

**TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO EM SISTEMA
CONJUGANDO PROCESSOS ANAERÓBIO (UASB), AERÓBIO
(LAGOA AERADA) E FÍSICO-QUÍMICO POR FLOTAÇÃO
(FAD), DISPOSTOS SEQUENCIALMENTE**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 27/09/00
Ass.: 

RENATA CRISTINA MORETTI

DEDALUS - Acervo - EESC



31100016450

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali



São Carlos
(2000)

Class.	TESE-EESC
Out.	13794
Tomo	T0190/00

311000/10450

st 1099136

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

M845p Moretti, Renata Cristina
Tratamento de esgoto sanitário em sistema conjugando processos anaeróbio (UASB), aeróbio (lagoa aerada) e físico-químico por flotação (FAD), dispostos sequencialmente / Renata Cristina Moretti. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali.

1. Tratamento de esgoto sanitário. 2. Clarificação por flotação. 3. Flotação de lodos ativados. 4. Tratamento anaeróbio, aeróbio e flotação. 5. Flotação por ar dissolvido. I. Título.

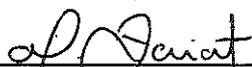
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **RENATA CRISTINA MORETTI**

Dissertação defendida e aprovada em 19-05-2000
pela Comissão Julgadora:



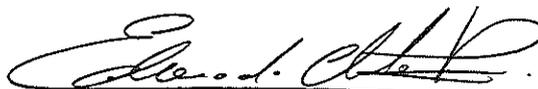
Prof. Doutor **MARCO ANTONIO PENALVA REALI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **MARCELO ZAIAT**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **IVANILDO HESPANHOL**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



Prof. Associado **EDUARDO CLETO PIRES**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Hidráulica e Saneamento



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

A meus pais Geraldo e Maria Augusta
e a meus irmãos Carlos Eduardo, Mauro e Murilo,
pelo carinho e
por me lembrarem sempre do valor que tenho.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali, pela oportunidade e pela insubstituível orientação no decorrer de todo o trabalho.

Ao Prof. Tit. José Roberto Campos, coordenador do Programa de Apoio a Núcleos de Excelência – PRONEX 97, pelo apoio e pelas valiosas sugestões fornecidas durante a realização da pesquisa.

À Margarida Marchetto, pelo companheirismo, pelo exemplo de dedicação à pesquisa e pelos ensinamentos sobre práticas de laboratório.

Ao técnico Francisco Carlos Bergamini, pela montagem e manutenção das instalações utilizadas e pela simpatia e prontidão com que sempre me atendeu.

À Beth Moraes, Eloisa e Maria Ângela, pela delicadeza e apoio que me dedicaram durante toda a execução da parte experimental desse trabalho, realizada no Laboratório de Processos Biológicos e no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR).

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento, Paulo, Júlio e Cidinha, pela atenção e colaboração.

Aos responsáveis pelo SEMAE e pela operação da ETE – Piracicamirim (Piracicaba – SP), pelo fornecimento dos dados sobre a estação de tratamento e das amostras com as quais o trabalho foi realizado.

À Marcella, minha querida amiga e colaboradora na confecção do Abstract, e a Paulo, pela amizade e companheirismo, pelos impagáveis ensinamentos de Química, e por serem os “para-raios” do meu cansaço durante as jornadas de trabalho experimental.

A todos os amigos do programa de mestrado e especialmente a Flavio Bentes Freire, pela presteza com que sempre me ajudou no decorrer do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de mestrado.

Ao Programa de Apoio a Núcleos de Excelência – PRONEX 97, pelos recursos necessários para a realização da pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo suporte financeiro para as obras de infra-estrutura do LATAR, onde foi realizado o trabalho.

