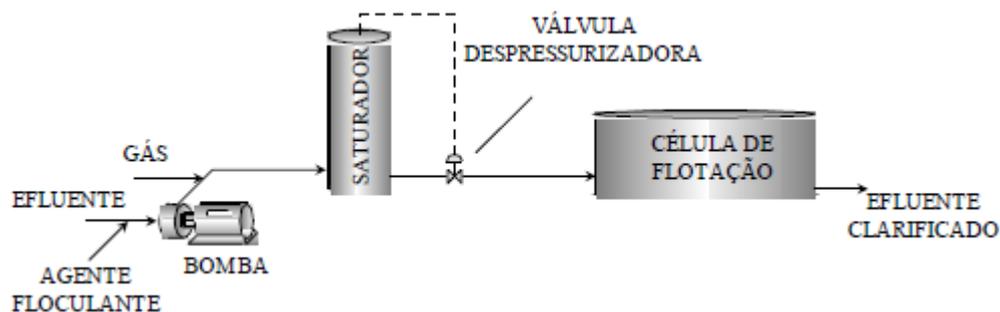


Figura 8. Compressão total do efluente na FGD. Fonte: Adaptada de Rodrigues ,1999.

[2] Sistema de compressão parcial do efluente: parte do efluente é direcionada para o sistema de pressurização para saturação com gás. As vantagens desse modo, quando comparado ao anterior, são a redução do custo de bombeamento (para saturação), menor suscetibilidade a variações do fluxo e menor ruptura dos flocos (Figura 9).

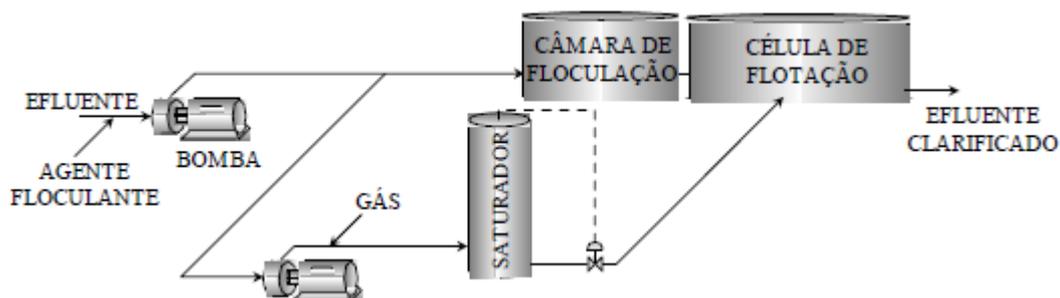


Figura 9. Compressão parcial do efluente na FGD. Fonte: Adaptada de Rodrigues ,1999.

[3] Sistema de compressão parcial do efluente clarificado: este sistema evita a ruptura de flocos, porém acarreta em aumento da carga hidráulica, necessitando de uma célula de flotação com maior capacidade. Normalmente, o efluente reciclado constitui de 20% a 50% do efluente total alimentado à célula (Figura 10) (Alkhatib e Thiem, 1991).

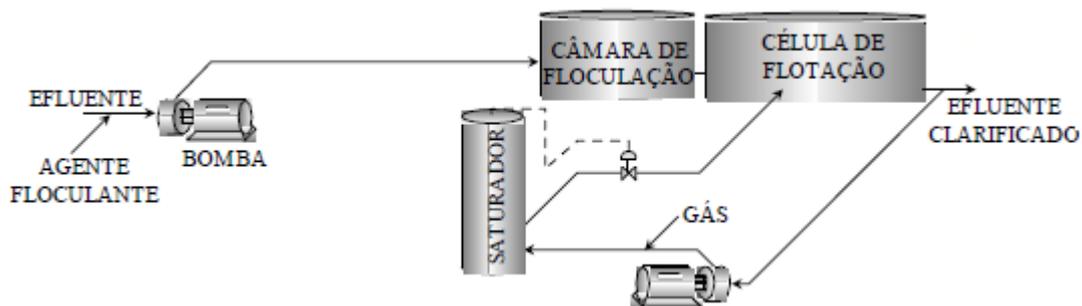


Figura 10. Compressão do efluente clarificado na FGD. Fonte: Adaptada de Rodrigues 1999.

2.3.4.2 Redução da pressão e a formação de microbolhas

O volume de ar que pode precipitar por volume de água saturada depende praticamente de três fatores:

1. A eficiência de saturação (correlacionada principalmente ao modelo do saturador);
2. A composição do ar no saturador. Pois, devido ao aumento da pressão parcial do nitrogênio no ar a quantidade teórica de ar que pode ser dissolvida é reduzida em cerca de 9%;
3. A eficiência da liberação do ar.

Na FGD a formação de microbolhas é o resultado da cavitação da água saturada com gás a altas pressões quando ocorre a brusca queda de pressão no estreitamento no dispositivo redutor de pressão. O desenho do dispositivo de redução de pressão é um fator crítico na formação das bolhas. Industrialmente encontram-se dispositivos tais como válvulas; bicos ou estreitamentos; e, placas de orifícios simples ou multiperfuradas. O objetivo destes dispositivos é aumentar a velocidade do fluxo e iniciar a cavitação seguida da nucleação de bolhas.

O número e tamanho das bolhas formadas em um determinado volume de água ocorre em função das características físicas do sistema (pressão de saturação, temperatura, tipo de válvula) e das características químicas do efluente (tensão superficial e presença de eletrólitos). Bennett (1988), em estudos de FAD, reportou que a diminuição da tensão superficial resulta na precipitação de bolhas com diâmetros menores. Após a pressão ser reduzida na constrição, as cavidades formadas necessitam de tempo para atingir o tamanho de microbolhas. O regime de fluxo após a constrição é fator crítico no crescimento e no tamanho final da bolha, tubulações longas após a constrição permitem a coalescência das bolhas.

O processo de formação de bolhas envolve duas etapas: nucleação e crescimento (Rikaart, 1995). Os mecanismos responsáveis pela formação das microbolhas ainda não estão bem compreendidos. O fenômeno de “precipitação” do gás dissolvido com formação de bolhas é freqüentemente chamado cavitação num amplo sentido da palavra, isto é, formação de “buracos” (cavidades) no meio líquido, ou seja, vazios preenchidos de gás e/ou vapor. Pode ser chamado também de nucleação de bolhas, embora este termo seja referido ao primeiro estágio da cavitação, isto é, a criação ou “nascimento” das cavidades.

Em outras palavras, cavitação/nucleação é o processo pelo qual a estrutura líquida é rompida para formar um “buraco” por meio de forças externas. É evidente que qualquer ruptura inicia em um local de “fraqueza” onde as forças intermoleculares momentaneamente se aproximam de zero.

A nucleação pode ser explicada com base na Lei de Henry, que mostra que a quantidade de gás dissolvido em uma determinada quantidade de água a temperatura constante é proporcional a pressão parcial do gás. Quando uma solução aquosa é sujeitada a pressão de um gás, mais e mais moléculas do gás são dissolvidas na água com o aumento da pressão.

Estudos do crescimento e nucleação de bolhas reportados por Takahashi et al. (1979), mostraram que a energia mínima a ser transferida para

fase líquida para formar bolhas pelo fenômeno da cavitação (surgida da turbulência do líquido) é dada pela seguinte equação:

$$x = \frac{\frac{16}{3} \pi \gamma^3}{(P_o - P_a)^3}$$

Eq. 5

Onde:

γ - Tensão interfacial ar/água (mN/m);

P_a - Pressão Atmosférica (atm);

P_o - Pressão de Saturação (atm).

A equação mostra que a energia a ser transferida para formar as microbolhas será menor quando a tensão interfacial ar/líquido for menor e a diferença de pressão da fase líquida maior com respeito a tensão atmosférica.

Segundo Féris (1999), a otimização no estágio de geração de bolhas diminuindo a tensão superficial com o uso de um surfactante (coletor) no saturador, torna viável a FAD (com alta eficiência) a baixas pressões (cerca de 2 atmosferas).

2.3.4.3 Adesão bolha-partícula

Segundo Solari (1981), os dois principais mecanismos propostos para formação dos agregados bolha-partícula na flotação são o encontro direto entre partículas e bolhas (colisão + adesão) e a precipitação de gás da solução na superfície das partículas. Estes dois mecanismos ocorrem em diferentes proporções, dependendo das condições em que é realizado o processo de flotação.

Para o caso em que gás é forçado no sistema de flotação (como nas células convencionais) é sugerida a hipótese do encontro direto como o mecanismo predominante, embora alguns autores (Zhou et al., 1996 e 1997; Stearnes, 2001) registrem que a precipitação de gás na superfície das partículas desempenhe um papel importante.

O mecanismo de adesão bolha-partícula no processo de FAD tem sido bastante discutido na literatura. De acordo com Leech (1987), os materiais suspensos em meio aquoso podem aderir as bolhas de gás pelos mecanismos apresentados na Figura 11.

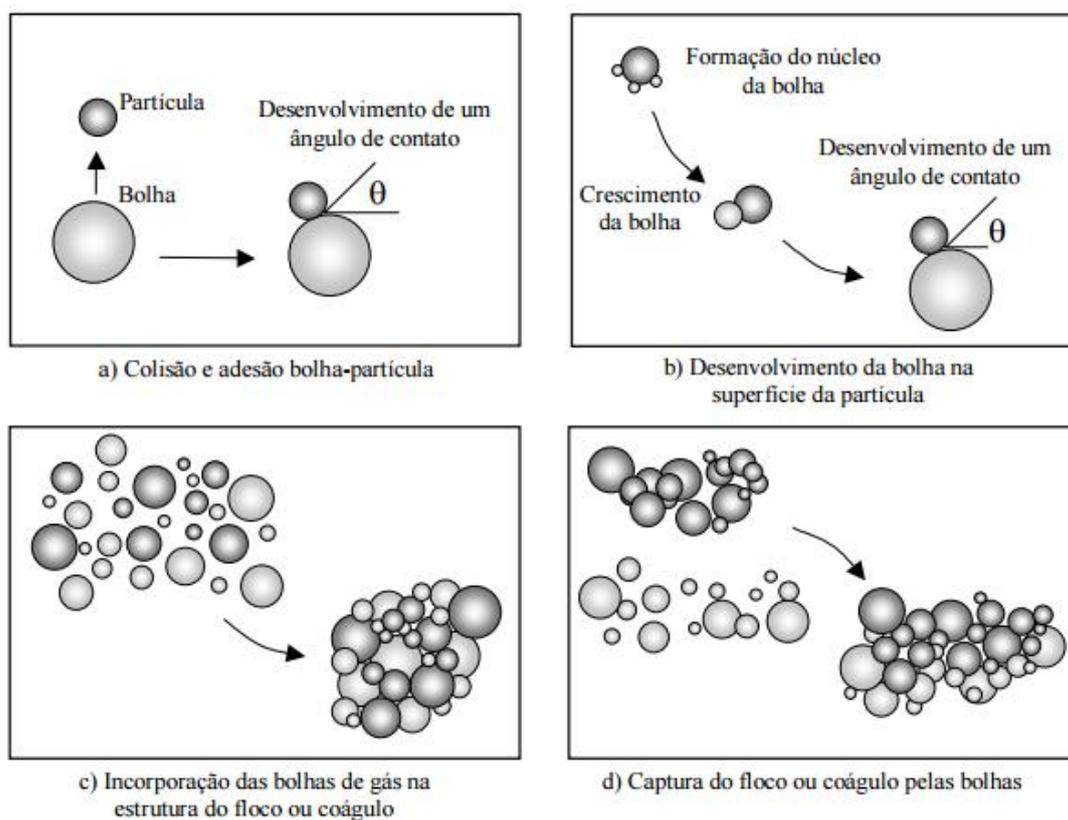


Figura 11. Mecanismos responsáveis pela adesão microbolha-partícula na FAD. Fonte: Rodrigues, 2004.

Em ambos os mecanismos (a) e (b) um sistema trifásico é constituído, caracterizado pela tensão superficial e um ângulo de contato. É comum na prática industrial adicionar agentes como coletores, coagulantes e floculantes nos processos de FAD para aumentar a eficiência de separação. Uma vez que o aumento da hidrofobicidade e da agregação leva a um aumento na probabilidade de colisão bolha-partícula, incrementa a cinética de flotação e aumenta a eficiência da utilização do ar. Os mecanismos (c) e (d) ocorrem independentes das características superficiais da fase dispersa, mas dependentes das características físicas da estrutura do floco. Na inclusão de bolhas de ar dentro dos flocos as forças de adesão não são importantes, porque as bolhas estão incluídas na estrutura do floco. A ocorrência deste mecanismo será mais acentuada se os flocos forem maiores e possuírem uma forma mais irregular. A captura de flocos por bolhas a adesão pode ser efetuada porque o floco serve como núcleo na formação da bolha ou pela interação bolha-floco.

2.3.5 Diferenças entre FAD e FAI

A diferença fundamental entre os sistema de FAD e FAI é o mecanismo no qual as bolhas de ar são introduzidas no líquido. No sistema FAI padrão, o impulsor, girando a alta velocidade, induz uma grande quantidade de ar na suspensão, produzindo bolhas de um tamanho maior que as produzidas na FAD. No sistema FAD, as bolhas são geradas pela supersaturação de ar na água (Cadorin. 2008).

Segundo Solari (1981), o pequeno tamanho das bolhas produzidas na flotação por gás dissolvido (FGD) é a principal vantagem no tratamento de efluentes com respeito aos processos de flotação que utilizam geração mecânica de bolhas. A Tabela 5 apresenta uma comparação entre o tamanho das bolhas nos processos de FGD e flotação por gás induzido (FGI).

Tabela 5. Comparação do tamanho das bolhas geradas nos processos de flotação por gás induzido e gás dissolvido.

Parâmetro	Método de geração de bolhas	
	Gás induzido	Gás dissolvido
Diâmetro médio de bolhas, μm	170	75
Velocidade de ascensão média das bolhas, cm/s	1,5	0,1
Número de bolhas/ cm^3	$0,2 \times 10^6$	$3,6 \times 10^6$
Área superficial das bolhas, cm^2/cm^3	293	800

Fonte: Bennett e Peters, 1988.

Além disso, a FAI é caracterizada como um dispositivo de condições hidrodinâmicas turbulentas, baixo tempo de detenção e que emprega quantidades elevadas de ar. No sistema FAD, as condições hidrodinâmicas são pacíficas, o tempo de detenção é maior e utiliza-se um volume relativamente pequeno de ar (Rosa 2002).

Segundo Eckenfelder (2000), ainda há outra diferença, pois a quantidade de espuma é significativamente mais elevada na FAI do que em unidades de FAD. Na FAI corresponde a cerca de 3% a 7% do volume de entrada em comparação com menos de 1 % para sistemas de ar dissolvido.

2.3.6 Diferenças entre FAD e sedimentação

Reali (1991) expõe alguns benefícios da FAD em comparação a sedimentação: capacidade de arraste de parcela de substâncias voláteis caso estejam presentes na água; capacidade de oxidação de íons metálicos dissolvidos na água; produção de lodo com maior percentual de sólidos; processo compacto e de alta taxa (área reduzida); e aplicação de dosagens de coagulante e polímero menores que as empregadas na sedimentação, alcançando o mesmo desempenho de remoção.

Entretanto, apesar das diversas vantagens apresentadas, a flotação por ar dissolvido possui como desvantagem o custo relativamente elevado de

implantação e operação, tanto pela mecanização do sistema e gastos com energia elétrica como pela complexidade operacional (Aisse et al., 2001).

Edzwald e Wingler (1990) realizaram estudos comparando a eficiência da FAD com a sedimentação, aplicando alga verde (*Chlorella vulgaris*) e diatomáceas (*Cyclotella sp.*), e atingiram valores de 99-99% de remoção por FAD e 90-99% por sedimentação. Em 2007, Teixeira e Rosa, também compararam FAD a sedimentação, porém utilizando cianobactérias, e obtiveram remoção por FAD de 92-98%, enquanto a sedimentação alcançou 70-94%. Posteriormente, Gregory e Edzwald (2010), relataram eficiência de remoção de 90-99% por FAD de microalgas para varias famílias de algas em comparação com 60-90% com sedimentação.

2.3.7 Flotação e microalgas

Barroso (2015) testou a eficiência de remoção de microalgas provenientes de uma lagoa de alta taxa através da coagulação e flotação por ar dissolvido em escala piloto. Para o pH neutro e coagulante cloreto férrico, com concentrações que variaram entre 15 e 40 mg/L, encontrou uma eficiência de remoção de microalgas entre 85-90%. Já para o pH básico (9,2) a eficiência de remoção foi de 82-84%.

Para o coagulante sulfato de alumínio com concentrações entre 45 e 75mg/L os valores de remoção de microalgas encontrados foram de 73-82% para o pH neutro (7,0) e 66-78% para o pH básico (9,2). O Sulfloc 5000 foi testado com concentrações entre 40 e 65mg/L e apresentou remoções entre 62-77% no pH neutro (7,1) e 60-75% no pH básico (9,0). Barroso (2015) também aplicou o Tanfloc SG com concentrações que variaram entre 25 e 55mg/L e encontrou valores de eficiência de remoção de microalgas entre 82-92% no pH neutro (7,12) e 78-89% no pH básico (9,0).

Borges (2014) testou a separação da microalga marinha *Nannochloropsis oculata* por coagulação, floculação e flotação por ar

dissolvido. Seus resultados para os reagentes inorgânicos demonstraram que o coagulante cloreto férrico atinge melhores valores de eficiência de remoção das microalgas que o sulfato de alumínio dentro da faixa de pH 7 e 7,5. O cloreto férrico obteve eficiências de coleta maiores que 90% para concentrações acima de 100mg de FeCl_3/g de microalga enquanto o sulfato de alumínio atingiu eficiência de remoção em torno de 50%. Para a etapa de floculação, também foi testado o uso individual dos polímeros naturais orgânicos Veta Organic, Tanfloc SL e Tanfloc SG. Porém, para atingir a mesma eficiência que o coagulante cloreto férrico foi necessário o uso de 10 vezes mais reagente orgânico que inorgânico.

Por último, Borges (2014) testou a coagulação com cloreto férrico (15mg/L) e flotação com polímeros sintéticos (FO4490SH, FO4990SH e FO4800SH), seguida da flotação por ar dissolvido. Os resultados encontrados indicaram que o polímero de maior cationicidade (FO4990SH) apresentou piores eficiências de remoção (70-80%). A cationicidade intermediária (FO4490SH) apresentou melhores resultados (80-90%), porém o polímero de menor cationicidade (FO4800SH) acabou apresentando resultados levemente inferiores que o FO4800SH (80-85%).

3 EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Microalgas

As amostras de efluente contendo microalgas foram coletadas na planta experimental de águas residuárias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), localizada na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) São João Navegantes pertencente ao Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), em Porto Alegre - RS (Figura 12).

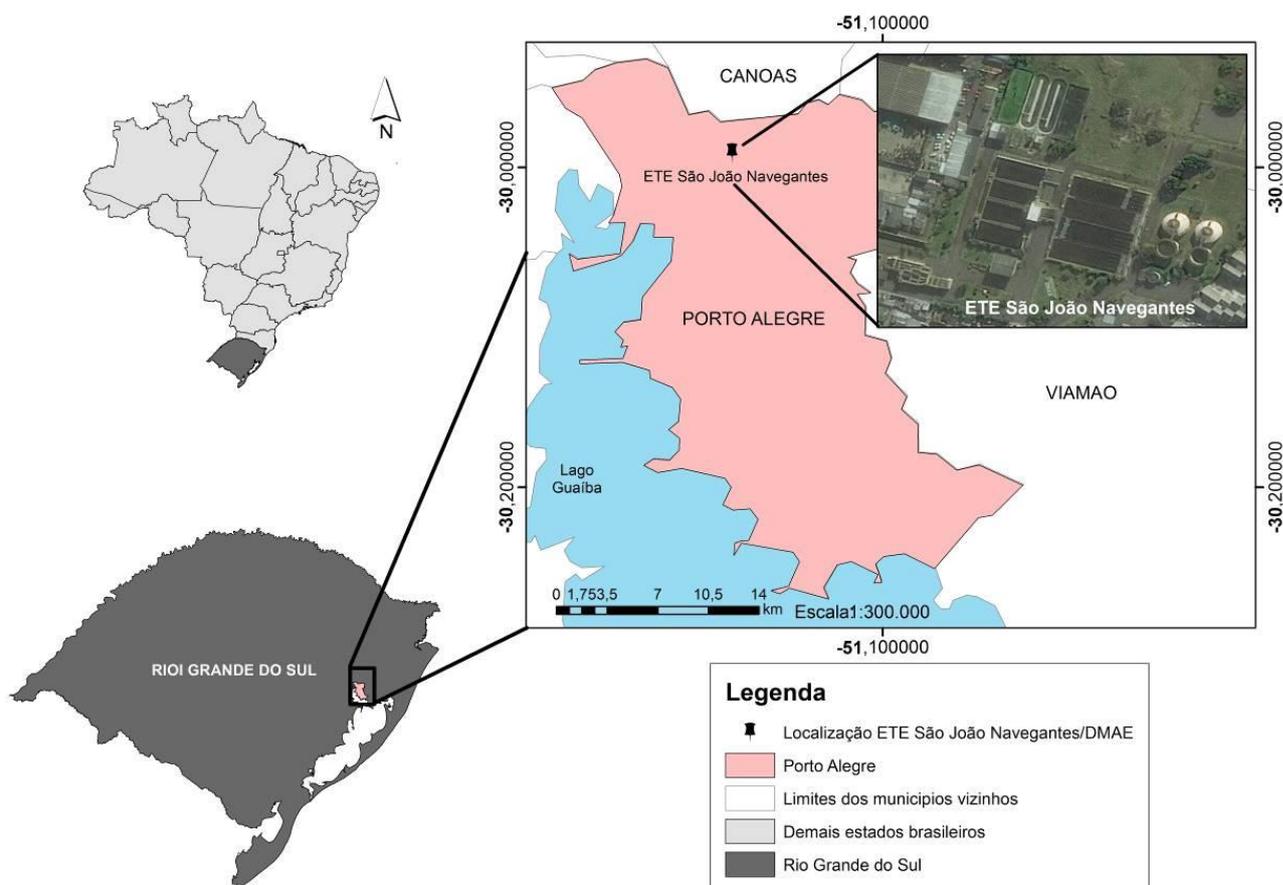


Figura 12. Localização da ETE São João Navegantes/ Dmae, Porto Alegre – RS.