Sumário

	Lista de Figuras	i
	Lista de Fotografias	vi
	Lista de Fluxogramas	vii
	Lista de Tabelas	viii
	Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	xv
	Resumo	
	Abstract	
1	Introdução	1
2	Objetivos	5
3	Revisão da Literatura	6
3.1	Flotação por ar dissolvido (FAD)	7
3.2	Coagulação e floculação visando a flotação por ar dissolvido	14
3.3	Floculação com o uso de polímeros sintéticos	19
3.4	Hidrofobicidade associada às partículas ou flocos	26
3.5	Remoção de fósforo e nitrogênio por flotação	30
3.6	Custos envolvidos em sistemas de FAD	41
4	Materiais e Métodos	44
4.1	Considerações iniciais	44
4.2	Descrição do sistema de tratamento de ETE – Piracicamirim	45
4.3	Descrição das instalações utilizadas na pesquisa	49
4.3.1	Descrição do equipamento de floculação/flotação em escala de laboratório (Flotateste)	49
4.3.2	Outros equipamentos e materiais utilizados nos ensaios	51
4.4	Ensaio de clarificação por flotação utilizando o Flotateste	52
4.5	Procedimento para o cálculo de alguns parâmetros utilizados nos ensaios	54
4.5.1	Cálculo da massa de sólidos suspensos totais removidos por flotação	54
4.5.2	Cálculo da dosagem dos polímeros e da razão ar/sólidos (A/S)	55
4.6	Primeira etapa – Ensaios preliminares com o Flotateste para determinação dos polímeros a serem utilizados nas etapas seguintes do trabalho	59
4.7	Segunda etapa – Ensaios com o Flotateste, alimentado com o efluente da lagoa aerada da ETE – Piracicamirim, para seleção de um polímero dentre os quatro escolhidos na primeira etapa, determinação da dosagem ótima e razão ar/sólidos (A/S) ótima	62

4.7.1	Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação dos quatro polímeros, variando a dosagem	66
4.7.2	Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S	67
4.8	Terceira etapa – Ensaio com o Flotatesto utilizando o polímero catiónico W 341, o cloreto férrico e uma associação entre os dois, e investigação da dosagem e razão ar/sólidos (A/S)	68
4.8.1	Ensaio com o polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S	71
4.8.2	Ensaio com cloreto férrico, variando a dosagem e a razão A/S	71
4.8.3	Ensaio a associação entre o polímero W 341 e o cloreto férrico, variando a dosagem	73
4.8.4	Ensaio com o polímero W 341, com o cloreto férrico e com a associação entre eles, com apenas um par de valores de dosagem e A/S, para uma amostra da lagoa mais concentrada	74
4.9	Quarta etapa – Ensaio com o Flotatesto utilizando o polímero W 341, cloreto férrico e uma associação entre os dois, e investigação da dosagem e razão ar/sólidos (A/S)	76
4.9.1	Ensaio de clarificação por flotação com aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S	79
4.9.2	Ensaio de clarificação por flotação com aplicação de cloreto férrico, variando a razão A/S	80
4.9.3	Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação da associação entre o polímero W 341 e o cloreto férrico, variando a dosagem	80
4.10	Caracterização físico-química das amostras obtidas durante os ensaios com o Flotatesto	83
4.11	Procedimento para avaliação do funcionamento global da ETE – Piracicamirim	84
5	Resultados e Discussões	87
5.1	Considerações iniciais	87
5.2	Primeira etapa – Ensaio preliminares visando a escolha dos polímeros a serem utilizados nas etapas seguintes do trabalho	88
5.3	Segunda etapa – Seleção de um polímero dentre os quatro escolhidos no item 5.2, determinação da dosagem ótima e razão ar/sólidos (A/S) ótima	95
5.3.1	Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação dos polímeros G 9046, G 9049, W 360 C e W 341, variando a dosagem	97
5.3.2	Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 1, com a aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S	110

5.4	Terceira etapa – Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação do polímero W 341, de cloreto férrico e de uma associação entre os dois, e investigação da dosagem e da razão ar/sólidos (A/S)	120
5.4.1	Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 2, com a aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S	121
5.4.2	Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 2, com a aplicação de cloreto férrico, variando a dosagem e a razão A/S	131
5.4.3	Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 2, com a aplicação da associação entre o polímero W 341 e o cloreto férrico, variando a dosagem	141
5.4.4	Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 3, com a aplicação do polímero W 341, de cloreto férrico e da associação entre eles, com apenas um par de valores de dosagem e A/S, para uma amostra mais concentrada da lagoa aerada (efluente Tipo 3)	147
5.5	Quarta etapa – Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação do polímero W 341, de cloreto férrico e de uma associação entre eles, e investigação da dosagem e da razão ar/sólidos (A/S)	156
5.5.1	Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 4, com a aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S	158
5.5.2	Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 4, com a aplicação de cloreto férrico, variando a razão A/S	169
5.5.3	Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 4, com a aplicação da associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S	174
6	Conclusões e Recomendações	197
7	Referências Bibliográficas	200
	Apêndice	