A planta experimental era composta por duas lagoas de alta taxa (LAT), as quais eram alimentadas por efluente proveniente de um pré-tratamento, responsável pela remoção de sólidos e matéria orgânica através de um reator UASB (Figura 13).

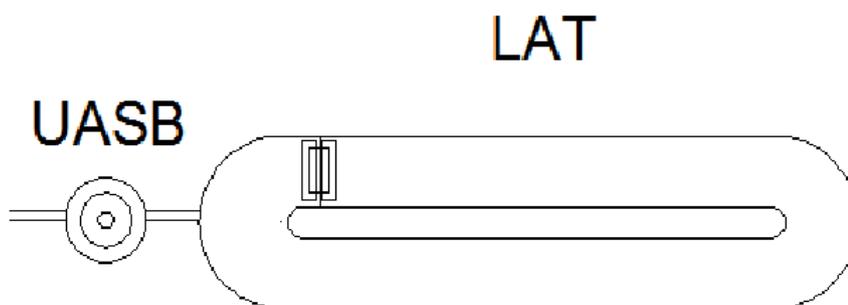


Figura 13. Representação da planta piloto. Fonte: Adaptada Barroso, 2015.

3.1.1.1 Reator UASB

De acordo com a descrição de Barroso (2015), o reator anaeróbio, construído em fibra de vidro, era alimentado com esgoto bruto através de uma bomba helicoidal e três tubos de alimentação descendentes para distribuição uniforme do afluente no fundo do reator. Desta maneira, ocorre um fluxo ascendente com velocidade ascensional controlada que permite o contato da matéria orgânica com a biomassa anaeróbia acumulada na zona de digestão do reator (manta de lodo).

A matéria orgânica biodegradável é convertida principalmente em metano e dióxido de carbono. O biogás produzido é coletado na parte superior do reator por um coletor de gases para fins de aproveitamento energético e controle da poluição atmosférica. As características físicas do reator constam na Tabela 6 e na Figura 14 há uma ilustração do mesmo.

Tabela 6. Características físicas do Reator UASB.

Características físicas	Valores
Diâmetro	2,42 m
Altura	4,00 m
Volume útil	18,30 m ³

Fonte: Barroso, 2015.



Figura 14. Reator UASB em escala piloto.

3.1.1.2 Lagoas de alta taxa

Segundo Barroso (2015), a unidade experimental possuía duas lagoas de alta taxa com fundo e diques revestidos em concreto e com taludes inclinados à 45° (Figura 15). Também dispunha de uma pá impulsora para promover a mistura completa, impedindo a estratificação e sedimentação das algas. Esta mistura promovida pelas pás impulsoras e a baixa lâmina d'água

favorecem o processo de fotossíntese para a maximização da produção da biomassa algal. As características dimensionais das lagoas são apresentadas na Tabela 7 e Figura 16.



Figura 15. Lagoas de alta taxa, planta piloto

Tabela 7. Características físicas das dimensões das lagoas de alta taxa.

Características físicas	Valores
Largura do canal	5,00 m
Comprimento	40,00 m
Área superficial	480,00 m ²
Altura do canal	1,00 m

Fonte: Barroso, 2015.

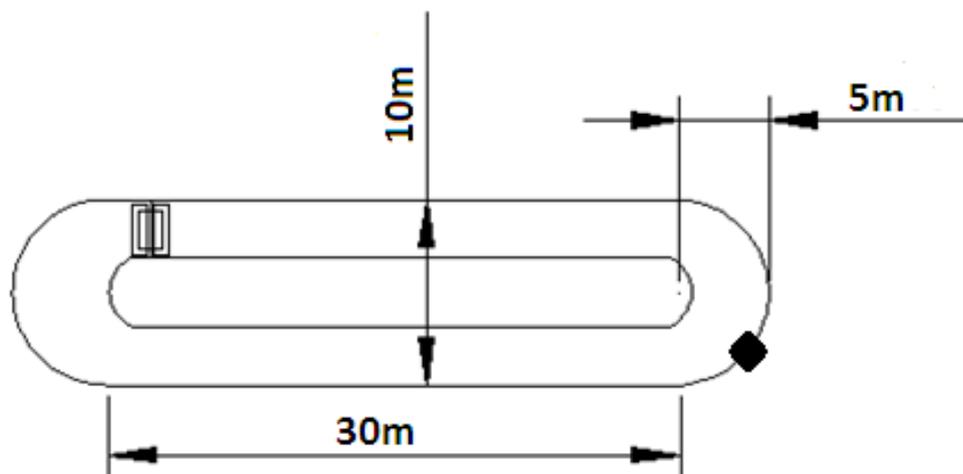


Figura 16. Representação da LAT (♦ ponto de coleta das amostras). Fonte: Barroso, 2015.

3.1.1.3 Identificação das microalgas

Barroso (2015) em sua pesquisa identificou e quantificou, através de um taxonomista, as espécies de microalgas cultivadas na LAT e sua população. O cultivo de microalgas em LAT alimentadas por efluentes sanitários sofrem variações de diversos parâmetros, desta forma as espécies de microalgas variam juntamente com as mudanças de temperatura, radiação solar e disponibilidade de matéria orgânica e nutrientes, conforme indicam as Tabelas 8 e 9. Entretanto, algumas espécies como *Scenedesmus acutus*, *Euglena oxyuris* e *Lepocinclis* aparecem constantemente.

Tabela 8. Análise quali-quantitativa de microalgas presentes na LAT em julho de 2012.

Espécies	Concentração (cél/mL)
BACILLARIOFITA	
<i>Gomphonema parvulum</i>	10
CLOROFITA	
<i>Chlorella vulgaris</i>	30
<i>Desmodesmus opoliensis</i>	40
<i>Desmodesmus protuberans</i>	160

<i>Oocystis lacustris</i>	40
<i>Scenedesmus acutus</i>	40
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	40
EUGLENOFITA	
<i>Euglena agilis</i>	70
<i>Euglena ehrenbergi</i>	70
<i>Euglena oxyuris</i>	140
<i>Lepocinclis caudata</i>	10
<i>Lepocinclis playfairiana</i>	1450
<i>Trachelomonas volvocina</i>	30
<i>Euglena oxyuris</i>	4030
<i>Lepocinclis caudata</i>	10850
<i>Phacus curvicauda</i>	310

Fonte: Barroso, 2015.

Tabela 9. Análise quali-quantitativa de microalgas presentes na LAT em agosto de 2012.

Espécies	Concentração
BACILLARIOFITA	
<i>Nitzschia palea</i>	310
CLOROFITA	
<i>Scenedesmus acutus</i>	2480
EUGLENOFITA	
<i>Euglena acus</i>	310
<i>Euglena caudata</i>	2480
<i>Euglena oxyuris</i>	29760
<i>Euglena proxima</i>	4030
<i>Lepocinclis texta</i>	16740
<i>Phacus sp.</i>	620
<i>Trachelomonas volvocina</i>	620

Fonte: Barroso, 2015.

Barroso (2015), também quantificou a porcentagem de lipídios nas microalgas através do método de Bligh & Dyer, (1959), e concluiu que havia cerca de 7,0 % de lipídios na biomassa das LAT. Conforme Rodolfi et al (2009),

este valor é considerado baixo, todavia pesquisas mais atuais, em condições controladas de temperatura, radiação e meio de cultura, apresentam valores entre 11,6 % e 15,2 % (Ho et al, 2012).

3.1.2 Reagentes

3.1.2.1 Coagulantes

O cloreto férrico (FeCl_3) foi escolhido como coagulante inorgânico por sua eficiência reconhecida no tratamento de águas e efluentes (Delphos Wesner, 2005). Há dados na literatura que sugerem uma faixa ótima de pH entre 5 e 8 quando usados como coagulantes (Matos et al., 2007).

O Tanfloc SG, por sua vez, foi escolhido por ser um polímero orgânico-catiônico de baixa massa molar, de origem essencialmente vegetal. Este pode desempenhar o papel de coagulante ou floculante, já que atua em sistemas de partículas coloidais, neutralizando cargas e formando pontes entre estas partículas, sendo este o processo responsável pela formação de flocos (Tanac, 2016).

3.1.2.2 Floculantes

Nesse trabalho foram utilizados três polímeros sintéticos compostos de copolímeros de poliácridamida, da marca SNF Floerger. Sendo um aniônico AN956SH (alta ionicidade e alta massa molar), um catiônico F04550SH (alta ionicidade e alta massa molar) e um não iônico FA920SH (alta massa molar). São apresentadas nas Figuras 17 e 18 as características dos polímeros fornecidos em relação à anionicidade, cationicidade e massa molecular conforme dados descritos pelo fabricante.

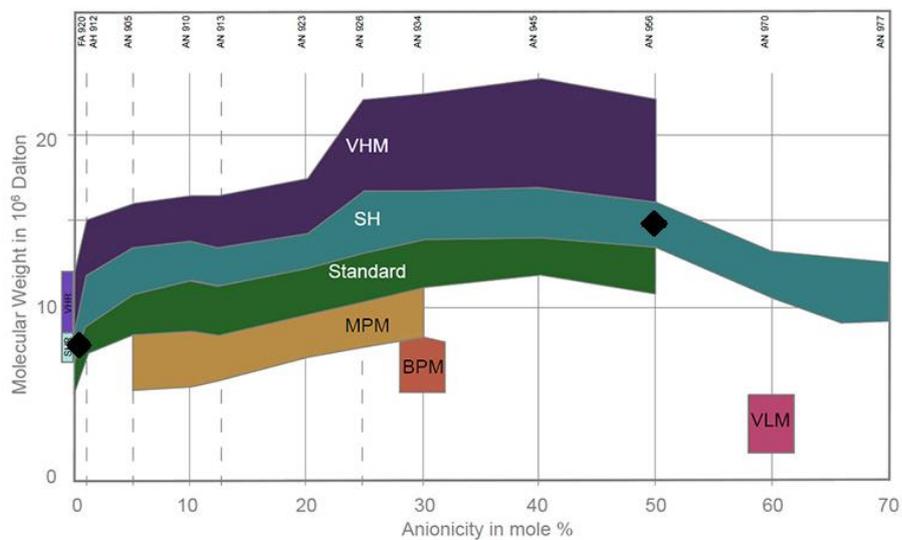


Figura 17. Anionicidade e massa molar de polímeros (♦ polímeros utilizados). Fonte: Catálogo fabricante SNF Floerger.

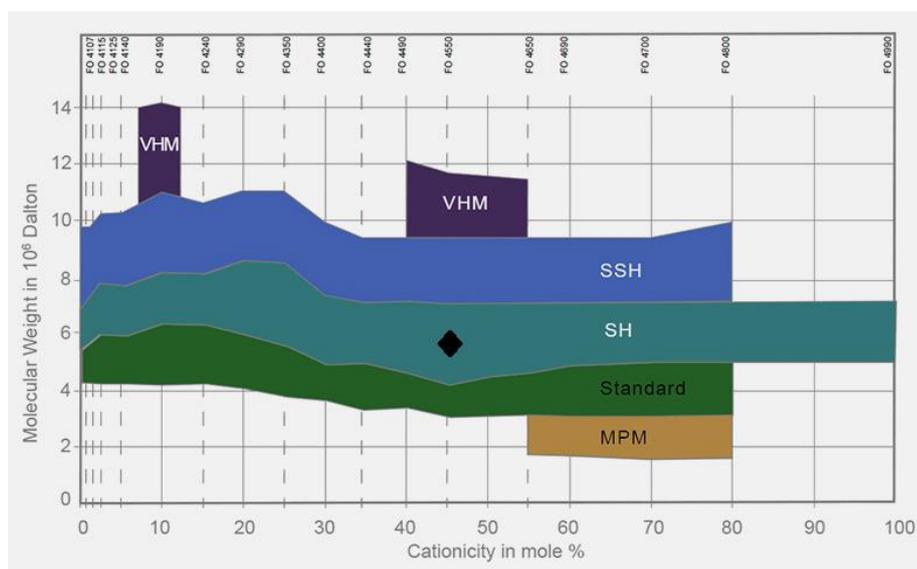


Figura 18. Cationicidade e massa molar dos polímeros (♦ polímero utilizado). Fonte: Catálogo fabricante SNF Floerger.

3.2 MÉTODOS

A Figura 19 descreve de maneira sucinta a sequência dos passos envolvidos nos ensaios de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido e também no ensaio de estabilidade do material flotado. Posteriormente, há uma explicação detalhada de cada etapa empregada neste estudo.

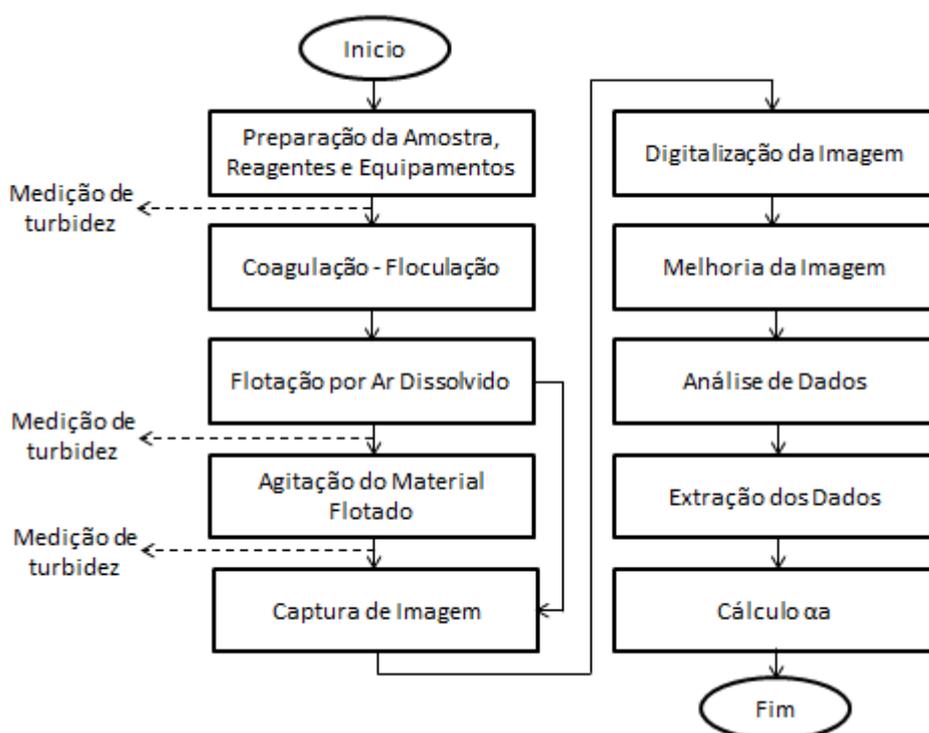


Figura 19. Fluxograma das etapas empregadas.

3.2.1 Coagulação-floculação

A coagulação-floculação foi realizada em um teste de jarros, marca Milan - Modelo JTC/3P, de três jarros (células), com volume de 1L. Para a coagulação as amostras foram mantidas sob agitação por 3 minutos a 140 rpm (agitação rápida) após a adição do coagulante. Na etapa de floculação foram utilizados 5 minutos a 36 rpm, para uma boa dispersão do reagente e para a

formação de flocos. As Figuras 20 e 21 mostram uma imagem do equipamento utilizado para a realização dos testes de jarros e suas características dimensionais, respectivamente.

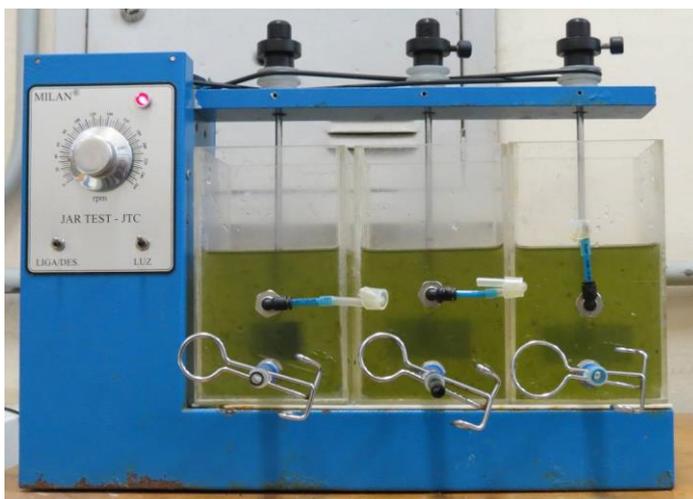


Figura 20. Equipamento de testes de jarros (previamente a realização da coagulação e floculação).

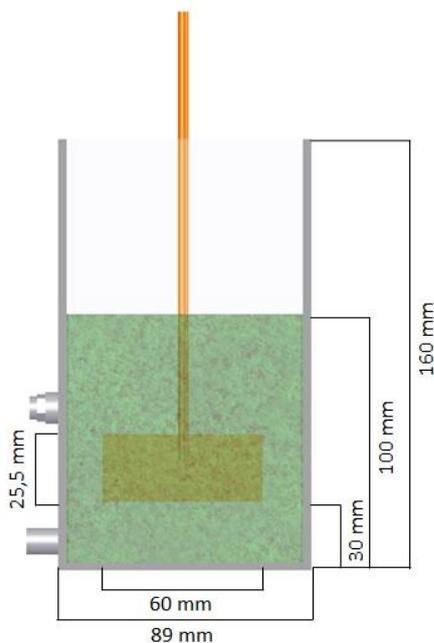


Figura 21. Características dimensionais do sistema de agitação do teste de jarros.

3.2.2 Flotação por ar dissolvido

Para saturação da água foi utilizado um saturador de bancada com 0,5m de altura e 0,1m de diâmetro, com volume efetivo de 3L. A pressão de saturação adotada foi de 4,0 kgf/cm² e o tempo de saturação foi de 35 minutos. Em seguida, a água saturada com ar foi injetada na célula de flotação gerando uma corrente líquida com microbolhas pela redução da pressão.

Após a injeção da água saturada, esperou-se 3 minutos para finalizar a flotação e, em seguida, uma amostra foi coletada através de um orifício no centro da célula para determinação da turbidez. Nos ensaios nos quais ocorreu agitação do material flotado para avaliação de sua estabilidade, também esperou-se 3 minutos após a agitação do flotado para que uma amostra fosse coletada para a medição de turbidez. A representação esquemática do aparato de FAD de bancada é mostrado na Figura 22.

Para todos os testes realizados o volume do reciclo foi fixado em 25% do volume total da amostra, ou seja, para cada 750 mL de amostra proveniente da lagoa, 250mL de água saturada com ar foram injetados para a formação de microbolhas.

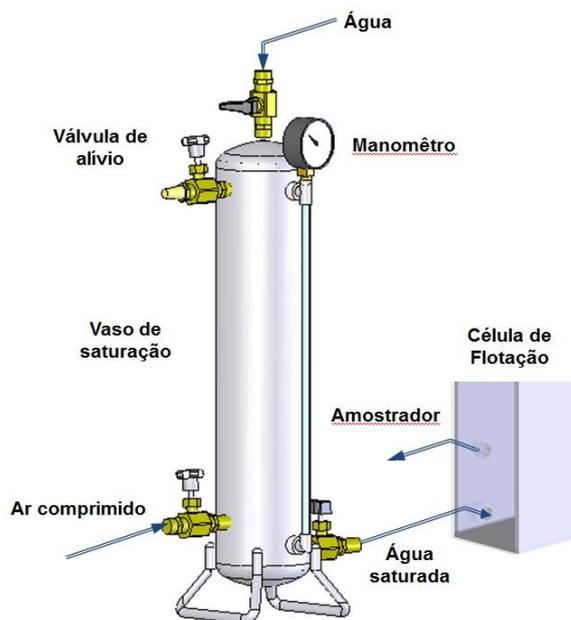


Figura 22. Desenho esquemático do sistema de FAD.

A Figura 23 apresenta um dos experimentos onde visualiza-se todas as etapas. Sendo estas: Etapa A - amostra bruta; Etapa B - instante após a injeção de água saturada (reciclo de 25%); Etapa C - 3 minutos após a injeção do reciclo; Etapa D - instante após a agitação do material flotado; e, Etapa E - 3 minutos após a agitação do flotado.

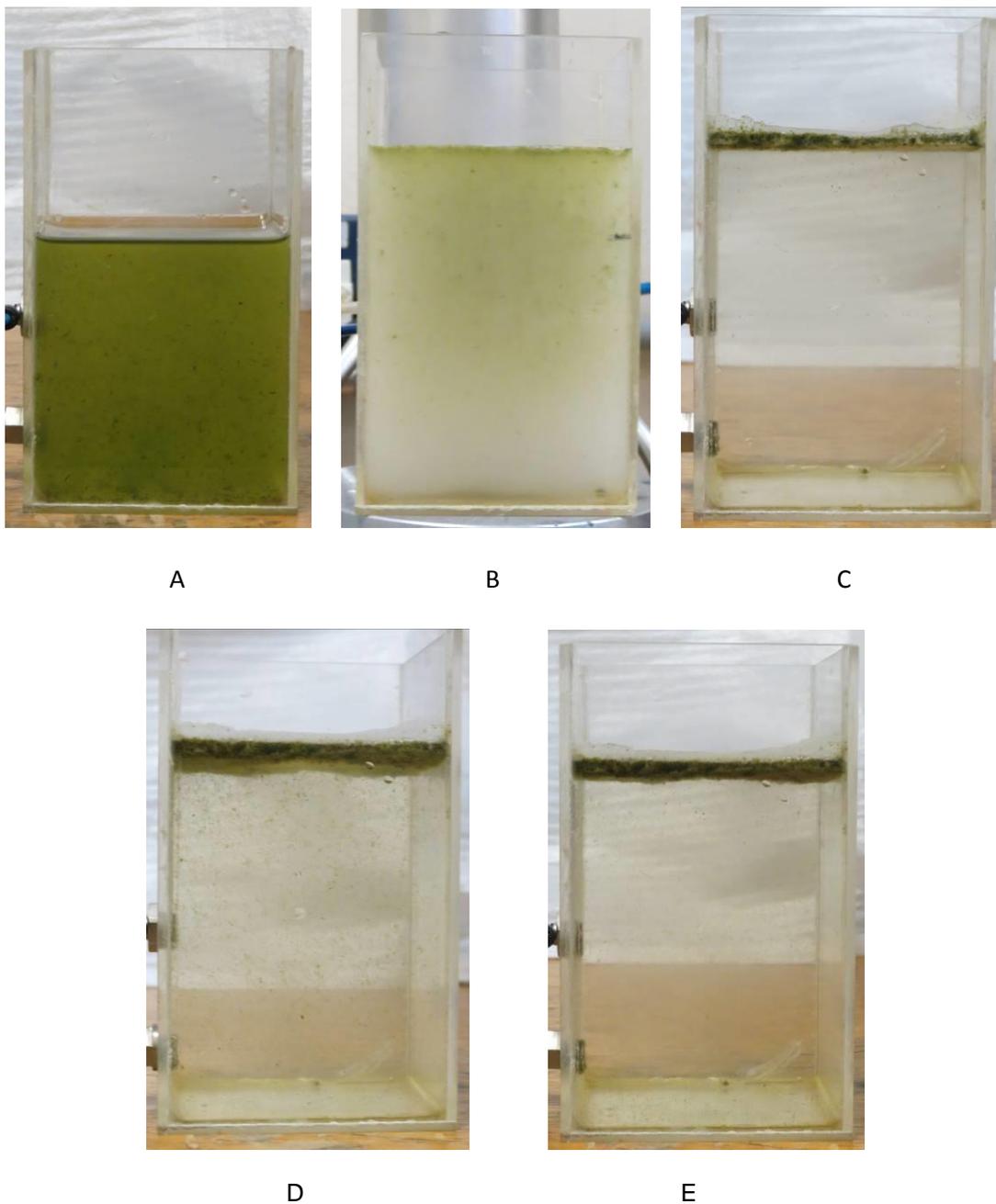


Figura 23. Etapas do experimento de flotação realizado.

O pH das amostras coletadas foi de aproximadamente 7, e quando necessário houve a realização da correção do pH através da adição de HCl ou NaOH (das marcas Química Moderna Industria e Comercio Ltda. e Neon Comercial Ltda., respectivamente), sendo medido com um pHmetro (Modelo 86505 AZ Instrument).

3.2.3 Estabilidade do material flotado

Nos ensaios em que houve avaliação da estabilidade do material flotado, ao final do tempo de flotação, acrescentou-se uma etapa de agitação por 10 segundos com uma velocidade de 55 rpm, com a pá agitadora inserida na altura da espuma (material flotado), conforme mostrado na Figura 24. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

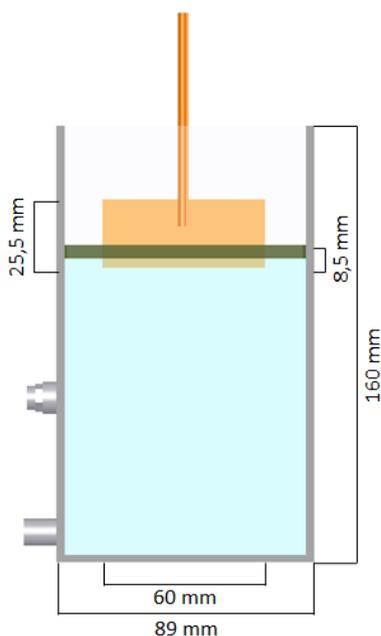


Figura 24. Representação do sistema de agitação mecânica do material flotado empregado nos ensaios de estabilidade do material flotado.

Após a agitação da espuma, esperou-se 3 minutos e, em seguida, uma amostra foi coletada através de um orifício no centro da célula para

determinação da turbidez, assim como foram obtidas imagens na zona clarificada da célula.

A avaliação da estabilidade do material flotado foi realizada via análise de imagens. A captura, processamento e análise das imagens foi automatizada com o auxílio do software Image Tool, permitindo analisar a quantidade de microalgas presentes no efluente. As imagens foram capturadas com uma câmera filmadora JVC – TK 1280E (NTSC - 768 x 576 pixels), com velocidade de captura (*speed shutter*) ajustada em 1/500 s, acoplada à uma lente de zoom (ML-Z07545 Macro Zoom – Moritex Corporation).

A câmera foi conectada ao computador através de uma placa de captura Matrox Meteor-II. Foram analisadas três imagens para cada condição experimental, totalizando 174 imagens. A iluminação do sistema foi realizada por uma placa de LED de 10 x 10 cm (Chip-mount LED backlight, modelo MDBC-CW100 – marca Moritex) e fonte (Wave Power Source - MLEK-A230W1LRD, marca Moritex). A iluminação foi através de luz transmitida, permitindo a obtenção de imagens com excelente contraste. O campo de visão fotografado foi de 713 mm² (23 x 31 mm), conforme mostra a Figura 25.

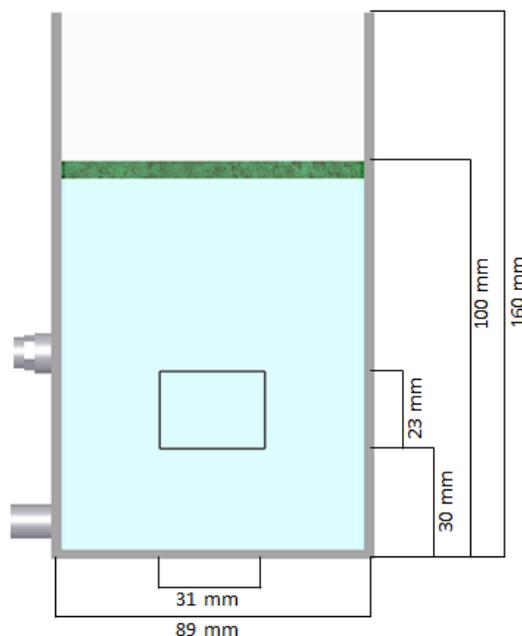


Figura 25. Representação da posição e do campo de visão fotografado nos ensaios.

As principais etapas do processamento de imagens, para identificação e análise dos objetos, foram realizadas no software Image Tool e foram constituídas por etapas de conversão das imagens para tons de cinza (256 tons – 8 bits), ajustes nas configurações de contraste (*automatic contrast*) e limiarização (*threshold*). A análise realizada foi a de contagem de pixels preto e branco (*count black/white*),

Para a análise das imagens binárias, um novo parâmetro chamado porcentagem de área (α) foi definido para representar a quantidade de pixels pretos (objetos) nas imagens obtidas. Este parâmetro demonstra uma correlação com a quantidade de algas presentes no efluente após o sistema FAD e a agitação do material flotado, ou seja, representa a instabilidade do material flotado.

O valor de α é definido como o percentual de pixels pretos em relação ao total de pixels na imagem, conforme a equação:

$$\alpha = 100 \times \frac{\sum \text{Pixels Preto}}{\sum \text{Total Pixels}}$$

Eq. 6

Para melhor compreensão do método proposto e apenas em caráter ilustrativo, a Figura 26 aborda imagens realizadas na zona de líquido clarificado após a agitação do material flotado. Aonde, A representa a versão original, B a versão preto e branco e C a versão binária.

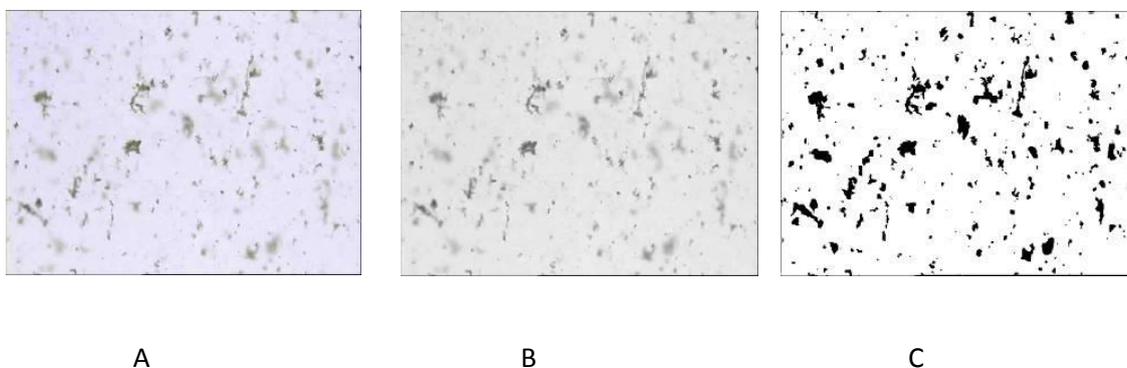


Figura 26. Imagens da zona de líquido clarificado após agitação do material flotado.

Os ensaios de turbidez foram realizados através de um turbidímetro digital microprocessado, da marca policontrol AP2000. As análises foram efetuadas nas amostras brutas provenientes da estação de tratamento de efluentes, após os ensaios de flotação por ar dissolvido e da agitação do material flotado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTUDOS DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO E FAD

As Figuras 27 e 28 apresentam os resultados de remoção de turbidez na separação de microalgas através do processo de coagulação e FAD, para cinco concentrações distintas de cloreto férrico e Tanfloc SG (20, 30 40, 50 e 60mg/L) e quatro valores de pH (6,7,8 e 9).

De acordo com os valores obtidos, descritos nas Tabelas 10 e 11, se nota um padrão para o coagulante cloreto férrico, que indica que independentemente do pH quanto maior for a sua concentração maior será a remoção de turbidez. Entretanto, verificou-se uma tendência de maiores remoções de turbidez para valores de pH mais alto, quando comparados ao pH 6, que se mostrou ser menos eficaz.

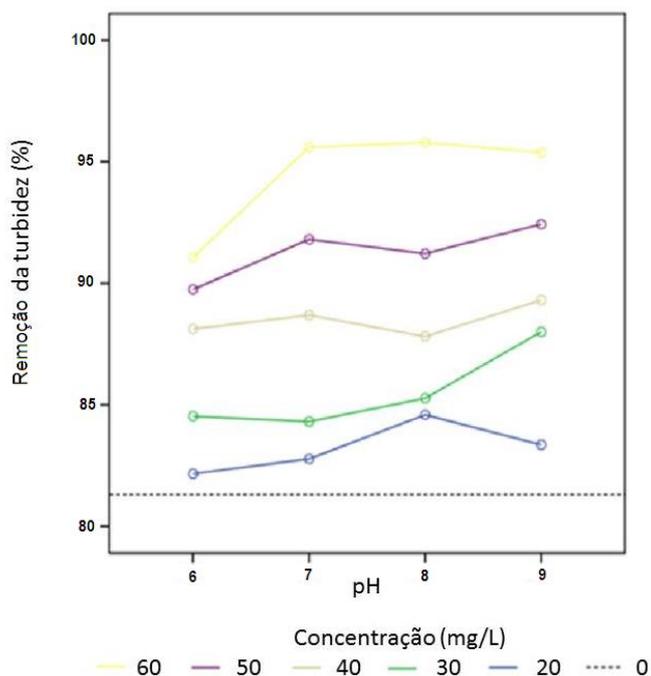


Figura 27. Remoção da turbidez em função das concentrações do coagulante cloreto férrico e dos valores de pH.

O Tanfloc SG mostrou-se eficaz em pH 7, pois independentemente da concentração atingiu valores semelhantes, proporcionando uma condição ótima de agregação.

O cloreto férrico apresentou remoções de turbidez entre 82-89% para as concentrações de 20, 30 e 40 mg/L. Entretanto, atingiu valores entre 90-95% nas concentrações de 50 e 60 mg/L. O Tanfloc SG, de um modo geral, apresenta remoção de turbidez de aproximadamente 97%, independente das distintas concentrações testadas no pH 7. Ou seja, a remoção de turbidez foi similar em ambos coagulantes, porém com maior dosagem requerida para o cloreto férrico.

Os resultados deste estudo foram descritos por média e desvio padrão e então comparados através da análise de variância (ANOVA) com três fatores: pH, coagulante e concentração. Ressalta-se que nesta análise houve diferença estatisticamente significativa para os fatores em questão ($p < 0,001$), indicando que as diferenças amostrais testadas são reais.

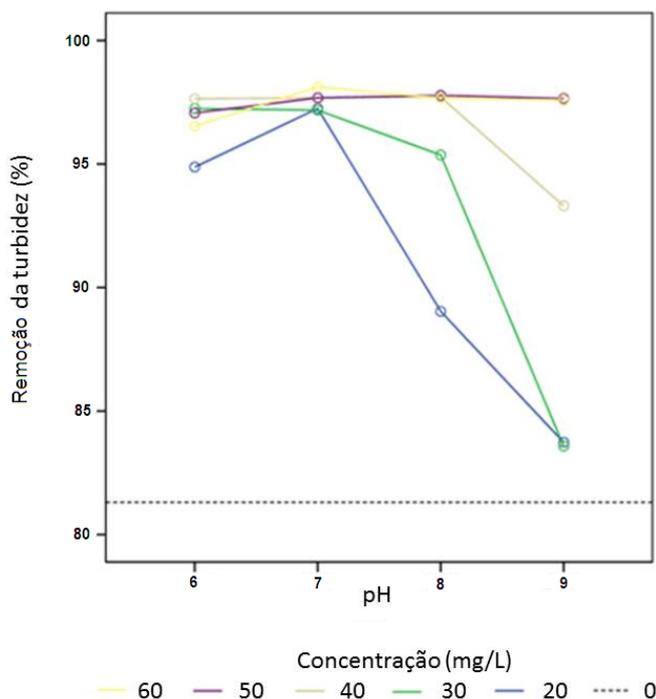


Figura 28. Remoção da turbidez em função das concentrações do coagulante Tanfloc SG e dos valores de pH.

Os valores apresentados nesta etapa, de um modo geral, se revelam pouco superiores aos encontrados pela pesquisa de Barroso (2015). As concentrações similares testadas foram as de 30, 40 e 50 mg/L do coagulante Tanfloc SG. Para o Tanfloc SG em pH 7 este estudo apresentou uma eficiência de 97% enquanto o de Barroso (2015) variou entre 85-92%, e no pH 9 este estudo demonstrou uma eficiência entre 83-97% e o de Barroso (2015) entre 82-89%. Mesmo os resultados apresentando uma diferença nos valores encontrados, estes possuem um comportamento similar, tendo uma maior eficiência de separação de algas no pH 7.

Em relação ao coagulante cloreto férrico, as combinações comuns testadas em ambos os estudos foram 20, 30 e 40 mg/L. Para Barroso (2015) a eficiência de separação variou entre 85-90% no pH 7 e 83-84% no pH 9. E, neste estudo para o pH 7 a eficiência foi de 82-88% e para o pH 9 foi de 83-89%.

Tabela 10. Valores da turbidez conforme concentrações dos coagulantes e faixas de pH.

Concentração (mg/L)	Turbidez (NTU)							
	pH							
	6		7		8		9	
Cloreto Férrico	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD
20	42,10	6,70	37,00	6,63	42,70	6,57	43,20	7,19
	37,00	7,67	38,60	7,20	41,30	6,39	38,00	6,57
	39,50	6,67	42,60	6,44	41,00	6,31	38,80	6,21
30	41,20	6,34	39,90	6,51	38,80	5,90	44,60	5,48
	41,20	6,37	39,30	5,72	40,80	5,75	43,10	5,64
	38,00	5,92	39,40	6,39	38,80	5,78	51,10	5,43
40	41,90	5,45	37,10	4,11	41,10	5,29	43,70	4,44
	43,20	5,05	39,40	4,35	41,60	5,31	41,80	4,20
	42,90	4,69	38,50	4,55	41,00	4,48	38,00	4,51
50	44,40	3,68	42,10	3,51	39,70	3,37	42,20	3,05
	39,70	4,13	43,90	3,54	42,60	3,57	42,40	3,00
	38,40	4,63	41,00	3,35	40,70	3,85	41,80	3,51
60	38,90	3,24	38,40	1,62	37,80	1,82	44,00	2,15
	41,00	3,47	38,70	1,54	35,70	1,57	47,2	2,37
	39,20	3,92	40,60	2,02	41,70	1,41	51,4	2,02
Tanfloc SG	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD
20	100,00	5,29	75,80	1,46	71,50	7,53	66,60	10,70
	101,00	5,33	70,80	1,99	70,70	7,79	80,10	13,70
	105,00	5,04	76,50	2,69	71,20	8,08	71,70	11,20
30	98,00	1,69	97,50	2,30	71,50	3,25	70,90	12,00
	109,00	3,13	87,40	2,70	71,60	3,28	73,40	12,20
	101,00	3,70	89,00	2,68	70,20	3,35	75,80	11,90
40	95,00	1,99	68,70	1,40	70,00	1,87	78,20	4,99
	110,00	2,00	69,30	1,93	66,4	1,00	84,00	5,05
	96,10	3,03	80,20	1,73	69,00	1,85	86,00	6,61
50	96,00	2,22	72,40	1,29	71,80	2,11	70,00	1,70
	105,00	3,19	67,80	1,83	75,10	1,10	68,40	1,99
	94,80	3,27	66,50	1,65	65,80	1,49	70,80	1,21
60	92,80	2,21	66,50	1,54	81,20	1,40	71,70	0,96
	78,20	3,60	67,60	1,20	73,90	2,05	72,90	1,68
	71,40	2,43	70,10	1,08	73,50	1,84	65,00	2,36

Tabela 11. Percentual de remoção de turbidez conforme concentrações dos coagulantes e faixas de pH.

Cloreto Férrico	pH			
	6	7	8	9
Concentração (mg/L)	Média ± DP	Média ± DP	Média ± DP	Média ± DP
20	82,2 ± 2,5	82,8 ± 1,9	84,6 ± 0,0	83,4 ± 0,6
30	84,5 ± 0,1	84,3 ± 1,0	85,3 ± 0,6	88,0 ± 1,3
40	88,1 ± 1,0	88,7 ± 0,4	87,8 ± 1,1	89,3 ± 1,0
50	89,8 ± 1,9	91,8 ± 0,1	91,2 ± 0,6	92,4 ± 0,7
60	91,1 ± 0,9	95,6 ± 0,5	95,8 ± 0,7	95,4 ± 0,6
Tanfloc SG				
Concentração (mg/L)	Média ± DP	Média ± DP	Média ± DP	Média ± DP
20	94,9 ± 0,3	97,2 ± 0,8	89,0 ± 0,4	83,7 ± 0,8
30	97,2 ± 1,0	97,2 ± 0,4	95,4 ± 0,1	83,6 ± 0,6
40	97,6 ± 0,7	97,7 ± 0,4	97,7 ± 0,7	93,3 ± 0,9
50	97,1 ± 0,6	97,7 ± 0,5	97,8 ± 0,7	97,7 ± 0,6
60	96,5 ± 1,1	98,1 ± 0,4	97,7 ± 0,5	97,6 ± 1,2
Efeitos	valor – p			
Coagulante	<0,001			
Concentração	<0,001			
pH	<0,001			
Concentração x pH	<0,001			
Concentração x coagulante	<0,001			
Coagulante x pH	<0,001			
Concentração x coagulante x pH	<0,001			

4.2 ESTUDOS DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO E FAD COM AUXÍLIO DE POLÍMEROS

A Figura 29 apresenta a remoção de turbidez na separação de microalgas para diferentes combinações entre o coagulante cloreto férrico e os floculantes sintéticos AN956SH, FA920SH e FO4550SH. O cloreto férrico foi aplicado em uma única dosagem, sendo esta de 20 mg/L, e os polímeros sintéticos foram utilizados com distintas dosagens (0,5; 1,0; 2,0 e 3,0 mg/L). A escolha de uma menor concentração do coagulante neste estudo ocorreu devido à adição dos polímeros, uma vez que estes auxiliam a etapa de floculação e permitem a redução da concentração dos coagulantes. O pH da amostra, quando se fez necessário, foi ajustado em 7.

Neste caso, foi possível observar que todas as amostras contendo polímeros apresentaram valores de remoção de turbidez mais elevados em relação a amostra que continha apenas o cloreto férrico (20mg/L), assim como a amostra correspondente ao ensaio branco.

Para o cloreto férrico observou-se (Tabelas 12 e 13) que o polímero FO4550SH apresentou a melhor condição de remoção da turbidez enquanto o polímero FA920SH apresentou valores menores.

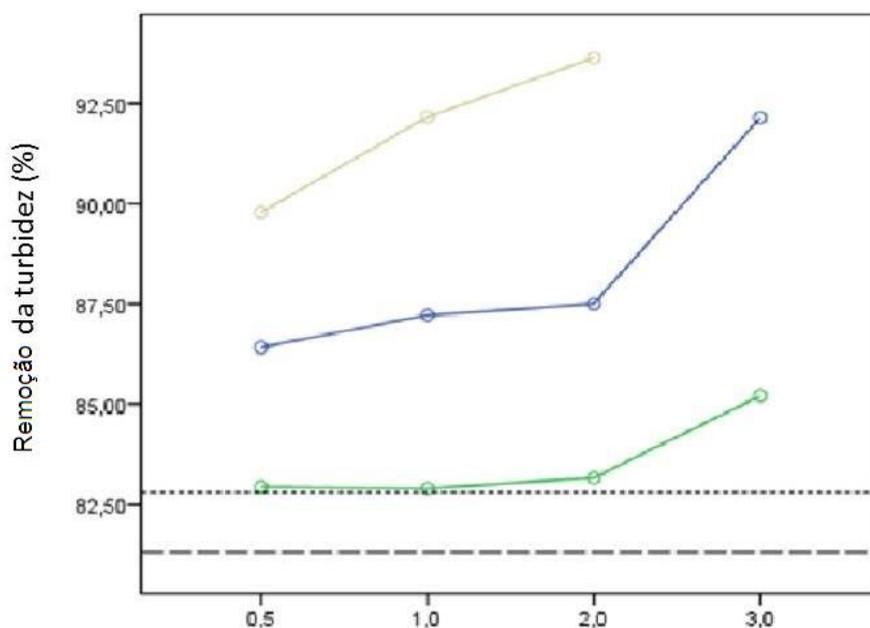


Figura 29. Remoção da turbidez conforme concentração e polímero para cloreto férrico.