Lista de Figuras

FIGURA 3.1 –	Diagrama de solubilidade do ferro em função da concentração molar de ferro, a temperatura de 25°C.	19
FIGURA 3.2 –	Diagrama esquemático que mostra a interação de partículas com cadeias de polímeros terminalmente adsorvidas. A repulsão estérica ocorre quando as cadeias adsorvidas se sobrepõem.	21
FIGURA 3.3 –	Diagrama esquemático que mostra (a) floculação por pontes e (b) reestabilização por cadeias de polímero adsorvidas.	23
FIGURA 3.4 –	Ilustração do ângulo de contato para a adesão da bolha a uma superfície sólida.	27
FIGURA 3.5 –	Diagramas de equilíbrio de solubilidade para fosfatos de Fe, Al e Ca.	35
FIGURA 3.6 –	Ortofosfato solúvel residual em função do pH, durante coprecipitação dos fosfatos de ferro ou de alumínio em sistemas de lodos ativados.	35
FIGURA 3.7 –	Concentração de ortofosfato residual em função da dosagem de Fe^{3+} (pH não controlado e concentração de ortofosfato afluyente entre 6 e 7 mg/L).	36
FIGURA 3.8 –	Curva característica da concentração de ortofosfato residual em função da dosagem de Fe.	36
FIGURA 4.1 –	Fluxograma simplificado do sistema de tratamento.	46
FIGURA 4.2 –	Esquema geral do Flotateste.	50
FIGURA 5.1 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, obtidas nos ensaios preliminares comparativos (1ª etapa), realizados com 10 diferentes tipos de polímeros.	92
FIGURA 5.2 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, obtidas nos ensaios preliminares comparativos (2ª etapa), realizados com 12 diferentes tipos de polímeros.	93
FIGURA 5.3 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para os 10 polímeros testados na 1ª bateria de ensaios.	94
FIGURA 5.4 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para os 12 polímeros testados na 2ª bateria de ensaios.	94
FIGURA 5.5 –	Correlação entre turbidez e SST, obtida conforme item 4.5.3.	97
FIGURA 5.6 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,094 mg/L (0,65 g/Kg SST).	100

FIGURA 5.7 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,189 mg/L (1,30 g/Kg SST).	100
FIGURA 5.8 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,282 mg/L (1,95 g/Kg SST).	101
FIGURA 5.9 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,376 mg/L (2,60 g/Kg SST).	101
FIGURA 5.10 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,564 mg/L (3,90 g/Kg SST).	102
FIGURA 5.11 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,094 mg/L (0,65 g/Kg SST).	104
FIGURA 5.12 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,189 mg/L (1,30 g/Kg SST).	104
FIGURA 5.13 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,282 mg/L (1,95 g/Kg SST).	105
FIGURA 5.14 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,376 mg/L (2,60 g/Kg SST).	105
FIGURA 5.15 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,564 mg/L (3,90 g/Kg SST).	106
FIGURA 5.16 –	Frações de sólidos suspensos totais remanescente (SST/SST0) em função da dosagem de polímero.	108
FIGURA 5.17 –	Frações de DQO bruta remanescente (DQO/DQO0) em função da dosagem de polímero.	108
FIGURA 5.18 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 0,735 mg/L (5,30 g/Kg SST) e diferentes valores de A/S.	115
FIGURA 5.19 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 1,47 mg/L (10,60 g/Kg SST) e diferentes valores de A/S.	116
FIGURA 5.20 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 2,21 mg/L (15,90 g/Kg SST) e diferentes valores de A/S.	116

FIGURA 5.21 –	Fração de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para diferentes valores de A/S e sem adição de polímero.	117
FIGURA 5.22 –	Frações de sólidos suspensos totais remanescente (SST/SST ₀) em função da dosagem de polímero e para diferentes valores de A/S.	118
FIGURA 5.23 –	Frações de DQO bruta remanescente (DQO/DQO ₀) em função da dosagem de polímero.	118
FIGURA 5.24 –	Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.	124
FIGURA 5.25 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C ₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.	125
FIGURA 5.26 –	Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS ₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.	125
FIGURA 5.27 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO ₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.	126
FIGURA 5.28 –	Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.	128
FIGURA 5.29 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C ₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.	129
FIGURA 5.30 –	Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS ₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.	129
FIGURA 5.31 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO ₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, para diferentes valores de A/S.	130
FIGURA 5.32 –	Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes dosagens.	134
FIGURA 5.33 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C ₀) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes dosagens.	134
FIGURA 5.34 –	Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS ₀) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes dosagens.	135
FIGURA 5.35 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO ₀) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes dosagens.	135
FIGURA 5.36 –	Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.	138