A Figura 30 ilustra os resultados obtidos com diferentes combinações entre o Tanfloc SG (20 mg/L e pH 7) e os floculantes sintéticos AN956SH, FA920SH e FO4550SH (0,5, 1,0, 2,0 e 3,0 mg/L).

Nas concentrações 0,5 e 2,0 mg/L os polímeros FO4550SH e AN956SH apresentaram comportamento similar. Entretanto, para dosagem de 1,0 mg/L o polímero AN956SH obteve melhores resultados.

Semelhantemente ao cloreto férrico, para o Tanfloc SG o polímero FA920SH apresentou baixa remoção de turbidez quando comparado aos demais polímeros.

Como visto, no sub capítulo anterior, o Tanfloc SG no pH 7 proporciona altos índices de remoção de turbidez (aproximadamente 97%), independentemente da sua concentração. Nesta parte do experimento, se notou o mesmo comportamento.

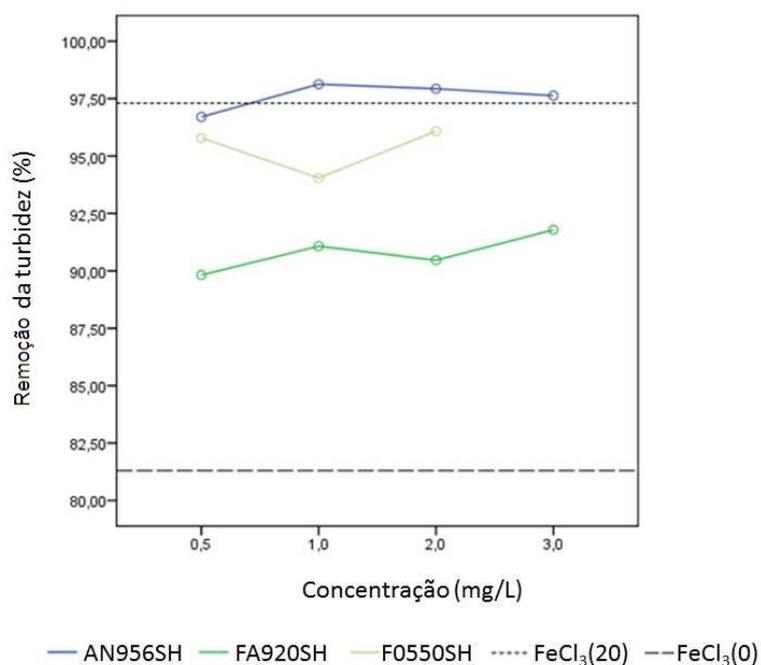


Figura 30. Remoção da turbidez conforme concentração e polímero para Tanfloc SG.

Os resultados deste estudo foram descritos por média e desvio padrão e então comparados através da ANOVA com três fatores: coagulante, polímero e concentração. Segundo os dados estatísticos houve interação tripla significativa em razão dos fatores ($p=0,002$), o que indica que as diferenças amostrais testadas são reais.

Tabela 12. Valores da turbidez conforme concentrações dos polímeros e natureza dos coagulantes em pH 7.

		Turbidez (NTU)						
		Polimeros						
		AN 956 SH		FA 920 SH		FO 4550 SH		
Cloreto Férrico	Concentração (mg/L)	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD	
		0,5	68,00	10,70	77,50	13,00	81,40	8,85
			74,70	9,28	71,90	13,20	74,00	7,52
	1,0		81,00	10,20	80,30	12,90	80,80	7,76
			74,20	9,72	77,50	13,30	82,40	6,10
			81,30	10,00	76,30	13,10	76,60	5,73
	2,0		78,80	10,20	74,20	12,60	70,00	6,03
			74,50	9,00	78,70	12,50	74,80	4,67
			73,50	10,40	73,50	12,20	76,50	4,77
	3,0		74,30	8,36	68,80	12,40	77,60	5,12
			78,80	6,59	73,90	11,90		
			81,60	6,06	75,20	11,40	-	-
		80,40	6,25	80,00	10,50			
Tanfloc SG	Concentração (mg/L)	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD	Inicial	Pós FAD	
		0,5	75,30	2,47	78,30	8,04	77,30	2,07
			72,90	2,54	81,00	8,12	80,50	3,90
	1,0		81,50	2,55	76,60	7,86	79,50	4,07
			96,00	1,64	77,50	7,50	82,10	4,93
			98,00	1,52	76,60	6,26	87,10	5,08
	2,0		94,10	2,22	74,90	6,69	81,30	4,91
			88,00	2,06	76,30	6,98	81,50	5,23
			90,00	1,96	73,90	7,12	77,70	2,87
	3,0		91,50	1,55	84,50	8,31	87,70	1,45
			90,70	1,88	79,30	7,00		
			77,10	1,63	81,40	5,22	-	-
		77,20	2,26	81,9	7,70			

Tabela 13. Percentual de remoção de turbidez conforme concentrações dos polímeros e natureza dos coagulantes em pH 7.

<i>Cloreto Férrico</i> Concentração	Polímeros		
	AN 956 SH	FA 20 SH	FO 4550 SH
	Média ± DP	Média ± DP	Média ± DP
0,5	86,4 ± 1,9	82,9 ± 1,2	89,8 ± 0,6
1,0	87,2 ± 0,4	82,9 ± 0,1	92,2 ± 0,7
2,0	87,5 ± 1,5	83,2 ± 1,1	93,6 ± 0,2
3,0	92,1 ± 0,5	85,2 ± 1,5	-

<i>Tanfloc SG</i> Concentração	Polímeros		
	AN 956 SH	FA 20 SH	FO 4550 SH
	Média ± DP	Média ± DP	Média ± DP
0,5	96,7 ± 0,2	89,8 ± 0,1	95,8 ± 1,3
1,0	98,1 ± 0,4	91,1 ± 0,8	94,0 ± 0,1
2,0	97,9 ± 0,3	90,5 ± 0,4	96,1 ± 2,4
3,0	97,6 ± 0,5	91,8 ± 1,6	-

Efeitos	valor – p
Coagulante	<0,001
Concentração	<0,001
Polímero	<0,001
Concentração x polímero	0,143
Concentração x coagulante	0,001
Coagulante x polímero	<0,001
Concentração x coagulante x pH	0,002

4.3 ESTUDOS DE ESTABILIDADE DO MATERIAL FLOTADO

4.3.1 Ensaios branco e com coagulantes

4.3.1.1 Turbidez

De acordo com os valores indicados na Tabela 14, percebe-se que após a agitação mecânica do material flotado houve um aumento nos valores de turbidez, ou seja, constatou-se uma menor estabilidade do material flotado

quando as amostras continham apenas coagulantes. A Tabela 15 apresenta os valores de remoção da turbidez e conforme o esperado, as amostras com concentrações elevadas de coagulantes apresentaram resultados mais elevados que as amostras com menores concentrações. Para ambos coagulantes a remoção da turbidez após a agitação mecânica resultou em um aumento de aproximadamente 4%.

Tabela 14. Valores da turbidez após FAD e após agitação mecânica para os coagulantes.

Amostras	Turbidez (NTU)		
	Inicial	Pós FAD	Pós Agitação
Branco	87,6	25,4	34,4
	85	21,3	31,4
	85,4	22	31,1
FeCl ₃ (20mg/L)	82,2	10,9	13,5
	86	9,95	14,4
	85	11,9	13,3
FeCl ₃ (60mg/L)	87	3,57	6,65
	83,1	3,47	5,76
	81,8	3,04	5,53
Tanfloc SG (20mg/L)	80,1	5,6	10,9
	85,4	6,1	9,62
	73,2	4,2	5,65
Tanfloc SG (60mg/L)	86,7	2,16	5,12
	79	1,25	4,66
	80,5	1,56	4,71

Tabela 15. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para os coagulantes.

Amostras	Remoção de turbidez (%)	
	FAD	Agitação
	Média ± DP	Média ± DP
Branco	73,40 ± 2,10	62,5 ± 1,52
FeCl ₃ (20mg/L)	87,05 ± 1,24	83,7 ± 0,56
FeCl ₃ (60mg/L)	96,00 ± 0,25	92,88 ± 0,47
Tanfloc SG (20mg/L)	93,37 ± 0,77	89,13 ± 2,96
Tanfloc SG (60mg/L)	97,99 ± 0,460	94,11 ± 0,02

4.3.1.2 Porcentagem de área

A Tabela 16 apresenta os valores de α alcançados de acordo com a Equação 6, o qual significa o percentual de pixels pretos obtidos através da versão binária das imagens analisadas. Destaca-se que quanto mais próximo de zero os valores de α mais estável é o material flotado, ou seja, menor é a presença de flocos em suspensão.

Em relação aos coagulantes e ensaio branco nota-se que os valores de α encontrados foram superiores em relação aos ensaios que envolviam os polímeros.

Tabela 16. Valores do α para os ensaios dos coagulantes e do branco.

Amostras	α (%)
Branco	5,66
FeCl ₃ (20mg/L)	4,91
FeCl ₃ (60mg/L)	4,39
Tanfloc SG(20mg/L)	5,49
Tanfloc SG(60mg/L)	4,26

As imagens realizadas nos ensaios relativos aos coagulantes e a amostra branco são demonstradas na Figura 31 a Figura 35. Cada figura apresenta a versão original da imagem capturada, versão preto e branco, e versão binária nas etapas constituídas posterior a flotação por ar dissolvido e agitação mecânica do material flotado.

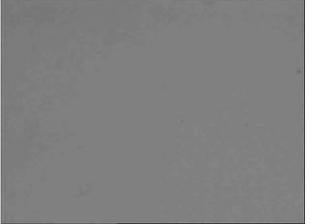
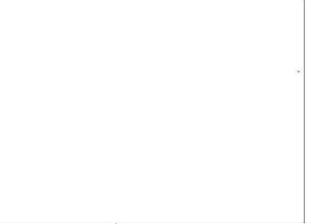
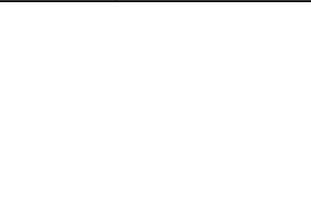
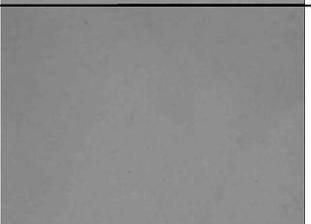
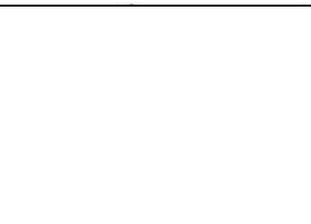
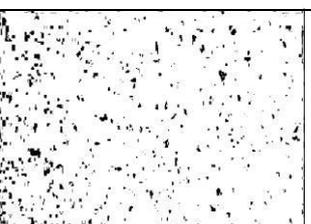
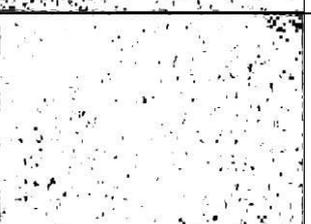
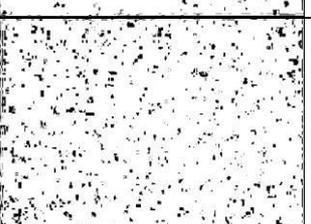
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 31. Ensaio fotográfico da amostra branco.

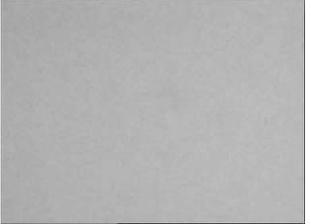
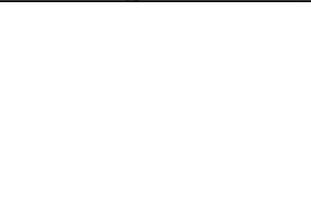
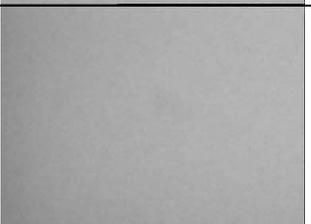
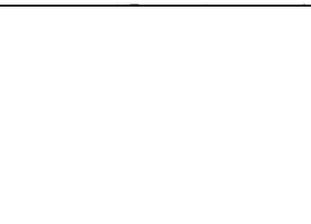
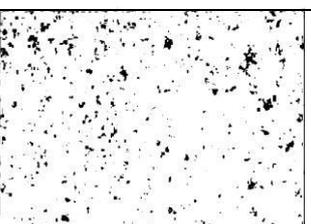
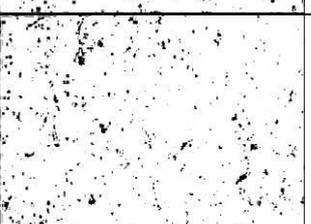
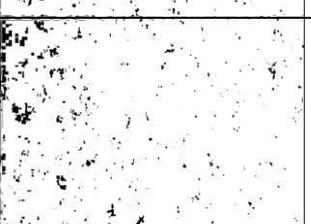
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 32. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico a uma concentração de 20mg/L.

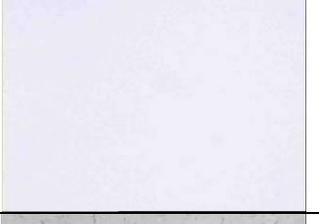
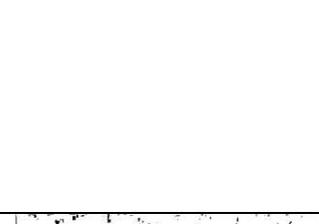
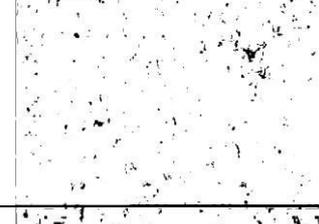
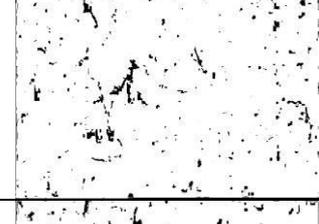
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 33. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico a uma concentração de 60mg/L.

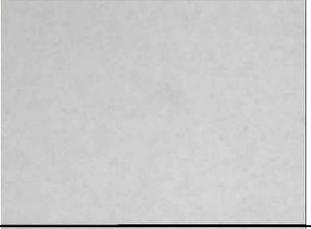
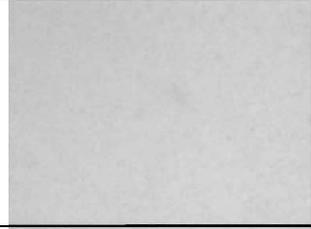
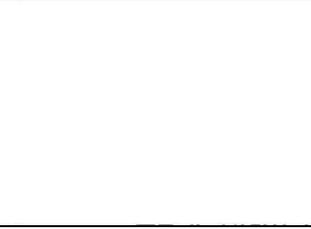
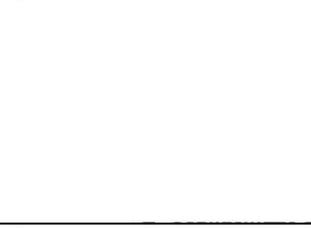
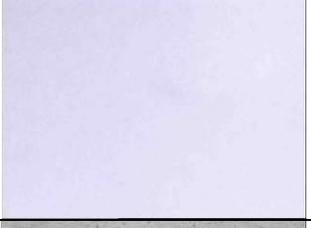
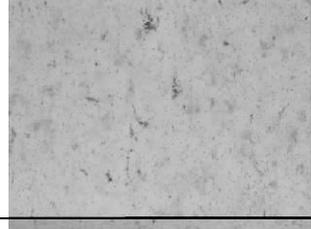
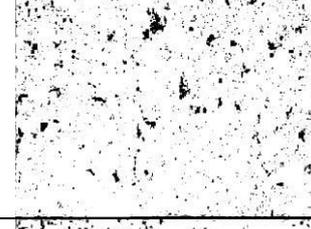
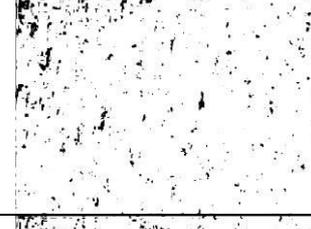
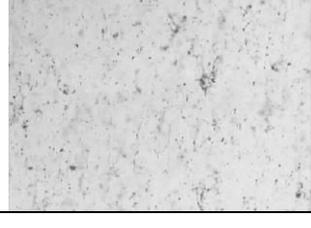
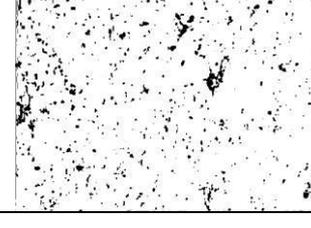
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 34. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG a uma concentração de 20mg/L.

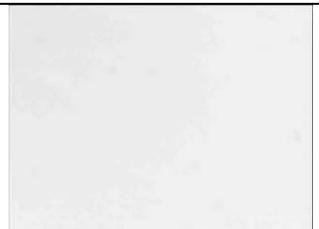
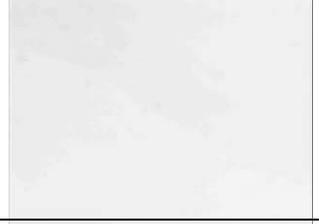
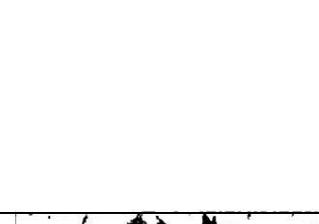
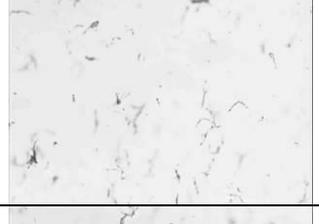
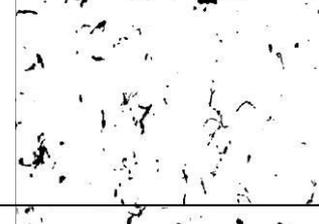
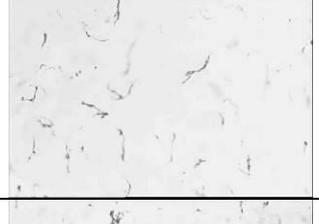
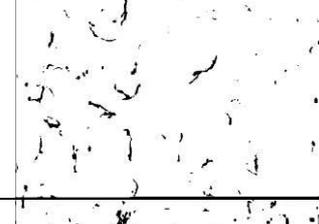
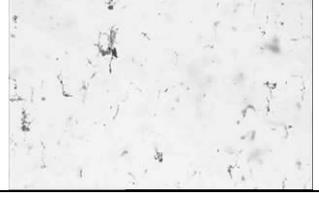
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 35. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG a uma concentração de 60mg/L.

4.3.2 Ensaios com polímero aniônico

4.3.2.1 Turbidez

A remoção da turbidez frente a agitação mecânica mostrou-se efetiva. Estatisticamente, a maioria das amostras não apresentou uma variação significativa posterior a FAD e agitação (Tabela 17 e 18). Porém, no ensaio correspondente a combinação entre o Tanfloc SG e o polímero AN956SH a uma concentração de 0,5 mg/L, houve uma variação significativa na turbidez. No que concerne ao cloreto férrico e também ao Tanfloc SG a melhor combinação com o polímero aniônico corresponde a concentração de 1,0 mg/L.

Tabela 17. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero AN956SH.

Amostras	Turbidez (NTU)		
	Inicial	Pós FAD	Pós Agitação
FeCl ₃ (20mg/L)+AN956SH(0,5mg/L)	86,6	13,2	16,2
	82,3	11,2	16,1
	80,2	12,1	13,8
FeCl ₃ (20mg/L)+AN956SH (1,0 mg/L)	86,1	11,1	12,5
	85	8,94	11,5
	83,3	10,9	12,3
FeCl ₃ (20mg/L)+AN956SH (2,0mg/L)	87,4	11,7	13,6
	84,4	10,9	12,9
	79,5	10,3	12,5
FeCl ₃ (20mg/L)+AN956SH (3,0mg/L)	81,7	10,7	13,9
	77,8	11	15
	78,5	11,1	14,2
Tanfloc SG(20mg/L) + AN956SH (0,5mg/L)	76,9	2,58	3,92
	83,1	2,95	5
	74,1	2,78	4,02
Tanfloc SG(20mg/L) + AN956SH (1,0mg/L)	81	2,4	3,5
	82,6	2,38	4,23
	85,7	2,23	3,96
Tanfloc SG(20mg/L) + AN956SH (2,0mg/L)	73,6	3,1	4,31
	81,1	2,49	4,28
	83,2	4	6,71
Tanfloc SG(20mg/L) + AN956SH (3,0mg/L)	85,3	3,2	5,23
	78,5	3,4	5,73
	78,2	3,67	6,49

Tabela 18. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero AN956SH.

Amostras	Remoção de turbidez (%)	
	FAD	Agitação
	Média ± DP	Média ± DP
FeCl ₃ (20mg/L)+AN956SH(0,5mg/L)	85,35 ± 0,90	81,50 ± 1,19
FeCl ₃ (20mg/L)+AN956SH (1,0 mg/L)	87,83 ± 1,42	85,73 ± 0,65
FeCl ₃ (20mg/L)+AN956SH (2,0mg/L)	86,91 ± 0,26	84,47 ± 0,22
FeCl ₃ (20mg/L)+AN956SH (3,0mg/L)	85,86 ± 0,60	81,91 ± 1,13
Tanfloc SG(20mg/L) + AN956SH (0,5mg/L)	96,44 ± 0,20	94,48 ± 0,46
Tanfloc SG(20mg/L) + AN956SH (1,0mg/L)	97,18 ± 0,19	95,31 ± 0,40
Tanfloc SG(20mg/L) + AN956SH (2,0mg/L)	95,97 ± 0,88	93,60 ± 1,47
Tanfloc SG(20mg/L) + AN956SH (3,0mg/L)	95,74 ± 0,47	92,75 ± 1,08

4.3.2.2 Porcentagem de área

Em relação a estabilidade do material flotado, o polímero AN956SH produziu melhores resultados com o coagulante cloreto férrico, apresentando valores de α_a inferiores, conforme exhibe a Tabela 19.

Para a combinação Tanfloc SG com o polímero em questão a uma concentração de 0,5 mg/L o valor de α_a corresponde a 5,71, sendo este o maior valor de α_a encontrado neste estudo. Para a amostra de Tanfloc SG a uma concentração de 20 mg/L, o α_a encontrado foi de 5,49. Ou seja, para a aplicação da combinação de Tanfloc SG com o AN956SH, recomenda-se concentrações maiores de 1,0 mg/L, para que se atinja uma estabilidade do material flotado satisfatória.

Tabela 19. Valores do α para os ensaios com o polímero AN956SH.

Amostras	α (%)
FeCl ₃ (20mg/L) + AN956SH(0,5mg/L)	0,38
FeCl ₃ (20mg/L) + AN956SH(1,0mg/L)	0,37
FeCl ₃ (20mg/L) + AN956SH(2,0mg/L)	0,69
FeCl ₃ (20mg/L) + AN956SH(3,0mg/L)	0,66
TanflocSG(20mg/L) + AN956SH(0,5mg/L)	5,71
TanflocSG(20mg/L) + AN956SH(1,0mg/L)	0,68
TanflocSG(20mg/L) + AN956SH(2,0mg/L)	1,32
TanflocSG(20mg/L) + AN956SH(3,0mg/L)	1,14

Os ensaios realizados nesta etapa encontram-se entre a Figura 36 e Figura 43.

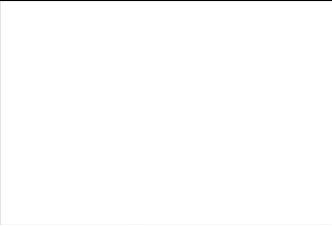
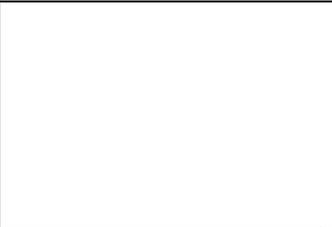
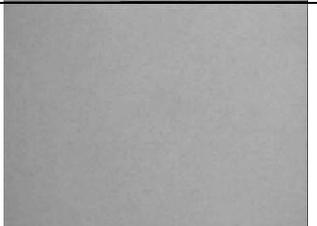
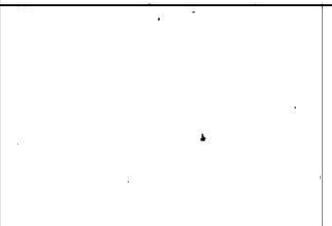
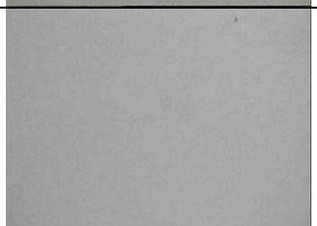
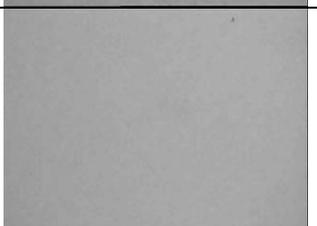
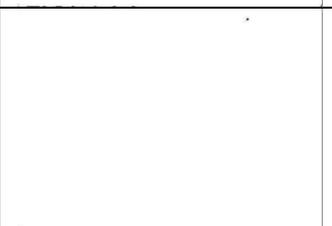
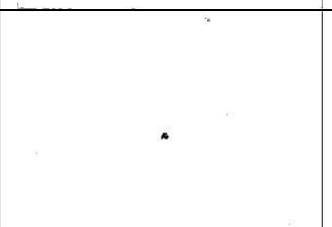
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 36. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero AN956SH (0,5mg/L).

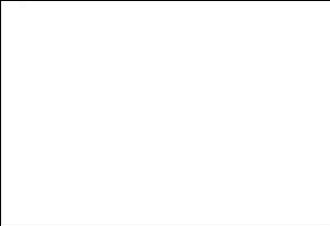
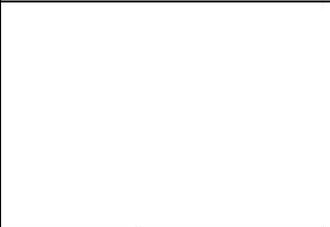
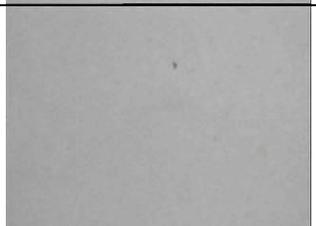
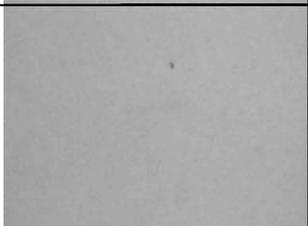
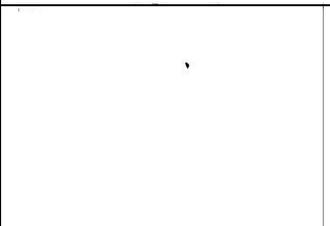
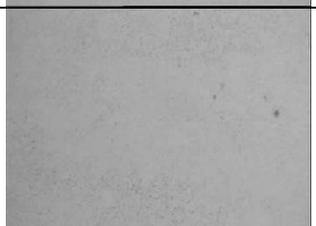
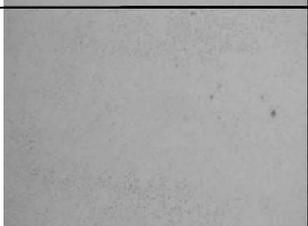
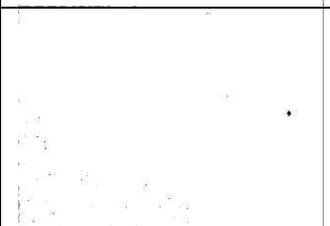
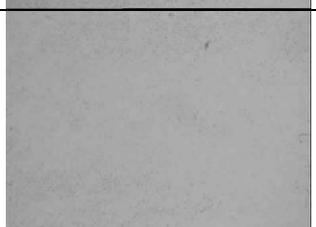
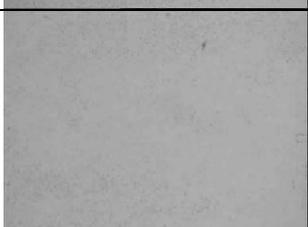
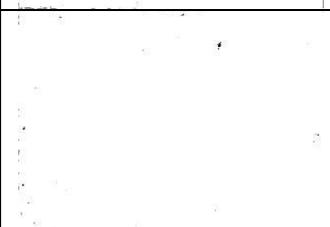
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 37. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero AN956SH (1,0mg/L).

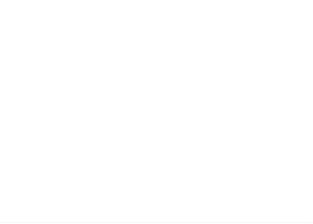
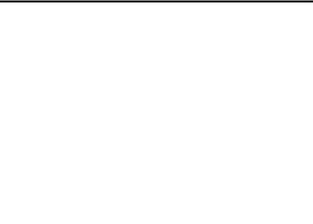
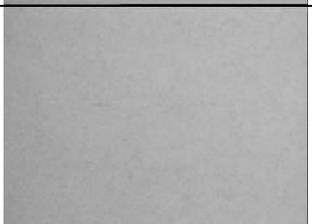
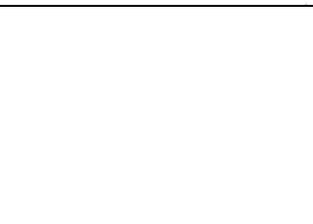
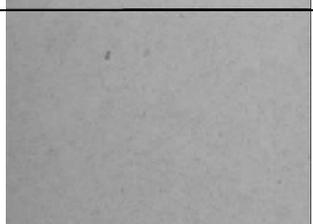
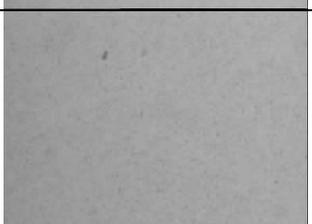
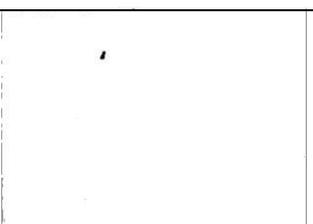
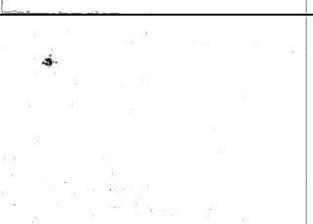
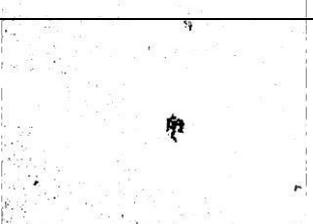
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 38. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero AN956SH (2,0mg/L).

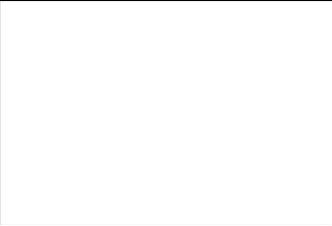
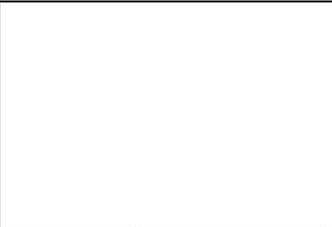
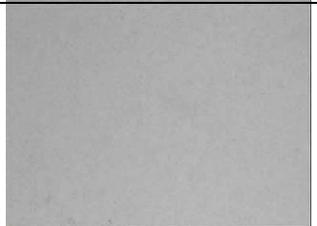
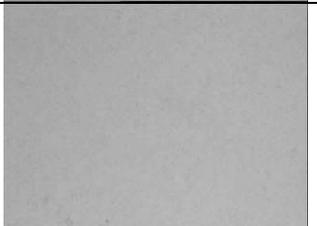
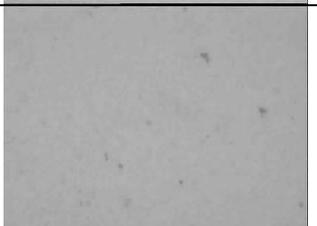
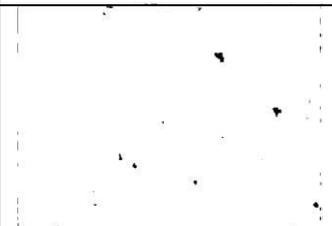
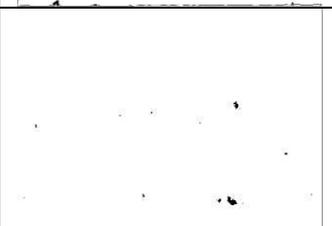
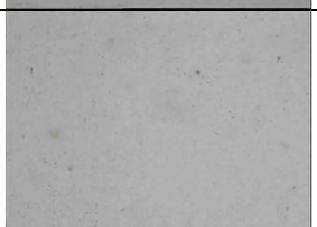
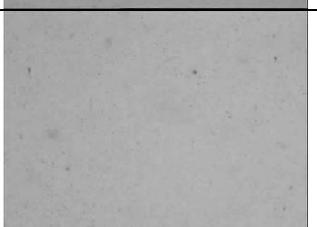
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 39. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero AN956SH (3,0mg/L).

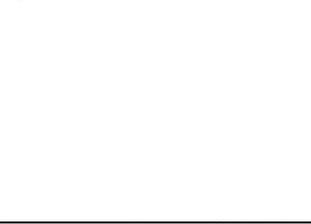
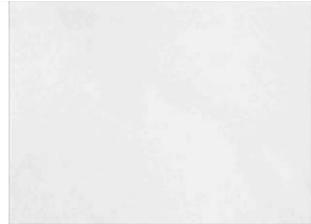
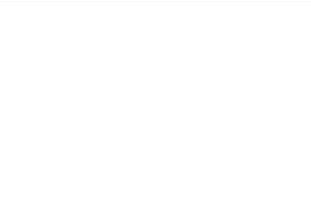
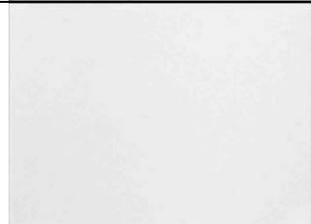
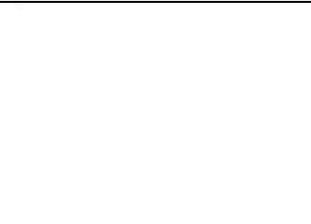
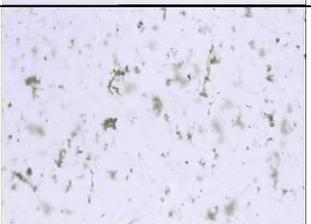
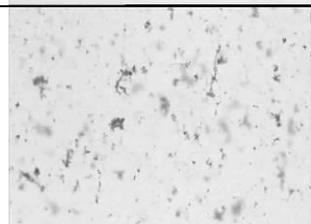
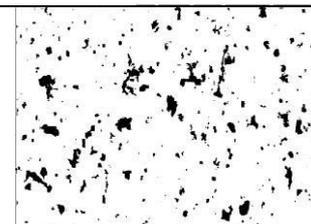
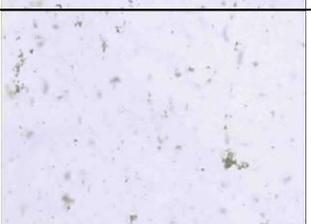
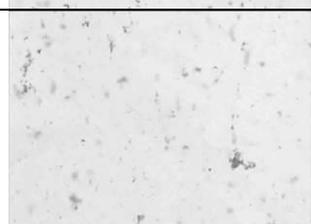
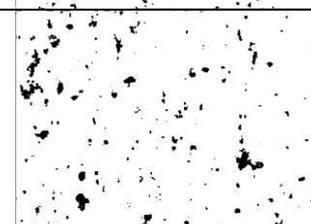
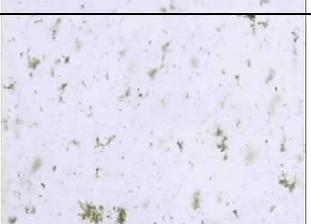
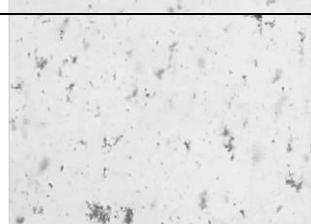
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 40. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero AN956SH (0,5mg/L).

Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 41. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero AN956SH (1,0mg/L).

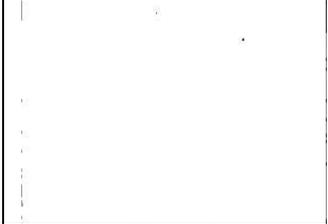
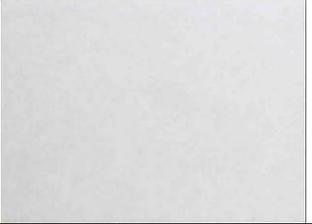
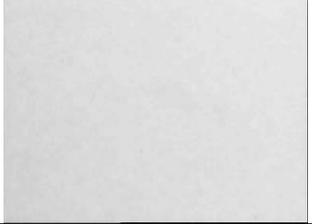
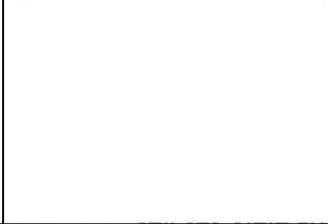
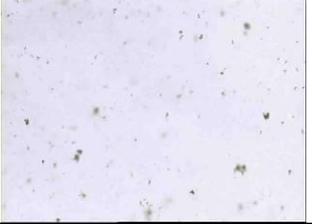
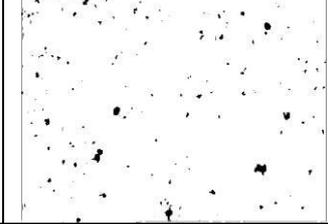
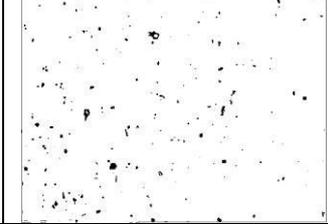
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 42. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero AN956SH (2,0mg/L).

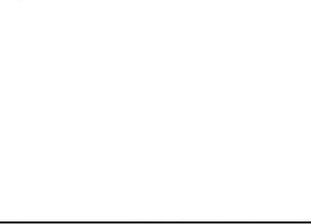
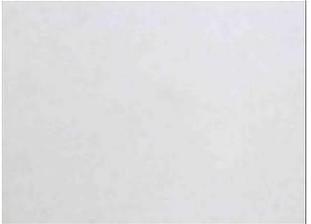
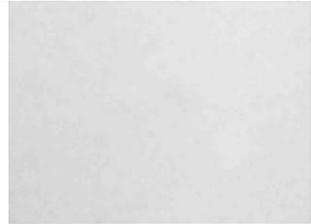
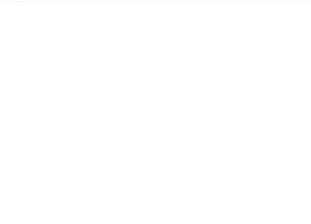
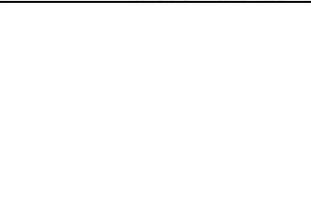
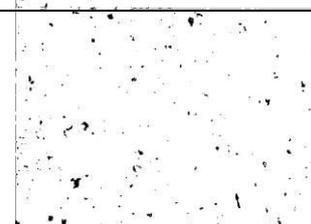
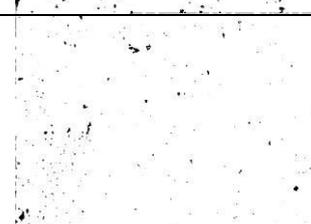
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 43. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero AN956SH (3,0mg/L).

4.3.3 Ensaios com polímero catiônico

4.3.3.1 Turbidez

Para os ensaios referentes ao polímero catiônico, todas as amostras testadas apresentaram valores de remoção de turbidez elevados após a agitação mecânica (Tabelas 20 e 21). Os ensaios correspondentes a concentração de 2,0 mg/L, para ambos coagulantes, forneceram valores de remoção de turbidez mais elevados.

Tabela 20. Valores de turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero FO4550SH.

Amostras	Turbidez (NTU)		
	Inicial	Pós FAD	Pós Agitação
FeCl ₃ (20mg/L) +FO4550SH(0,5mg/L)	77,5	11	12,3
	75,5	8,11	9,4
	75,6	7,88	8,47
FeCl ₃ (20mg/L) +FO4550SH (1,0mg/L)	78,5	7,12	7,73
	78,7	8,85	9,43
	86,9	5,97	5,79
FeCl ₃ (20mg/L) +FO4550SH (2,0mg/L)	81,6	2,49	3,09
	86,5	1,99	2,89
	88,3	1,94	3,12
Tanfloc SG(20mg/L)+FO4550SH (0,5mg/L)	78,8	4,14	4,51
	81,5	4,53	4,78
	75,7	3,43	4,41
Tanfloc SG(20mg/L)+FO4550SH (1,0mg/L)	75,2	2,41	2,47
	75,4	2,21	2,07
	73,5	2,26	2,9
Tanfloc SG(20mg/L)+FO4550SH (2,0mg/L)	85,7	2,1	2,3
	87	1,9	2,15
	78,6	1,7	1,98

Tabela 21. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero FO4550SH.

Amostras	Remoção de turbidez (%)	
	FAD	Agitação
	Média ± DP	Média ± DP
FeCl ₃ (20mg/L) +FO4550SH(0,5mg/L)	88,21 ± 2,09	86,83 ± 2,42
FeCl ₃ (20mg/L) +FO4550SH (1,0mg/L)	90,93 ± 2,18	90,50 ± 2,67
FeCl ₃ (20mg/L) +FO4550SH (2,0mg/L)	97,48 ± 0,46	96,44 ± 0,22
Tanfloc SG(20mg/L)+FO4550SH (0,5mg/L)	94,88 ± 0,52	94,19 ± 0,07
Tanfloc SG(20mg/L)+FO4550SH (1,0mg/L)	96,92 ± 0,14	96,67 ± 0,60
Tanfloc SG(20mg/L)+FO4550SH (2,0mg/L)	97,73 ± 0,16	97,44 ± 0,11

4.3.3.2 Porcentagem de área

Independentemente do coagulante e para todos os polímeros testados, o FO4550SH apresentou valores inferiores de α_a , considerando todas as concentrações empregadas (Tabela 22). Sendo este o mais vantajoso em termos de estabilidade do material flotado. Entre as Figuras 44 e 49 estão ilustrados os ensaios realizados correspondentes ao polímero catiônico.

Tabela 22. Valores do α_a para os ensaios com o polímero FO4550SH.