FIGURA 5.37 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.	139
FIGURA 5.38 –	Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.	139
FIGURA 5.39 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.	140
FIGURA 5.40 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, com uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico, para diferentes dosagens de polímero W 341.	144
FIGURA 5.41 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, com uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico, para diferentes dosagens de polímero W 341.	145
FIGURA 5.42 –	Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, com uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico, para diferentes dosagens de polímero W 341.	146
FIGURA 5.43 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, com uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico, para diferentes dosagens de polímero W 341.	146
FIGURA 5.44 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) - 1º ensaio, uma dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L - 2º ensaio e uma dosagem de cloreto férrico de 20 mg/L + 0,71 mg/L (1,17 g/Kg SST) de polímero W 341 - 3º ensaio.	150
FIGURA 5.45 –	Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) - 1º ensaio, uma dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L - 2º ensaio e uma dosagem de cloreto férrico de 20 mg/L + 0,71 mg/L (1,17 g/Kg SST) de polímero W 341 - 3º ensaio.	151
FIGURA 5.46 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) - 1º ensaio, uma dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L - 2º ensaio e uma dosagem de cloreto férrico de 20 mg/L + 0,71 mg/L (1,17 g/Kg SST) de polímero W 341 - 3º ensaio.	152
FIGURA 5.47 –	Nova correlação entre turbidez e SST.	156
FIGURA 5.48 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.	161
FIGURA 5.49 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.	162

FIGURA 5.50 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.	162
FIGURA 5.51 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.	163
FIGURA 5.52 – Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.	166
FIGURA 5.53 – Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.	166
FIGURA 5.54 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.	167
FIGURA 5.55 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.	167
FIGURA 5.56 – Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.	171
FIGURA 5.57 – Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.	171
FIGURA 5.58 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.	172
FIGURA 5.59 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.	172
FIGURA 5.60 – Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico e diferentes dosagens de polímero e para uma dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero.	176
FIGURA 5.61 – Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico e diferentes dosagens de polímero e para uma dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero.	177
FIGURA 5.62 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico e diferentes dosagens de polímero e para uma dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero.	177

FIGURA 5.63 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico e diferentes dosagens de polímero e para uma dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero.	178
FIGURA 5.64 –	Frações de turbidez remanescente (T/T0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero, utilizando diferentes valores de A/S.	181
FIGURA 5.65 –	Frações de cor aparente remanescente (C/C0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero, utilizando diferentes valores de A/S.	182
FIGURA 5.66 –	Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero, utilizando diferentes valores de A/S.	183
FIGURA 5.67 –	Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero, utilizando diferentes valores de A/S.	183

Lista de Fotografias

FOTOGRAFIA 4.1 –	Fotografia dos 3 módulos de reatores anaeróbios (UASBs).	47
FOTOGRAFIA 4.2 –	Fotografia da lagoa com os aeradores.	47
FOTOGRAFIA 4.3 –	Fotografia onde aparecem os decantadores.	48
FOTOGRAFIA 4.4 –	Fotografia do canal em cascata.	48
FOTOGRAFIA 4.5 –	Fotografia do equipamento de floculação/flotação em escala de laboratório (Flotatest).	50
FOTOGRAFIA 4.6 –	Fotografia do equipamento de mistura rápida em escala de laboratório (Jar-test).	53
FOTOGRAFIA 4.7 –	Fotografia que mostra a mistura lenta (floculação).	53
FOTOGRAFIA 4.8 –	Fotografia onde está ocorrendo a flotação.	54
FOTOGRAFIA 4.9 –	Fotografia mostrando a passarela onde se localizavam os poços para coleta das amostras do efluente da lagoa aerada.	63
FOTOGRAFIA 4.10 –	Fotografia que mostra como era feita a coleta das amostras.	64

FOTOGRAFIA 4.11 –	Fotografia que mostra a colocação do efluente nos galões.	64
FOTOGRAFIA 4.12 –	Fotografia que mostra o Jar-test promovendo a mistura rápida do cloreto férrico com a amostra.	72
FOTOGRAFIA 4.13 –	Fotografia mostrando a coleta da amostra antes da entrada nos UASBs.	85
FOTOGRAFIA 4.14 –	Fotografia mostrando a coleta da amostra depois dos UASBs, correspondendo à entrada da lagoa aerada.	85
FOTOGRAFIA 4.15 –	Fotografia mostrando a coleta da amostra na saída da estação, precisamente na parte superior do canal em cascata.	86
FOTOGRAFIA 5.1 –	Fotografia mostrando as amostras afluente e efluente ao processo flotação, correspondentes ao ensaio onde foi aplicada a associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,21 mg/L de polímero W 341, com 7 g ar/m ³ afluente.	188