Amostras	α_a (%)
FeCl ₃ (20mg/L)+FO4550SH(0,5mg/L)	0,35
FeCl ₃ (20mg/L)+FO4550SH(1,0mg/L)	0,53
FeCl ₃ (20mg/L)+FO4550SH(2,0mg/L)	0,54
TanflocSG(20mg/L)+FO4550SH(0,5mg/L)	0,59
TanflocSG(20mg/L)+FO4550SH(1,0mg/L)	0,40
TanflocSG(20mg/L)+FO4550SH(2,0mg/L)	0,40

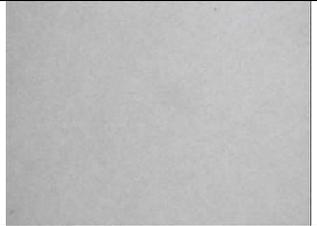
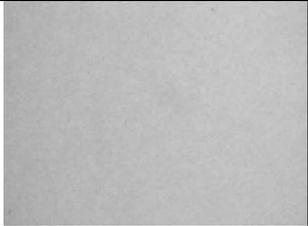
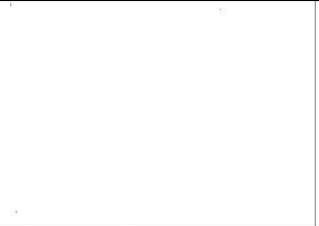
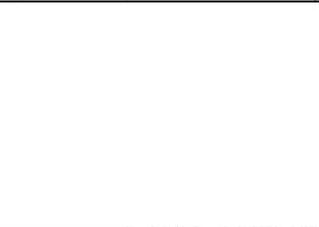
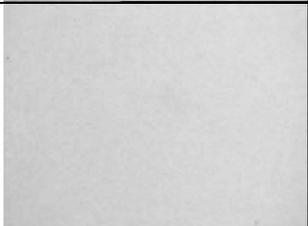
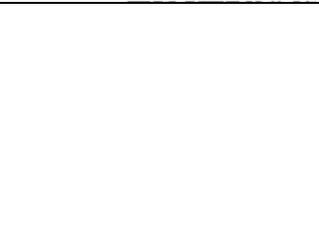
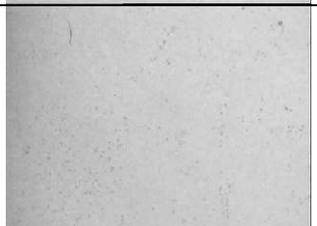
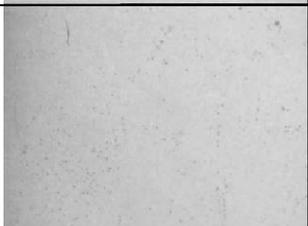
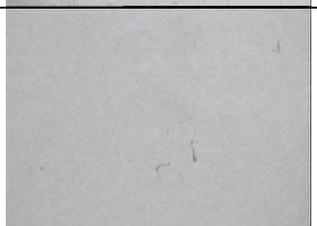
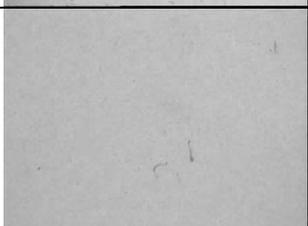
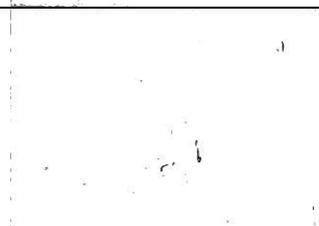
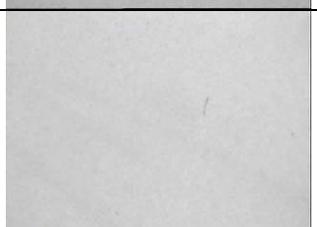
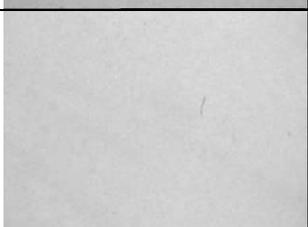
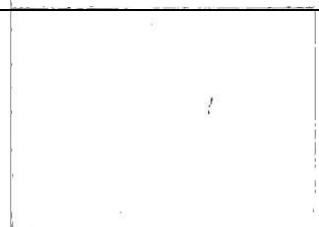
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 44. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FO4550SH (0,5mg/L).

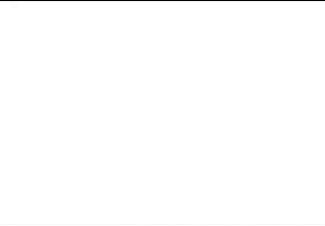
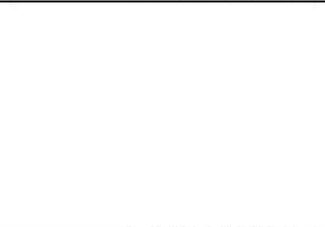
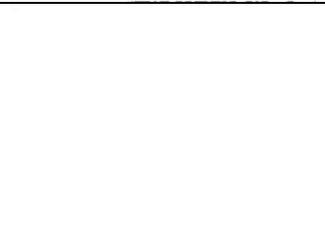
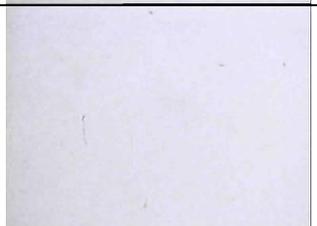
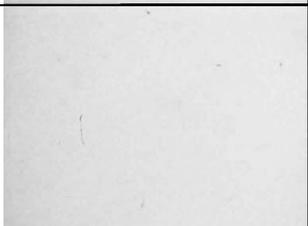
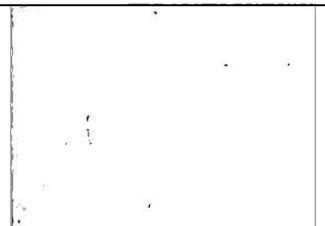
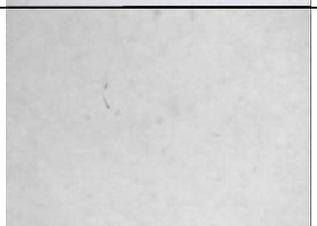
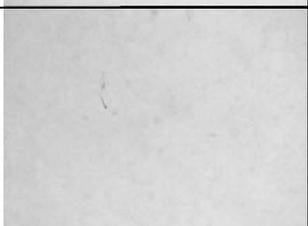
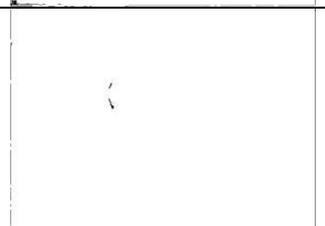
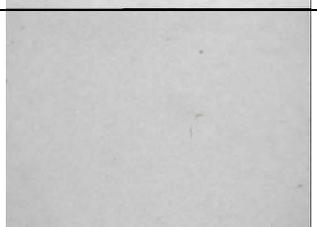
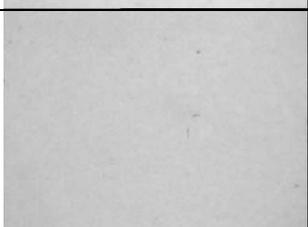
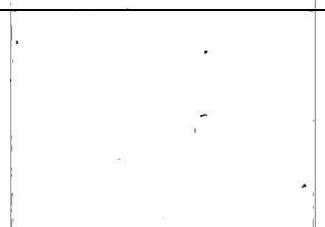
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 45. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FO4550SH (1,0mg/L).

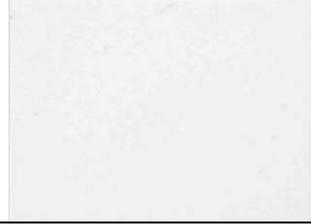
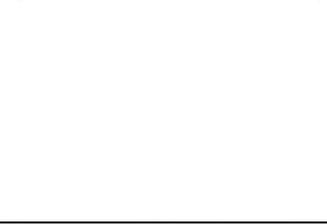
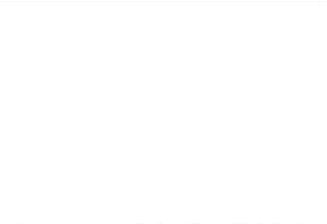
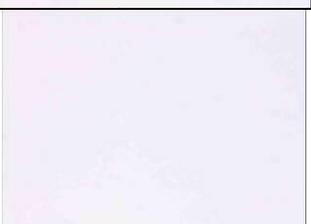
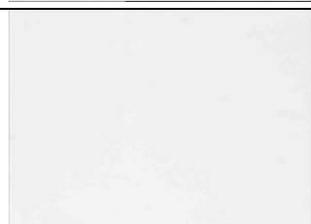
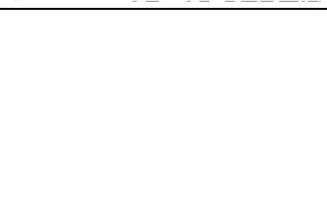
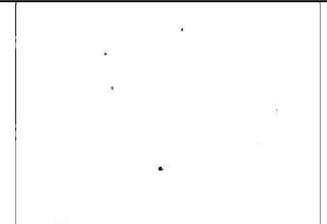
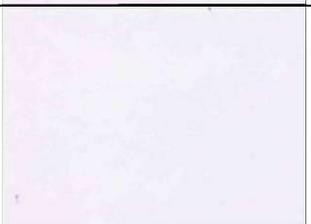
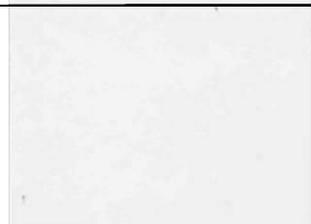
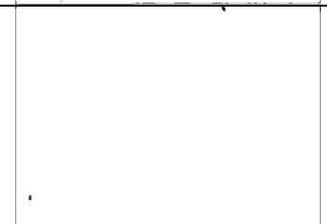
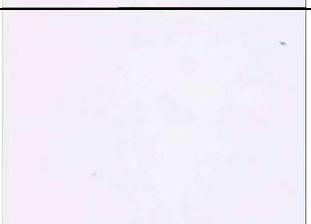
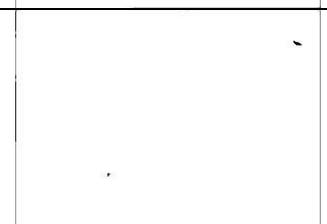
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 46. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FO4550SH (2,0mg/L).

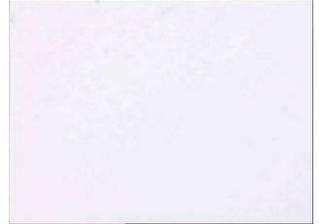
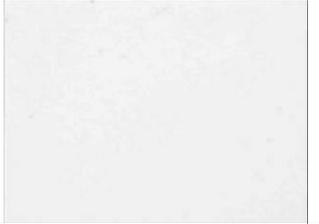
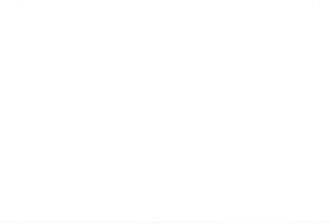
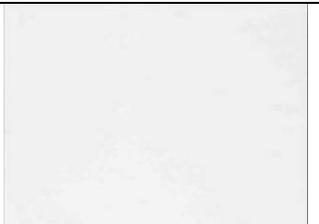
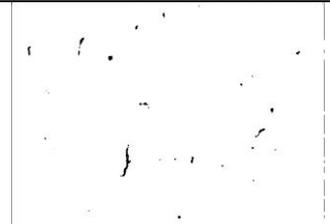
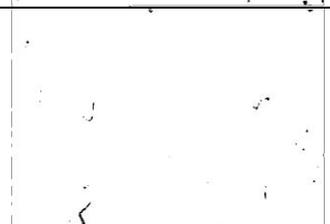
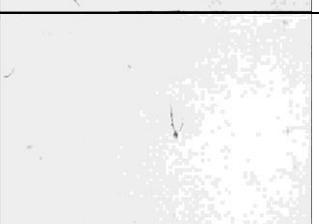
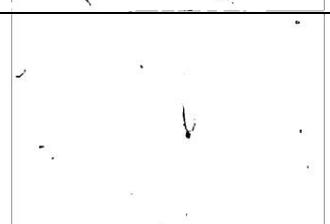
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 47. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FO4550SH (0,5mg/L).

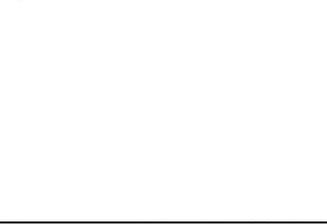
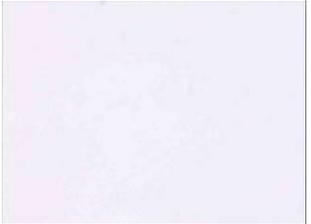
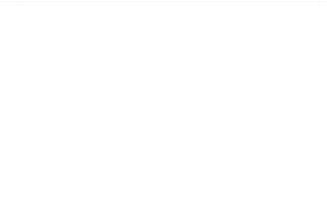
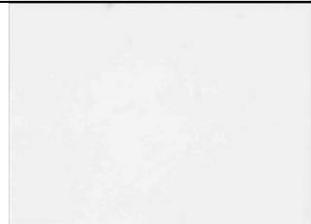
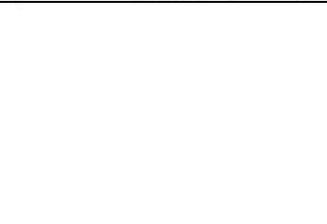
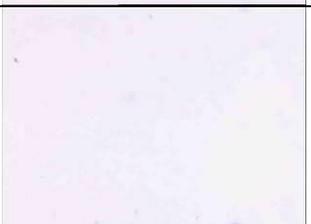
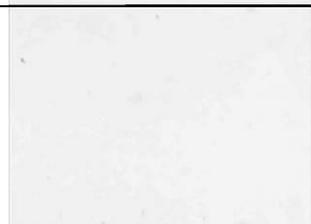
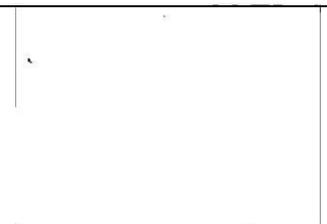
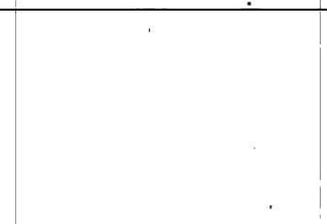
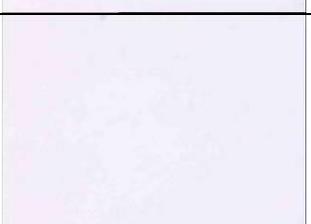
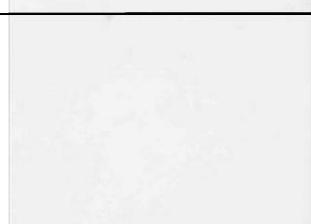
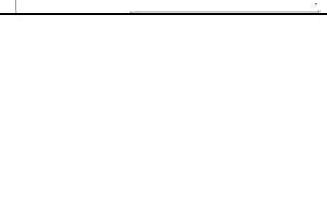
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 48. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FO4550SH (1,0mg/L).

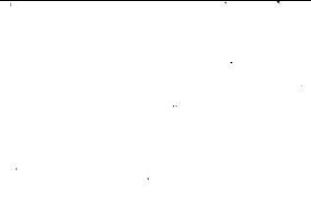
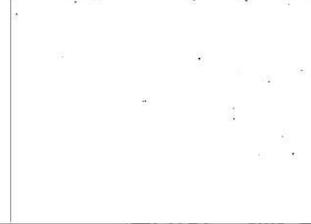
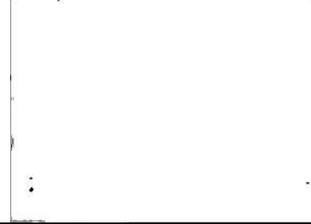
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 49. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FO4550SH (2,0mg/L).

4.3.4 Ensaios com polímero não iônico

4.3.4.1 Turbidez

O polímero FA920SH apresentou os menores percentuais de remoção de turbidez quando comparado aos polímeros catiônico e aniônico e também aos ensaios envolvendo apenas os coagulantes (Tabelas 23 e 24). Além disso, ressalta-se que houve uma diferença significativa entre as etapas pós FAD e pós agitação, ou seja, a estabilidade do material flotado foi menor.

Tabela 23. Valores da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero FA920SH.

Amostras	Turbidez (NTU)		
	Inicial	Pós FAD	Pós Agitação
FeCl ₃ (20mg/L)+FA920SH(0,5mg/L)	78,9	16,3	17,8
	77,9	16	17,3
	82,1	16,6	18,2
FeCl ₃ (20mg/L)+ FA920SH (1,0mg/L)	78,6	15,3	16,2
	79,5	14,9	16,8
	80,5	15,5	17,8
FeCl ₃ (20mg/L)+FA920SH (2,0mg/L)	84	14,7	17,61
	79,8	15,5	17,2
	78,7	14,83	16,6
FeCl ₃ (20mg/L)+FA920SH (3,0mg/L)	78,2	12,1	14,65
	79,8	11,8	13,7
	81,4	12,3	14,3
Tanfloc SG(20mg/L) + FA920SH (0,5mg/L)	77,7	11,6	14,2
	80,9	11,7	15,1
	73,5	12,6	17
Tanfloc SG(20mg/L) + FA920SH (1,0mg/L)	79,9	9,28	13,8
	79,1	9,3	15,5
	73,2	10,6	14,8
Tanfloc SG(20mg/L) + FA(2,0mg/L)	86,8	10,3	13,4
	86,4	11,9	14,2
	71	8,63	14,1
Tanfloc SG(20mg/L) + FA920SH (3,0mg/L)	85,9	7,62	13,6
	82,1	7,9	14,3
	87,5	8,2	13,7

Tabela 24. Remoção da turbidez após FAD e após agitação mecânica para as amostras realizadas com o polímero FA920SH.

Amostras	Remoção de turbidez (%)	
	FAD	Agitação
	Média ± DP	Média ± DP
FeCl ₃ (20mg/L)+FA920SH(0,5mg/L)	79,52 ± 0,23	77,69 ± 0,21
FeCl ₃ (20mg/L)+ FA920SH (1,0mg/L)	80,84 ± 0,37	78,71 ± 0,76
FeCl ₃ (20mg/L)+FA920SH (2,0mg/L)	81,41 ± 0,98	78,80 ± 0,31
FeCl ₃ (20mg/L)+FA920SH (3,0mg/L)	84,87 ± 0,34	82,17 ± 0,81
Tanfloc SG(20mg/L) + FA920SH (0,5mg/L)	84,49 ± 1,43	79,98 ± 2,70
Tanfloc SG(20mg/L) + FA920SH (1,0mg/L)	87,38 ± 1,61	80,97 ± 1,5
Tanfloc SG(20mg/L) + FA(2,0mg/L)	87,40 ± 1,02	82,75 ± 2,31
Tanfloc SG(20mg/L) + FA920SH (3,0mg/L)	90,71 ± 0,38	83,69 ± 0,97

4.3.4.2 Porcentagem de área

Os valores α quando comparados aos ensaios nos quais foram empregados apenas coagulantes foram inferiores. Entretanto, quando comparados às combinações testadas com polímeros catiônicos e aniônicos os valores α encontrados foram superiores (Tabela 25). Deste modo, o polímero FA920SH se mostrou ser mais estável que as amostras que continham apenas coagulantes, e menos estáveis em relação as amostras com polímeros iônicos, Nas Figuras 50 a Figura 57 se pode visualizar os ensaios realizados.

Tabela 25. Valores do α para os ensaios com o polímero FA920SH.

Amostras	α (%)
FeCl ₃ (20mg/L)+ FA920SH(0,5mg/L)	0,60
FeCl ₃ (20mg/L)+ FA920SH(1,0mg/L)	0,67
FeCl ₃ (20mg/L)+ FA920SH(2,0mg/L)	0,78
FeCl ₃ (20mg/L)+ FA920SH(3,0mg/L)	0,77
TanflocSG(20mg/L) + FA920SH(0,5mg/L)	2,42
TanflocSG(20mg/L) + FA920SH(1,0mg/L)	1,18
TanflocSG(20mg/L) + FA920SH(2,0mg/L)	1,93
TanflocSG(20mg/L) + FA920SH(3,0mg/L)	2,96

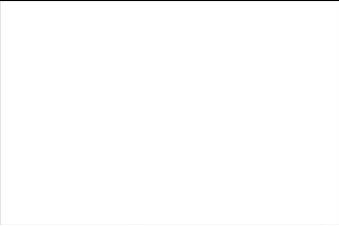
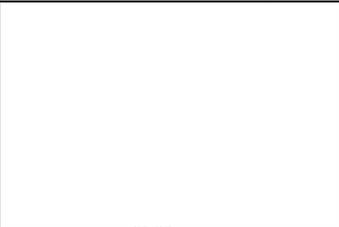
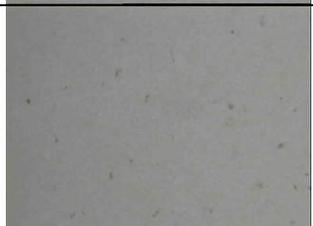
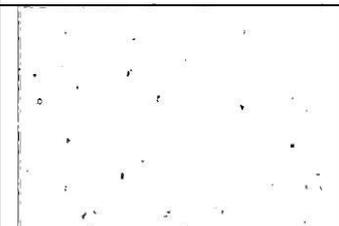
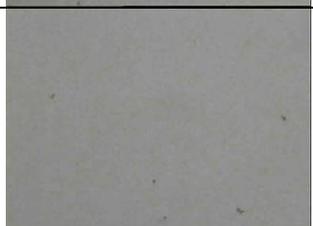
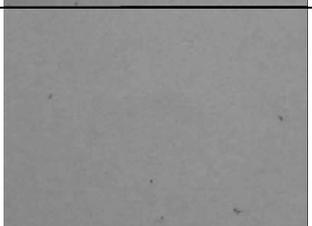
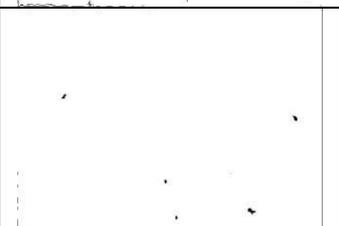
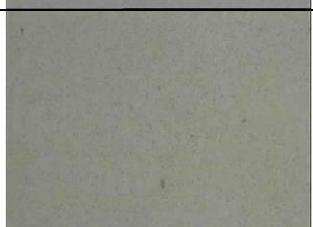
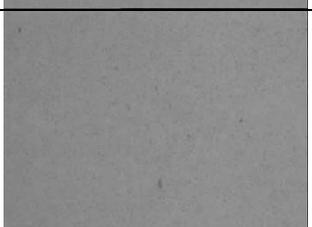
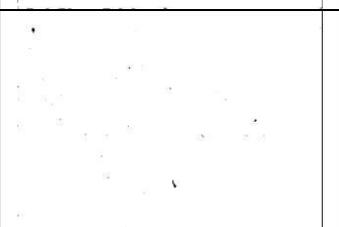
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 50. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FA920SH (0,5mg/L).