Lista de Fluxogramas

FLUXOGRAMA 4.1 –	Grade de ensaios para a segunda etapa do trabalho (itens 4.7.1 e 4.7.2).	65
FLUXOGRAMA 4.2 –	Grade de ensaios para a terceira etapa do trabalho (itens 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3 e 4.8.4).	70
FLUXOGRAMA 4.3 –	Grade de ensaios para a terceira etapa do trabalho (itens 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3).	78

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 –	Precipitados formados durante a precipitação química do fosfato.	33
TABELA 4.1 –	Características dos polímeros testados no item 4.6.	60
TABELA 4.2 –	Ensaio para escolha dos quatro polímeros a serem utilizados posteriormente (primeira etapa do trabalho – item 4.6).	61
TABELA 4.3 –	Ensaio realizado com Flotatest para escolha de um polímero entre os quatro selecionados na etapa anterior, determinação da melhor dosagem e melhor A/S (segunda etapa do trabalho – item 4.7).	68
TABELA 4.4 –	Ensaio realizado no Flotatest com o polímero W 341, com cloreto férrico e com uma associação entre o cloreto e o polímero, e determinação da melhor dosagem e melhor A/S (terceira etapa do trabalho, item 4.8).	75
TABELA 4.5 –	Ensaio realizado no Flotatest com o polímero W 341, com cloreto férrico e com uma associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, e determinação da melhor dosagem e melhor A/S (quarta etapa do trabalho, item 4.9).	82
TABELA 5.1 –	Valores de turbidez residual (uT) e porcentagens de remoção de turbidez (%), correspondentes à velocidade de flotação de 15 cm/min., obtidas nos ensaios preliminares comparativos (1ª e 2ª etapas, item 4.6), realizados com 21 diferentes tipos de polímeros.	91
TABELA 5.2 –	Valores de DQO residual (mg/L) e porcentagens de remoção de DQO (%), correspondentes à velocidade de flotação de 10 cm/min., referentes aos polímeros escolhidos para realização dos ensaios de flotação referentes ao item 4.7.1, com base nos ensaios preliminares comparativos (1ª e 2ª etapas, item 4.6), realizados com 21 diferentes tipos de polímeros.	91
TABELA 5.3 –	Eficiências (%) de remoção de turbidez apresentadas nos ensaios preliminares, referentes aos quatro polímeros escolhidos para a realização da 1ª bateria de ensaios de flotação da segunda etapa do trabalho (item 4.7.1).	95
TABELA 5.4 –	Caracterização do efluente da lagoa aerada utilizado nos ensaios de flotação e do líquido a ser pressurizado na câmara de saturação, utilizados no item 4.7.1, da segunda etapa do trabalho (preparado conforme item 4.7).	96
TABELA 5.5 –	Caracterização do efluente da lagoa (concentrado) utilizado nos ensaios de flotação e do líquido a ser pressurizado na câmara de saturação, utilizados no item 4.7.2, da segunda etapa do trabalho (preparado conforme item 4.7).	96

TABELA 5.6 -	Porcentagens de remoção de turbidez, correspondentes aos polímeros testados nos ensaios de flotação do item 4.7.1, para cada dosagem e velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.6 a 5.10).	102
TABELA 5.7 -	Porcentagens de remoção de cor aparente, correspondentes aos polímeros testados nos ensaios de flotação do item 4.7.1, para cada dosagem e velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.11 a 5.15).	106
TABELA 5.8 -	Porcentagens de remoção de sólidos suspensos totais, correspondentes aos polímeros testados nos ensaios de flotação do item 4.7.1, para cada dosagem e velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.16).	109
TABELA 5.9 -	Porcentagens de remoção de DQO bruta, correspondentes aos polímeros testados nos ensaios de flotação do item 4.7.1, para cada dosagem e velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.17).	109
TABELA 5.10	Porcentagens de remoção de turbidez, correspondentes aos valores de A/S testados nos ensaios de flotação do item 4.7.2, para cada dosagem e velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.18 a 5.21).	117
TABELA 5.11 –	Porcentagens de remoção de sólidos suspensos totais, correspondentes aos valores de A/S testados nos ensaios de flotação do item 4.7.2, para cada dosagem e velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.22).	119
TABELA 5.12 –	Porcentagens de remoção de DQO bruta, correspondentes aos valores de A/S testados nos ensaios de flotação do item 4.7.2, para cada dosagem e velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.23).	119
TABELA 5.13 –	Caracterização das amostras do efluente concentrado da lagoa aerada utilizado nos ensaios de flotação correspondentes aos itens 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3 e 4.8.4.	121
TABELA 5.14 –	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às dosagens do polímero W 341 testadas nos ensaios de flotação do item 4.8.1, utilizando o valor de A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.24 e 5.25).	126
TABELA 5.15 –	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às dosagens do polímero W 341 testadas nos ensaios de flotação do item 4.8.1, utilizando o valor de A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.26 e 5.27).	127
TABELA 5.16 –	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S testadas nos ensaios de flotação da 2ª parte do item 4.8.1, utilizando a dosagem do polímero W 341 de 1,08 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.28 e 5.29).	130

TABELA 5.17 –	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S testadas nos ensaios de flotação da 2ª parte do item 4.8.1, utilizando a dosagem do polímero W 341 de 1,08 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.30 e 5.31).	131
TABELA 5.18	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às dosagens de cloreto férrico aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.2, utilizando o valor de A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.32 e 5.33).	136
TABELA 5.19 –	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às dosagens de cloreto férrico aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.2, utilizando o valor de A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.34 e 5.35).	136
TABELA 5.20 –	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.2, utilizando a dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.36 e 5.37).	140
TABELA 5.21 –	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.2, utilizando a dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L, para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.38 e 5.39).	141
TABELA 5.22 –	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às dosagens do polímero W 341 aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.3, utilizando a dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L e a razão A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.40 e 5.41).	145
TABELA 5.23 –	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às dosagens do polímero W 341 aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.3, utilizando a dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L e a razão A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.42 e 5.43).	147
TABELA 5.24	Porcentagens de remoção de turbidez, correspondentes os ensaios realizados com 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) de polímero W 341, com 80 mg/L de cloreto férrico e com a associação de 20 mg/L de cloreto férrico a 0,71 mg/L (1,07 g/Kg SST) de polímero W 341, utilizando a razão A/S de 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.44).	151

TABELA 5.25	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes aos ensaios realizados com 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) de polímero W 341, com 80 mg/L de cloreto férrico e com a associação de 20 mg/L de cloreto férrico a 0,71 mg/L (1,07 g/Kg SST) de polímero W 341, utilizando a razão A/S de 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.45 e 5.46).	152
TABELA 5.26	Eficiência do processo de flotação para os três ensaios correspondentes ao item 5.4.4, da terceira etapa do trabalho. Todas as porcentagens de remoção foram calculadas com base no efluente da lagoa aerada (Tipo 2).	153
TABELA 5.27 –	Caracterização das amostras do efluente concentrado da lagoa aerada utilizado nos ensaios de flotação correspondentes aos itens 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3.	157
TABELA 5.28 –	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às dosagens do polímero W 341 aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.1, utilizando a razão A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.48 e 5.49).	163
TABELA 5.29 –	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às dosagens do polímero W 341 aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.1, utilizando a razão A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m ³ afluente), para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.50 e 5.51).	164
TABELA 5.30 –	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.1, utilizando a dosagem do polímero W 341 de 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.52 e 5.53).	168
TABELA 5.31 –	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.1, utilizando a dosagem do polímero W 341 de 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.54 e 5.55).	168
TABELA 5.32 –	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.2, utilizando a dosagem de cloreto férrico de 40 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.56 e 5.57).	173
TABELA 5.33–	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.2, utilizando a dosagem de cloreto férrico de 40 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.58 e 5.59).	173
TABELA 5.34 –	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes à associação de 20 mg/L de cloreto férrico a diferentes dosagens do polímero W 341, e à associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,54 mg/L de polímero W 341, aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.3, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.60 e 5.61).	178