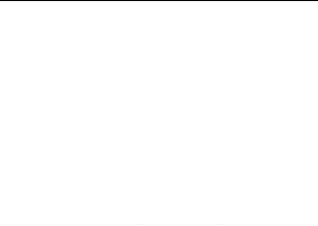
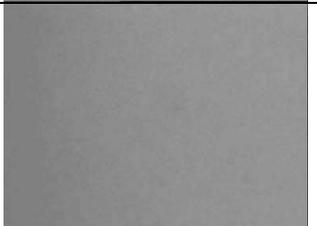
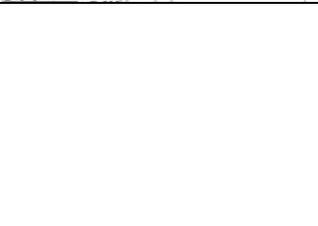
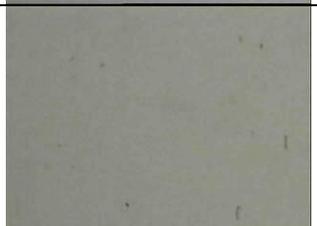
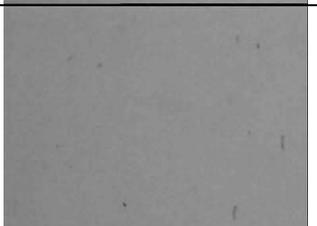
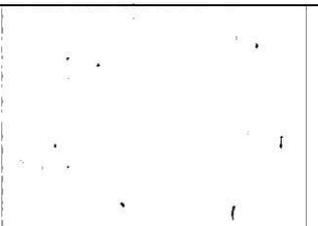
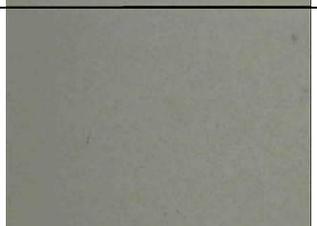
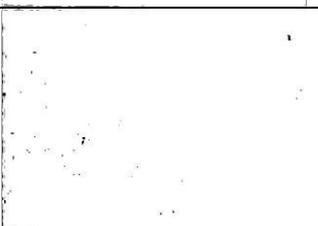
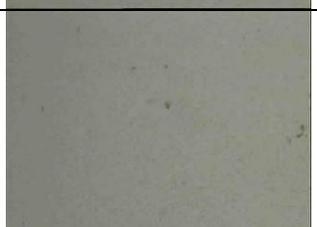
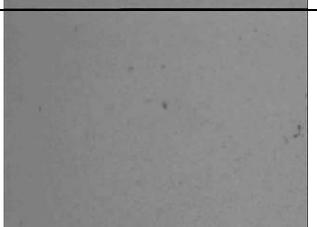
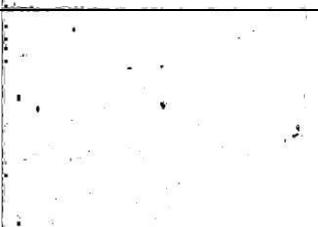
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 51. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FA920SH (1,0mg/L).

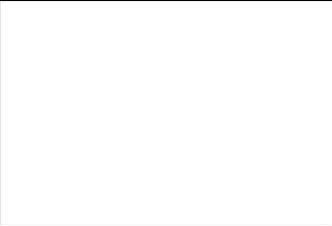
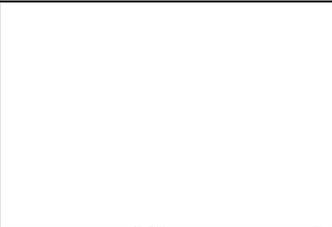
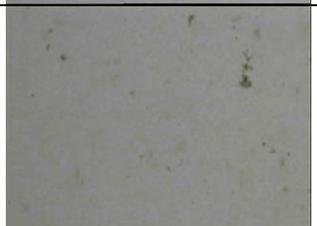
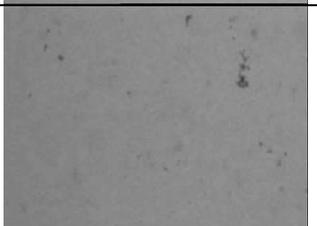
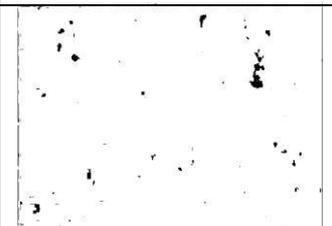
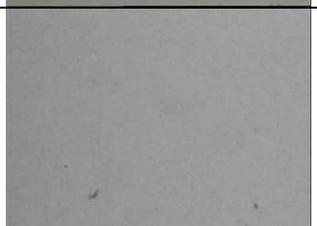
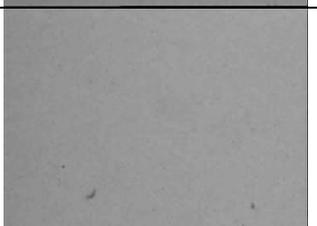
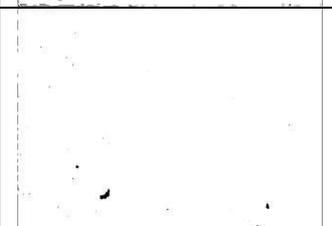
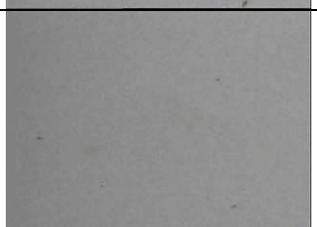
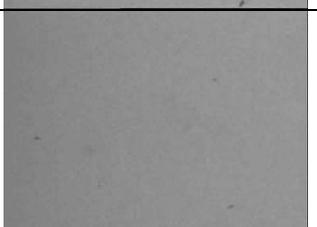
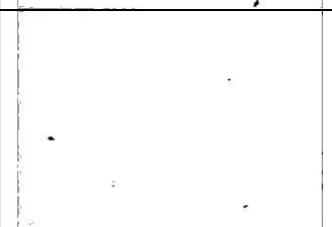
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 52. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FA920SH (2,0mg/L).

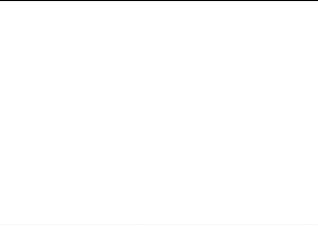
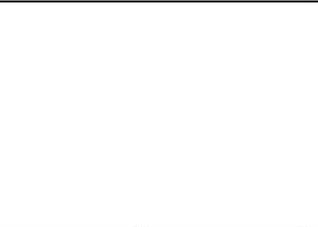
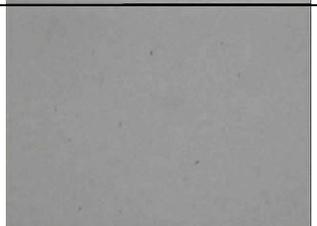
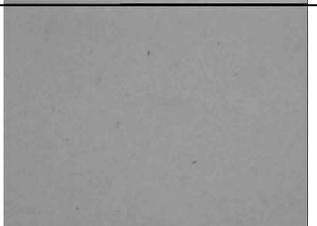
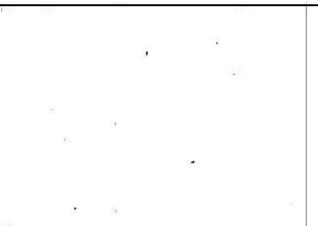
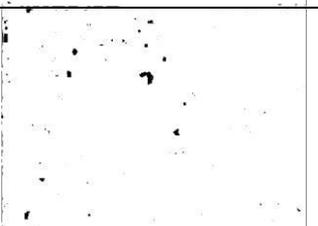
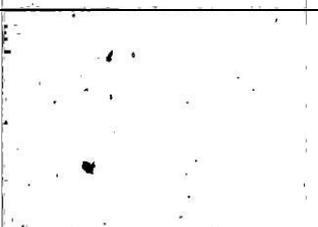
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 53. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante cloreto férrico (20mg/L) e polímero FA920SH (3,0mg/L).

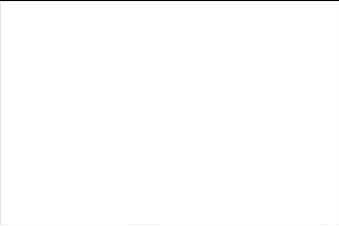
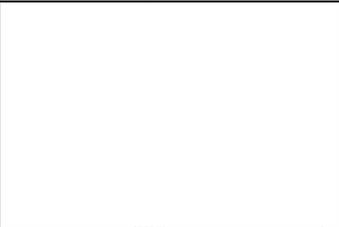
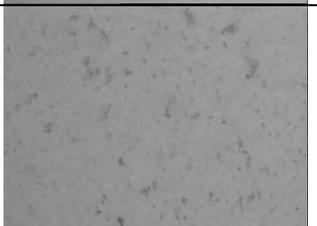
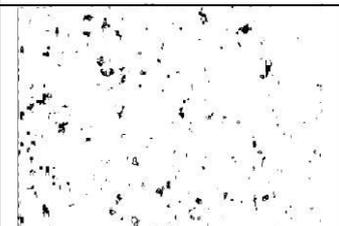
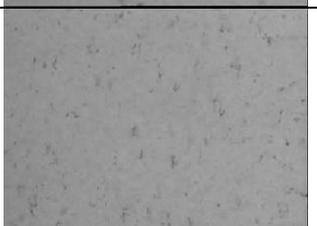
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 54. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FA920SH (0,5mg/L).

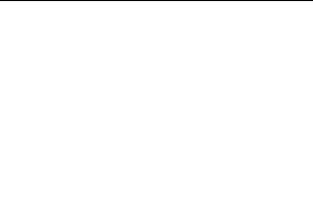
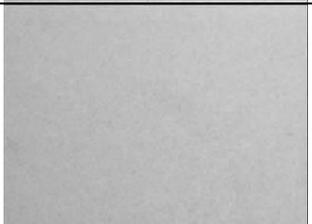
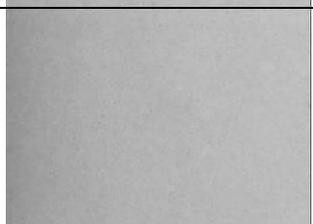
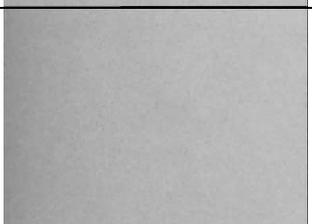
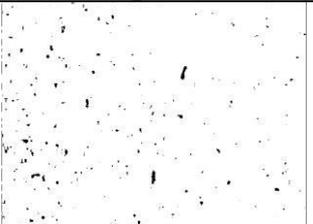
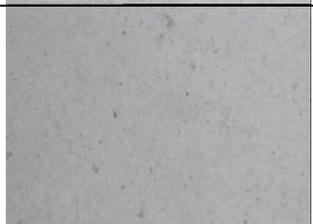
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 55. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FA920SH (1,0mg/L).

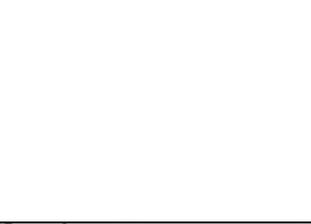
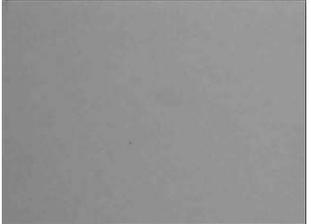
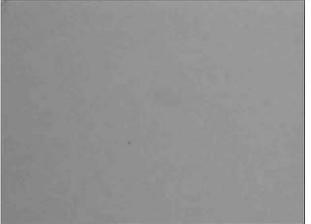
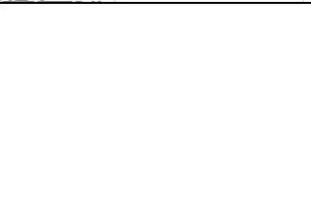
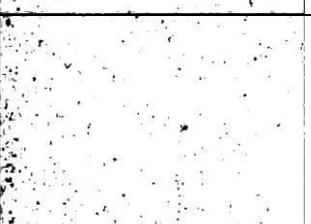
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 56. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FA920SH (2,0mg/L).

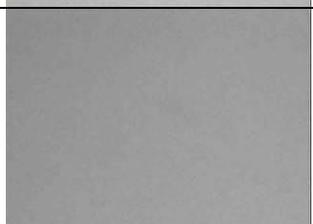
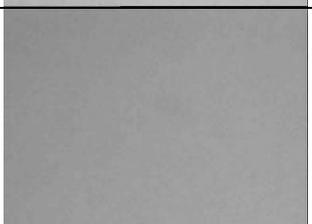
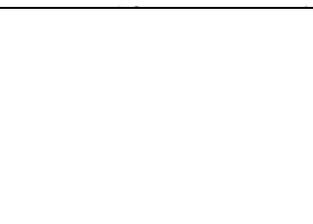
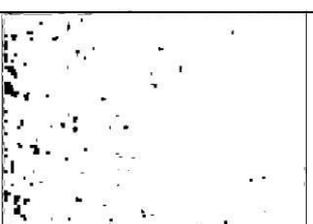
Ensaio		Ensaio Fotográfico		
		Versão Original	Versão Preto e Branco	Versão Binária
A p ó s F A D	I			
	II			
	III			
A p ó s A g i t a ç ã o	I			
	II			
	III			

Figura 57. Ensaio fotográfico da amostra correspondente ao coagulante Tanfloc SG (20mg/L) e polímero FA920SH (3,0mg/L).

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo permitem estabelecer as seguintes conclusões:

1. O processo de coagulação-floculação-FAD se mostrou eficiente para separação de algas cultivadas em uma lagoa de tratamento de efluentes de alta taxa.
2. Para o coagulante cloreto férrico a máxima remoção de turbidez alcançada foi de 95% para uma dosagem de 60mg/L e valores de pH entre pH 7 e 9.
3. Para o coagulante Tanfloc SG, o maior valor de remoção de turbidez foi de 98%, para uma dosagem de 60mg/L e pH 7.
4. O sistema de reagentes cloreto férrico + floculante, independente do tipo de polímero, apresentou separação de algas mais eficiente do que as amostras nas quais foi utilizado apenas coagulante (considerando uma dosagem de 20mg/L – 82,8%). O polímero catiônico FO4550SH foi mais eficiente, apresentando remoção de turbidez entre 89-93%, seguido do polímero aniônico AN956SH que apresentou remoção de turbidez entre 86-92%. O polímero não-iônico FA920SH produziu as menores remoções 82-85%.
5. Considerando a remoção de turbidez, o sistema de reagentes Tanfloc SG + floculante, resultou em valores mais elevados quando adicionado o polímero AN956SH, apresentando valores entre 96-98%, o polímero FO4550SH que apresentou valores entre 95-96%, e o polímero FA920SH entre 89-91%. Todos os polímeros apresentaram valores de remoção de turbidez superiores que o ensaio branco, porém os polímeros FA920SH e FO4550SH obtiveram resultados inferiores em termos de remoção de turbidez que o ensaio no qual se utilizou apenas o Tanfloc SG (considerando uma dosagem de 20mg/L – 97,5%).

6. Foi desenvolvido um procedimento experimental para avaliação da estabilidade do material flotado via análise de imagens. Neste procedimento foi adotado como parâmetro de resposta o índice “ α ”, sendo este o valor em % de pixels pretos (objetos) em relação ao número total de pixels da imagem. Este índice é proporcional a quantidade de coágulos e/ou flocos que foram redispersos em função da baixa estabilidade do material flotado quando sujeito a turbulência. Sua vantagem é o auxílio na avaliação de remoção de turbidez, especialmente nas amostras em que os coágulos e/ou flocos possuem tamanhos maiores e os valores no turbidímetro oscilam bastante.

7. Nos estudos em que foram utilizados somente coagulantes, os valores de α foram de 4,91 para FeCl_3 (20mg/L), 4,39 para FeCl_3 (60mg/L), 5,49 para Tanfloc SG (20mg/L) e 4,26 para Tanfloc SG (60mg/L), ou seja, o uso exclusivo de coagulantes não conferiu estabilidade ao material flotado, mesmo que estes apresentem um alto índice de remoção de turbidez.

8. O polímero catiônico produziu os melhores resultados de estabilidade do flotado. O FO4550SH proporcionou os menores valores de α (flotado com maior estabilidade), tanto para o cloreto férrico ($\alpha = 0,35$, para a combinação FeCl_3 20mg/L+FO4550SH 0,5mg/L) como para o Tanfloc SG ($\alpha = 0,40$, para as combinações TanflocSG20mg/L + FO4550SH 1,0 e 2,0mg/L). Considerando as seis amostradas testadas, os valores de α variaram entre 0,35 e 0,59, sendo este último valor obtido pela combinação de Tanfloc SG 20mg/L+FO4550SH 0,5mg/L.

9. O polímero aniônico apresentou valores intermediários, já que os α encontrados oscilaram bastante. Para o coagulante cloreto férrico o menor valor de α foi de 0,37 (para a condição FeCl_3 20mg/L+AN956SH 1,0 mg/L) e o maior de 0,69 (FeCl_3 20mg/L+AN956SH 2,0 mg/L). Entretanto, para o Tanfloc SG o menor

valor foi de 0,68 (Tanfloc SG 20 mg/L+ AN956SH 1,0mg/L) e o maior foi de 5,71. Este α foi o maior encontrado nesta pesquisa, e representa a amostra Tanfloc SG 20mg/L + AN956SH 0,5 mg/L.

10. O polímero não iônico apresentou menor estabilidade do material flotado quando comparado aos polímeros iônicos, ou seja, resultou em uma média de α com valores superiores. Além disso, o polímero FA920SH produziu uma maior estabilidade do material flotado com o coagulante cloreto férrico, gerando valores de α entre 0,6 (para a combinação FeCl_3 20 mg/L+FA920SH 0,5 mg/L) e 0,79 (FeCl_3 20 mg/L+FA920SH 3,0 mg/L). Todavia, para o Tanfloc SG, os valores variaram entre 1,18 (Tanfloc SG 20 mg/L+ FA920SH 1,0 mg/L) e 2,96 (Tanfloc SG 20 mg/L+ FA920SH 3,0 mg/L).

Para futuros trabalhos sugere-se que sejam testadas diferentes agitações mecânicas, variando as velocidades, rotações e tempos nas células de flotação. Também recomenda-se que seja testada a validação deste experimento em ensaios pilotos e industriais, realizando assim análises para processos contínuos. Adicionalmente, sugere-se análise econômica da FAD para separação de microalgas. Além disto, novas pesquisas poderiam utilizar outras metodologias para quantificar a estabilidade do material flotado, concomitante a análise de imagem. Por fim, sugere-se o desenvolvimento de um ensaio normalizado segundo a técnica proposta para quantificação da estabilidade do material flotado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, M.I., SAEZ, J.; LLORENS, M.; SOLER, A. AND ORTUNO, J.F. Microscopic Observation of Particle Reduction in Slaughterhouse Wastewater by Coagulation- Flocculation Using Ferric Sulphate as Coagulant and Different Coagulant Aids.2003.

AISSE M M; JÜNGENSEN, D; REALI M A P; PENETRA R G; FLORENCIO L; SOBRINHO P A. Pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de flotação. PROSAB 2. p 333 - 336, 2001.

ALLEN, T. Particle Size Measurement. In: Powder Sampling and Particle Size Measurement. Chapman and Hall, London.1997.

ALKHATIB, E.A., THIEM, L.T., Wastewater oil removal evaluated, Hydrocarbon Processing, pp. 77-80, August 1991.

ALVES, V. M., Tratamento por Coagulação-Floculação dos Lixiviados do Aterro Sanitário da Região Metropolitana de Florianópolis. Florianópolis, 2007.

ANDRADE NETO, C. O. Sistema simples para tratamento de esgotos sanitários: experiência brasileira. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

ASLAN S, KAPDAN IK. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. Ecological Engineering 2006;28(1): 64–70.

BACHE, D. H. AND PAPAVALOPOULOS, E. N. Dewatering of Alumino-Humic Sludge: Impacts of Hydroxide. Water Research 37 3289-3298, 2003.

BACHE, D.H., JOHNSON, C., MCGILLIGAN, J.F., RASOOL, E., A conceptual view of floc structure in the sweep floc domain. *Water Sci. Technol.* 36 (4), 49–56. 1997.

BARROSO, J. A. Produção de Biomassa de Algas em Lagoas de Alta Taxa Alimentadas com Esgoto Sanitário com Posterior Separação por Flotação Por Ar Dissolvido. Porto Alegre, 144p., 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; GÓMEZ-MUÑOZ, M. C. New coagulant agents from tannin extracts: Preliminary optimisation studies. *Chemical Engineering Journal*, v.162 n.3, p. 1019-1025, // 2010.

BENEMANN J. O . Systems and Economic Analysis of Microalgae Ponds for Conversion of CO₂ to Biomass, Final Report to the US Department of Energy. Pittsburgh Energy Technology Center, 1996.

BENEMANN, J., “Overview: Algae Oil to Biofuels”, NREL-AFOSR Workshop, Algae Oil for Jet Fuel Production, Arlington, VA, February 19, 2008, www.nrel.gov/biomass/pdfs/benemann.pdf.

BENEMANN, J.R., Opportunities and Challenges in Algae Biofuels Production *Algae World 2008*, Singapore, November 17–18, p. 15. 2008.

BENNETT, G. F., PETERS W. R.; The removal of oil from wastewater by air flotation: a review, *CRC Critical Review in Environmental Control* 18, pp. 189-253.

BIJL HL, WOLF JH, SCHAAP A, VISSER JMJ. Preparation of microbial polyunsaturated fatty acid containing oil from pasteurised biomass. US Patent 6727373; 2004.

BLACK, D. L., MCQUAY, M. Q. AND BONIN, M. P. Laser-Based Techniques for Particle Size Measurement: a Review of Sizing Methods and their Industrial Applications. *Progress in Energy and Combustion Science* 22 267-306. 1996.

BORGES, C. B. Biomassa de microalgas: separação da microalga marinha *nannochloropsis oculata* por coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

BRATBY, J., MARAIS, C.V.R., Flotation. In: Purchas, D.B. (Ed.), *Solid/liquid separation equipment scale-up*. Croydon: Upland Press, cap. 5, pp. 155-198, 1977.

BURNS, S.E., YIACOUMI, S., TSOURIS, C. (1997). Microbubble generation for environmental and industrial separations. *Separ. Purif. Technol.* 11. 221-232.

CADORIN, L. M., 2008. Desenvolvimento de técnicas de remoção de íons sulfato de efluentes ácidos de minas por precipitação química e flotação por ar dissolvido, 119 p., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), UFRGS, Porto Alegre.

CHAKRABORTI, R. J., ATKINSON, J. F. AND VAN BENSCHOTEN, J. E. Characterisation of Alum Flocc by Image Analysis. *Environmental Science and Technology* 34 3969-3976.2000.

CHISTI, Y. Microalgae: our marine forests. Book reviews. RICHMOND, A. (Ed). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Oxford: Blackwell Science, 2004. 566p.

CHISTI, Y., Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25, 294–306, 2007.

CHU, C.P., CHANG, B.V., LIAO, G.S., JEAN, D.S., LEE, D.J., Observations on changes in ultrasonically treated wasteactivated sludge. *Water Res.* 35, 1038–1046.2001.

CHUM, H.L., OVEREND, R.P. Biomass and renewable fuels. *Fuel Processing Technology*, 71(1–3), 187-195, 2001.

CLARK T. *Algae for Biofuel: An Overview*.Bérengère Pédeprat- Laméchinou, 2009.

COUSIN, C.P. AND GANCZARCZYK, J. Effects of Salinity on Physical Characteristics of Activated Sludge Flocs. *Water Quality Research Journal of Canada* 33 (4), 565-587.1998.

CRAGGS, R., PARK, J., HEUBECK, S., SUTHERLAND, D., High rate algal pond systems for low-energy wastewater treatment, nutrient recovery and energy production. *New Zeal. J. Bot.* 52(1), 60–73, 2014.

CRAGGS, R.J., HEUBECK, S., LUNDQUIST, T.J., BENEMANN, J.R., *Algae biofuel from wastewater treatment high rate algal ponds*. *Water Science and Technology*, 2010.

DELPHOS, P. J.; WESNER, G. M. Mixing, Coagulation, and Flocculation. In: E. E. Baruth, Tech. Ed., *Water Treatment Plant Design*, American Water Works Association, American Society of Civil Engineers, Ch. 6, 4th Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 2005.

DELUCCHI MA. *A Lifecycle Emissions Model (LEM): lifecycle emissions from transportation fuels; motor vehicles, transportation modes, electricity use heating and cooking fuels*. Main report UCD-ITS-RR-03-17; 2003.

DEMIRBAS A, DEMIRBAS I. Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Convers Manage* 2007;48:2386–98.

DEMIRBAS A. Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy* 2007;35:4661–70.

DEMIRBAS, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management* 50(1): 14-34.

DHARMARAJAH, A. H. AND CLEASBY, J. L. Predicting the Expansion Behaviour of Filter Media. *Journal of the American Water Works Association* 78 66-76.1986.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. São Carlos, RiMa, 2ed., 2.v, 2005.

DI BERNARDO, L; MINILLO, A; DANTAS, A.D.B *Florações de Algas e de Cianobactérias: Suas Influências na Qualidade da Água e nas Tecnologias de Tratamento*. 1ª ed.. São Carlos (SP): Editora LdiBe, 2010.

DISMUKES G.C.; CARRIERI, D.; BENNETTE, N.; ANANYEV G.M.; POSEWITZ M.C. Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based crops for biofuels. *Current Opinion in Biotechnology*, 2008.

ECKENFELDER W. Jr. *Industrial Water Pollution Control*, Mc Graw-Hill, New York, 2000.

ECKENFELDER, W. (1989). *Industrial water pollution control*. 2. ed. New York: McGraw-Hill. 203 p.

EDZWALD J. K. Principles and applications of dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, 31, 1-23, 1995.

EDZWALD, J. K., HAARHOFF, J. *Dissolved Air Flotation for Water Clarification*. Published by McGraw-Hill, 2011.

EDZWALD, J.K. Dissolved air flotation and me. *Water research*, v. 44, n. 7, p. 2077-2106, 2010.

EDZWALD, J.K.; WINGLER, B.J. Chemical and physical aspects of dissolved-air flotation for the removal of algae. *Aqua AQUAAA*, v. 39, n.1, 1990.

ELLIS, M.M., FISCHER, P.W., Clarifying oilfield and refinery waste waters by gas flotation, *Journal of Petroleum Technology*, pp. 426-430, April 1973.

FALLOWFIELD, H. J.; CROMAR, N. J. & EVISON, L. M. Coliforme die-off rate constants in high rate algal pond and the effect of operational and environmental variables. *Water Science Technology*, v. 34, n 11, p 141-147, 1996.

FARROW, J. AND WARREN, L. (1993) Measurement of the Size of Aggregates in Suspension. In: *Coagulation and Flocculation – Theory and Applications*, pp. 391- 426, New York.1993.

FÉRIS, L.A. & RUBIO, J. Dissolved air flotation (DAF) performance at low saturation pressures. *Filtration & Separation*, 36:9, p.61-65, 1999.

FIGUEIREDO, I.C. Avaliação de desempenho do processo cept (chemically enhanced primary treatment) no tratamento primário de esgotos domésticos. Tese de doutorado apresentada ao Programa de pós-graduação em

Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. 135 f.

FITZPATRICK, S. B., FRADIN, E. AND GREGORY, J. Temperature Effects on Flocculation Using Different Coagulants. In: Proceedings of the Nano and Micro Particles in Water and Wastewater Treatment Conference; International Water Association: Zurich, September 2003.

FRANCOIS, R.J. Strength of aluminium hydroxide flocs. Water Res. 21, 1023–1030.1987.

GRAHAM, N. et al. Characterisation and coagulation performance of a tannin-based anionic polymer: A preliminary assessment. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, n. 327, p. 9-16, 2008.

GREGOR J. E. ; NOKES C. J. ; FENTON E. Optimising Natural Organic Matter Removal From Low Turbidity Waters by Controlled pH Adjustment of Aluminium Coagulation, Water Research, v.31, n.12,1997.

GREGORY . R., EDZWALD, J.K. (2010). Sedimentation and Flotation. Water quality and treatment, 6th ed. Mc Graw-Hill, New York.

GREGORY, J. AND DUPONT, V. Properties of Floccs Produced by Water Treatment Coagulants. Water Science and Technology 44, 231-236.2001.

HADIYANTO, H., ELMORE, S., GERVEN, T.V., STANKIEWICZ, A., Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. Chem. Eng. J. 217, 231–239, 2013.

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

HAN, M., PARK, Y., SHIM, J. Effect of pressure on bubble size in dissolved air flotation. *Water Science et Technology: Water Supply*. December 2002, 2 (5-6) 41-46.

HO, S. H., HUANG, S.W., CHEN, C.Y., HASUNUMA, T. c, Kondo, A., CHANG, J.S. Characterization and optimization of carbohydrate production from an indigenous microalga *Chlorella vulgaris* FSP-E. *Bioresource Technology*, 2012. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.100](http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.100).

HOEFLICH, V.A. Cultivo da acácia-negra. Brasil, 2003.

HOEK, C. van den et al. *Algae: an introduction to phycology*. London: Cambridge University, 1995. 623p.

HOSNY, A.Y., Separation of oil from oil/water emulsions using an electroflotation cell with insoluble electrodes, *Filtration & Separation*, pp. 419-423, September/October 1992.

HU, D., LIU, H., YANG, C., & HU, E. The design and optimization for light-algae bioreactor controller based on Artificial Neural Network-Model Predictive Control. *Acta Astronautica*, 63, 1067-1075, 2008.

KANEL JS, GUELCHER SA. Method for rupturing microalgae cells. US Patent 6000551; 1999.

KITCHENER, J. A. & GOCHIN, R. The mechanism of dissolved air flotation for potable water basic analysis and a proposal. *Water Research*, 15, 585-590., 1981.

LAMB, L. H.; DECUSATI, O.G. Manufacturing process for quaternary ammonium tannate, a vegetalbe coagulating/flocculating agent: Tanac S.A. 2002.

LAVOIE A, de la NOUE J (1987) Harvesting of *Scenedesmus obliquus* in wastewaters: auto or bioflocculation. *Biotechnol Bioeng* 30:852-859.

LEECH, C. A. Oil flotation processes for cleaning oil field produced water. AICHE Annual Meeting, Houston, 1987.

LEENTVAAR, J. AND REBHUN, M. Strength of Ferric Hydroxide Floccs. *Water*.1983.

LEITE, G.B., Abdelaziz, A.E.M., Hallenbeck, P.C., Algal biofuels: challenges and opportunities. *Bioresour. Technol.* 145, 134–141, 2013.

LETTERMAN, R.D.; AMIRTHARAJAH, A.; O'MELIA, C.R. Coagulation and Flocculation. In: (Ed.). *Water Quality and Treatment*. 5th. New York: McGraw Hill Inc., 1999. Cap.6.

LI Y, HORSMAN M, WU N, LAN CQ, DUBOIS-CALERO N. Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress* 2008;24(4):815–20.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3ª Ed. Campinas: Átomo, 2010.

LIU J. C.; CHEN Y. M.; JU Y-H. Separation of algal cells from water by column flotation.1999.

MANGRICH, A.S. et al. Química Verde no Tratamento de Águas: Uso de Coagulante Derivado de Tanino de Acacia mearnsii Ver. Virtua Quim., v.6, n.1, 2013.

MANNING, A. J. AND DYER, K. R. A Laboratory Examination of Floc Characteristics with Regard to Turbulent Shearing. Marine Technology 160 147-170.1999.

MATA, T.M., MARTINS, A.A. &CAETANO, N.S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. Renewable and sustainable energy reviews.

MATIS E ZOUBOULIS. 1995. Flotation Science and Engineering. Edited by K.A. New York.

MATOS, A.; CARNABELLAS, C.; CECON, P.; MOZART, B.; MUDADO, S. Efeito da concentração de coagulantes e do ph da solução na turbidez da água, em recirculação, utilizada no processamento dos frutos do cafeeiro. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.2, p.544-551, maio/ago. 2007. ISSN 100-6916.

MCCURDY, K., CARLSON, K. AND GREGORY, D. Floc Morphology and Cyclic Shearing Recovery: Comparison of Alum and Polyaluminium Chloride Coagulants. Water Research 38 486-494. 2004.

METCALF, E. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. New York: McGraw-Hill, 3 th ed., 1991.

METTING, F.B. 1996. Biodiversity and application of microalgae. *Journal of industrial microbiology*.

MIKKELSEN, L.H., KEIDING, K., The shear sensitivity of activated sludge: an evaluation of the possibility for a standardised floc strength test. *Water Res.* 36, 2931–2940.2002.

MONTEGGIA L O; TESSELE F, Remoção físico-química de algas e fósforo de efluentes de lagoas de alta taxa. Em: Chenicharo C, (coordenador).Coletânea de Trabalhos Técnicos - Volume 2. Pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. PROSAB 2. p 97- 102, 2001.

MORAINE R., SHELEF G., MEYDAN A., LEVI A. (1979). Algal single cell protein from wastewater treatment and renovation process. *Biotechnology and Bioengineering* 21:1191-1207,

NORTON, T.A et al. Algal biodiversity. *Phycologia*, n.35, p.308–326, 1996.

OSWALD W. J. ;GOULEKE C. G. & TYLER R. W. Integrated Pond Systems for subdivisious. *Jornal of the Pollution Control Federation.* v. 39, p 1289-1304, 1997.

OSWALD W. J. Introduction to advanced integrated wastewater ponding systems. *Water Science Technology*, v. 24, n. 5, p. 1-7, 1991.

OSWALD, W.J., GOLUEKE, C.G., Biological transformation of solar energy. *Advances in Applied Microbiology*, 1960.

P. JARVIS, B. JEFFERSON, J. GREGORY, S.A. PARSONS , A review of floc strength and breakage. *Water Research* 39 (2005) 3121–3137. 2005,

PARK, J.B.K., CRAGGS, R.J., Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Science and Technology* 61, 633–639, 2010.

PARKER, D.S., KAUFMAN, W.J., JENKINS, D., Floc breakup in turbulent flocculation processes. *J. Sanit. Eng. Div.: Proc. Am. Soc. Civ. Eng. SA1*, 79–99. 1972.

PAVANELLI, G. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. *Dissertação (Mestrado)*, Universidade de São Paulo, 2001.

POWELL, N., SHILTON, A., PRATT, S., CHISTI, Y., Luxury uptake of phosphorus by microalgae in full-scale waste stabilisation ponds. *Water Science and Technology*, 2010.

PULZ, O.; GROSS, W. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology Biotechnology*, v.65, p.635-648, 2004.

QIN J. 2005. Bio-hydrocarbons from algae – impacts of temperature, light and salinity on algae growth. Barton, Australia. Rural industries research and development Corporation. RIRDC Publication.

RAJA R, HEMAI SWARYA S, KUMAR NA, SRIDHAR S, RENGASAMY R. A perspective on the biotechnological potential of microalgae. *Critical Reviews in Microbiology* 2008;34(2):77–88.

RAVEN, P.H. et al. *Biologia vegetal*. 6.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001. 906p.

RAWAT, I., RANJITH KUMAR, R., MUTANDA, T., BUX, F., Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Appl Energy* 88, 3411–3424, 2011.

REALI, M. A. P. Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

REBHUN, M. AND LURIE, M. Control of Organic Matter by Coagulation and Floc Separation. *Water Science and Technology* 27(11), 1-20.1993.

REDA,, A.I.A-S., HWANG, J-H., CHO, Y., MIN, B. & JEOS, B-H. 2011. Characterization of microalgal species isolated from fresh water bodies as a potential source for biodiesel production. *Applied energy*.

RICHMOND A. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. Blackwell Science Ltd; 2004.

RODOLFIL. ; ZITTELLI G. C. ; BASSI N. ; PADOVANI G. ; BIONDI N. ; BONINI G. 2009. Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*. 102(1):100-120.

RODRIGUES R. T. Desenvolvimento da técnica LTM-Bsizer para a caracterização de bolhas e avaliação de parâmetros no processo de flotação Tese de Doutorado, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, 2004.

RODRIGUES R. T. Princípios e Aplicações da Flotação por Ar Dissolvido (FAD), UFRGS, 2013.

RODRIGUES R. T. Tratamento de águas oleosas de plataformas marítimas por flotação por ar dissolvido. Porto Alegre, 1999. 101 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGE3M, Porto Alegre.

ROSA J. Tratamento de efluentes oleosos por floculação pneumática em linha e separação por flotação - processo FF. Universidade do Rio Grande do Sul, 2002.

ROSA, J., RUBIO, J., RODRIGUES, R. T., Santander, M., Wilberg. K., Amaral, S., Relatório técnico de avanços: Célula de flotação centrífuga e coluna, Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental-LTM, Escola de Engenharia, UFRGS, 1997.

ROSENBERG JN, OYLER GA, WILKINSON L, BETENBAUGH MJ. A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. *Current Opinion in Biotechnology* 2008;19(5):430–6.

RUBIO J, SOUZA M. L., SMITH R. W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Miner Eng. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA, 2002.

RYKAART E.M, HAARHOJJ J., 1995. Behavior of air injection nozzles in dissolved air flotation, *Wai Sei Teeb*.

SANTOS H. R. Aplicação de Coagulantes no Efluente de Reator Anaeróbio de Leito Expandido Alimentado com Esgoto Sanitário. São Carlos, 2001.

SCHENK P. M. ; THOMAS-HALL S. R. ; STEPHENS E. ; MARX U. C. ; MUSSGUNG J. H. ; POSTEN C. ; KRUSE O. ; Hankamer B. *Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production*, 2008.

SELLNER K. G. ; DOUCETTE G. J. ; KIRKPATRICK G. J. Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. J Ind Microbiol Biotechnol, 2003.

SELOMULYA, C., AMAL, R., BUSHELL, G., AND WAITE, T.D. Evidence of Shear Rate Dependence on Restructuring and Break-up of Latex Aggregates. Journal of Colloid and Interface Science 236 67-77. 2001.

SENSOZ S, ANGIN D, YORGUN S. Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed (*Brassica napus* L.): fuel properties of bio-oil. Biomass Bioenergy 2000;19:271–9.

SHARMA AK, SPUDICH JL, DOOLITTLE WF (2006) Microbial rhodopsins: functional versatility and genetic mobility. Trends Microbiol 14:463-469.

SHEEHAN J, CAMBRECO V, DUFFIELD J, GARBOSKI M, SHAPOURI H. An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles. A report by US Department of Agriculture and Energy, Washington, DC; 1998. p. 1–35.

SHEEHAN J, DUNAHAY T, BENEMANN J, ROESSLER P. A look back at the Department of Energy's aquatic species program: biodiesel from algae NREL/TP-580-24190, National Renewable Energy Laboratory, USA; 1998.

SILVA FILHO, P.A. Diagnóstico Operacional de Lagoas de Estabilização. Dissertação (Mestrado): Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa Regional de Pós- Graduação em Engenharia Sanitária, 2007.

SILVA S. A. & MARA D. D. Tratamento biológicos de águas residuárias: lagoas de estabilização. Rio de Janeiro, ABES. 140p, 1979. SINCERO, A.P.

SINCERO, G.A. Coagulation. In: PRES, C. (Ed.). Physical-chemical treatment of water and wastewater: IWA Publishing, 2003. ISBN 1843390280.

SOLARI, J.A., 1981. Avanços recentes no tratamento de efluentes por flotação a ar dissolvido. Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, 20(3), pp. 332-335, 1981.

SPICER, P.T. AND PRATSINIS, S.E. Shear-Induced Flocculation: the Evolution of Floc Structure and the Shape of the Size Distribution at Steady State. Water Research 3 (5), 1049-1056. 1996.

SPOLAORE, P., JOANNIS-CASSAN, C., DURAN, E. & ISAMBERT, A. 2006. Commercial applications of microalgae. Journal of bioscience and bioengineering.

STEARNS, J.V. Fine particle flotation and the influence of dissolved gas on interparticle interactions, Doctor Thesis, University of South Australia. 2001.

TAKAHASHI T, MIYAHARA T., MOCHIIZUKI H, 1979. Fundamental study of dissolved air pressure flotation, J Chem Eng Japan.

TAMPIER, M., Microalgae Technologies and Processes for Biofuels/Bioenergy Production in British Columbia: Current Technology, Suitability and Barriers to Implementation Prepared for The British Columbia Innovation Council. January 14, 2009.

TCHOBANOGLOUS G. ; BURTON F. ; STENSEL D. Wastewater Engineering, Metcalf & Eddy, Mc Graw Hill. 2003.

TEIXEIRA, M. A. & ONOYAMA, M. T. 1991. Remoção de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio de esgotos domésticos utilizando o processo de lagoas de alta taxa. Revista DAE-SABESP, n. 161, p. 6-13.

TEIXEIRA, M. R., SOUSA, V. & ROSA, M. J., Investigating dissolved air flotation performance with cyanobacterial cells and filaments. *Water Research*, 44, 3337-3344, 2010.

TEIXEIRA, M. R.; ROSA, M. J. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*. Part I: The key operating conditions . *Separation and purification technology*, n. 52, 2006.

TEIXEIRA, M.R.; ROSA, M.J. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*. Part II. The effect of water background organics. *Separation and Purification Technology*, v. 53, n.1, p. 126-134, 2007.

TOMASELLI, L. The microalgal cell. In: RICHMOND, A. (Ed). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Oxford: Blackwell Science, 2004. p.3-19.

UDUMAN, N., QI, Y., DANQUAH, M.K., FORDE, G.M., HOADLEY, A., Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels. *J. Renew. Sustainable Energy*, 2010.

VAN HARMELEN, T., OONK, H., *Microalgae biofixation processes: applications and potential contributions to greenhouse gas mitigation options* TNO Built Environmental and Geosciences. Apeldoorn. Prepared for the International Network on Biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with Microalgae. Operated under the International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme, The Netherlands (Order No. 36562), 2006.

VAN PUFFELEN, J. et al. Dissolved air flotation in potable water treatment: the Dutch experience. *Water Science and Technology*, v. 31, n.3, p. 149-157, 1995.

VINNETT, L., ALVAREZ-SILVA, M. Indirect estimation of bubble size using visual techniques and superficial gas rate. *Minerals Engineering*. V. 81, p. 5-9, 2015.

VON SPERLING, MARCO. Princípios de tratamento biológicos de águas residuárias. Minas Gerais, Departamento de engenharia sanitária e ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. vol.3., 134p, 1996.

WAITE, T. D. Measurement and Implications of Floc Structure in Water and Wastewater Treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 151 27-41. 1999.

WANG B, LI Y, WU N, LAN CQ. CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology* 2008;79(5):707–18.

WANG, X. C. AND GREGORY, J. Structure of Al-Humic Floccs and their Removal at Slightly Acidic and Neutral pH. *Water Science and Technology* 2(2), 99-106. 2002.

YEUNG, A.K.C., PELTON, R., Micromechanics: a new approach to studying the strength and breakup of floccs. *J. Colloid Interface Sci.* 184, 579–585. 1996.

YOKOCHI T, NAKAHARA T, HIGASHIHARA T, TANAKA S, YAGUCHI T. Microorganisms capable of producing highly unsaturated fatty acids and process for producing highly unsaturated fatty acids by using the microorganisms. US Patent 6582941; 2003.

ZHANG, Z., SISK, M. L., MASHMOUSHY, H., AND THOMAS, C. R. Characterisation of the Breaking Force of Latex Particle Aggregates by Micromanipulation. *Particle Particle System Characterisation* 16, 278-283. 1999.

ZHOU, Z.A., XU, Z., FINCH, J.A., Effect of gas nuclei on hydrophobic coagulation, *Journal of Colloid and Interface Science*, 179(1), pp. 311-314, April 1996.

ZHOU, Z.A., XU, Z., FINCH, J.A., RAO, S.R., HU, H, Role of hydrodynamic cavitation in fine particle flotation, *International. Journal of Mineral. Processing*, 51, pp. 139-149, 1997.