TABELA 5.35 –	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes à associação de 20 mg/L de cloreto férrico a diferentes dosagens do polímero W 341, e à associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,54 mg/L de polímero W 341, aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.3, para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.62 e 5.63).	179
TABELA 5.36 –	Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.3, utilizando uma associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,54 mg/L de polímero W 341, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.64 e 5.65).	182
TABELA 5.37 –	Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.3, utilizando uma associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,54 mg/L de polímero W 341, para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.66 e 5.67).	184
TABELA 5.38 –	Eficiência do processo de flotação para as melhores dosagens e valores de A/S determinados através dos ensaios realizados na quarta etapa do trabalho. Todas as porcentagens de remoção foram calculadas com base nos dados da lagoa aerada, apresentados na TABELA 5.27.	187
TABELA 5.39 –	Resultados das determinações médias de DQO amostra bruta e SST, bem como leituras de pH, fornecidos pelos responsáveis pela operação da ETE – Piracicamirim. Os dados se referem às médias dos meses de outubro, novembro e dezembro de 1999, durante os quais foi realizado o presente trabalho.	189
TABELA 5.40 –	Eficiências de remoção de SST, DQO amostra bruta, turbidez e cor aparente, para os ensaios, referentes aos itens 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3, 4.8.4, 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3, com as condições (dosagem de polímero W 341, cloreto férrico e associação de cloreto férrico e polímero W 341 e razão A/S) que propiciaram os melhores resultados.	193
TABELA 5.41 –	Estimativas das eficiências globais de remoção de DQO do sistema de tratamento sequencial “UASB + lagoa aerada + flotação”, calculadas a partir dos valores de DQO da amostra bruta da entrada da ETE - Piracicamirim (entrada dos UASB)****, correspondentes aos ensaios de flotação que forneceram os melhores resultados (correspondentes aos itens 4.7.2, 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3, 4.8.4, 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3 do presente trabalho) e comparação com eficiência apresentada pelo decantador secundário, atualmente em funcionamento na ETE.	196

Apêndice

- TABELA 1 a 2 - Resultados obtidos nos ensaios preliminares de coagulação/floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para escolha de 4 polímeros dentre 21 testados.
- TABELA 3 a 6 - Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para escolha de um polímero dentre os polímeros catiônicos G 9046, G 9049, W 360 C e W 341, variando a dosagem.
- TABELAS 7 e 8 - Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para diferentes dosagens do polímero W 341 e diferentes valores de A/S.
- TABELA 9 a 11 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341, cloreto férrico e uma associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens e um valor de A/S de 0,037 mg ar/mg SST.
- TABELAS 12 e 13 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341 (dosagem = 1,08 mg/L) e para o cloreto férrico (dosagem = 80 mg/L), para diferentes valores de A/S.
- TABELA 14 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), utilizando efluente da lagoa aerada com concentração maior de sólidos suspensos, para o polímero W 341 (dosagem = 1,07 mg/L), cloreto férrico (dosagem = 80 mg/L) e uma associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341 (dosagem = 20 + 0,71 mg/L), utilizando um valor de A/S de 0,015 mg ar/mg SST.
- TABELA 15 - Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para diferentes dosagens do polímero W 341 e um valor de A/S de 0,017 mg ar/mg SST.
- TABELA 16 - Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para diferentes valores de A/S e uma dosagem do polímero W 341 de 0,96 mg/L.
- TABELA 17 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para diferentes valores de A/S e uma dosagem de cloreto férrico de 40 mg/L.
- TABELA 18 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para uma dosagem fixa de cloreto férrico

associada a diferentes dosagens do polímero W 341 e um valor de A/S de 0,017 mg ar/mg SST.

TABELA 19 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L associada à dosagem do polímero W 341 de 0,21 mg/L, utilizando diferentes valores de A/S.

TABELA 20 - Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação, em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341 (dosagem = 0,96 mg/L, A/S = 0,021 mg ar/mg SST), cloreto férrico (dosagem = 40 mg/L, A/S = 0,025 mg ar/mg SST) e uma associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341 (dosagem = 30 + 0,21 mg/L, A/S = 0,017 mg/L).

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

FAD	Flotação por ar dissolvido;
θ	Ângulo de contato na fronteira entre as fases sólida, líquida e gasosa;
A/S	Razão massa de ar/massa de sólidos;
TAS	Taxa de aplicação superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$);
RA	Registro de agulha;
Vflot	Velocidade de flotação (cm/min.);
Gmr	Gradiente médio de velocidade de mistura rápida (s^{-1});
Tmr	Tempo de mistura rápida (min.);
Gf	Gradiente médio de velocidade de floculação (s^{-1});
Tf	Tempo de floculação (min.);
R	Fração de recirculação pressurizada (%);
P_{sat}	Pressão no interior da câmara de saturação (kPa);
DP	Dosagem de polímero (mg/L ou g/Kg SST);
DCF	Dosagem de cloreto férrico (mg/L);
pH	Potencial hidrogeniônico;
SST	Sólidos suspensos totais (mg/L);
SSF	Sólidos suspensos fixos (mg/L);
SSV	Sólidos suspensos voláteis (mg/L);
DQO bruta	Demanda química de oxigênio da amostra bruta (mg/L);
NTK	Nitrogênio total Kjeldahl (mg/L);
N-NH_4^+	Nitrogênio amoniacal (mg/L);
NO_3^-	Nitrato (mg/L);
NO_2^-	Nitrito (mg/L);

SHS – EESC – USP	Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo;
LATAR	Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas;
SEMAE	Serviço Municipal de Água e Esgoto;
ETE – Piracicamirim	Estação de tratamento de esgotos de Piracicaba;
UASB	Reator anaeróbio de manta de lodo;
RALEX	Reator anaeróbio de leito expandido;

Resumo

MORETTI, R. C. (2000). Tratamento de esgoto sanitário em sistema conjugando processos anaeróbio (UASB), aeróbio (lagoa aerada) e físico-químico por flotação (FAD), dispostos sequencialmente. São Carlos, 2000. 203 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Nesse trabalho são apresentados e discutidos os ensaios de flotação realizados em escala de laboratório, utilizando unidade de flotação por ar dissolvido (FAD), em sistema de batelada, alimentado com o efluente da lagoa aerada da ETE – Piracicamirim (Piracicaba – SP).

Preliminarmente foram efetuados ensaios de flotação utilizando diversos tipos de polímeros sintéticos (catiônicos, aniônicos e não iônicos), visando a escolha daquele mais adequado à flotação desse tipo de efluente. Após a escolha de um polímero catiônico, foram investigadas diferentes dosagens deste polímero e de cloreto férrico, aplicados isoladamente, bem como da associação entre o cloreto férrico e o polímero escolhido. Foram testados também diferentes valores de quantidade de ar fornecidos à flotação, para cada caso.

O processo de flotação, realizado sem aplicação de produtos químicos e com 9 g ar/m³ afluente, forneceu remoções de 81,6% de SST, 69,9% de DQO, 75,9% de turbidez e 46,6% de cor aparente. Com o emprego de 0,96 mg/L do polímero e 9 g ar/m³ afluente, foram obtidas remoções de 95,0% de SST, 87,3% de DQO, 90,0% de turbidez, 84,6% de cor aparente e 52,2% de fosfato total. Com a aplicação de 40 mg/L de cloreto férrico e 11 g ar/m³ afluente, foram obtidas remoções de 98,0% de SST, 91,7% de DQO, 98,1% de turbidez, 95,8% de cor aparente, e 99,0% de fosfato total. Com a aplicação da dosagem de cloreto férrico (DCF) de 20 mg/L associada à dosagem de polímero (DP) de 0,13 mg/L, e 7 g ar/m³ afluente, foram obtidas remoções de 98,0% de SST, 87,8% de DQO, 94,1% de turbidez e 90,6% de cor aparente. Para DCF = 30 mg/L, DP = 0,21 mg/L e 7 g ar/m³ afluente, foi obtida remoção de 95,3% de fosfato.

Portanto, conclui-se que o emprego da flotação sem a utilização de produtos químicos já foi capaz de fornecer bons resultados de remoção de SST e DQO, ao passo que a aplicação de pequena dosagem de polímero sintético promoveu aumento dessas/eficiências, e ainda, a dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico associada a 0,21 mg/L de polímero foi capaz de aumentar ainda mais a eficiência de remoção de SST e DQO, além de aumentar consideravelmente a remoção de fosfato total.

Palavras-chave: tratamento de esgoto sanitário; clarificação por flotação; flotação por ar dissolvido; flotação de lodos ativados; tratamento anaeróbio, aeróbio e flotação.

Abstract

MORETTI, R. C. (2000). Domestic sewage treatment in a system combining the processes anaerobic (UASB), aerobic (aerated pond) and physico-chemical by flotation (DAF), sequentially disposed. São Carlos, 2000. 203 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

In this work, flotation assays at laboratory scale will be presented and discussed, using a dissolved-air flotation unit, in a batch system, treating the effluent from the STP – Piracicamirim aerated pond.

Flotation assays applying many kinds of synthetic polymers (cationic, anionic and non ionic) were initially done, aiming to choose the most adequate one to the flotation of that kind of effluent. After a cationic polymer has been chosen, many dosages of this polymer and ferric chloride were investigated, applying them individually, as well as the association between the ferric chloride and the chosen polymer. For each case different quantities of air added to the flotation were tested.

The flotation process, done in the absence of chemical products and with 9 g of air . m³ of influent⁻¹, resulted in the removal of 81,6% for TSS, 69,0% for COD, 75,9% for turbidity and 46,6% for apparent color. Applying 0,96 mg.L⁻¹ of polymer and 9 g of air . m³ of influent⁻¹, removal of 95,0% for TSS, 87,3% for COD, 90,0% for turbidity, 84,6% for apparent color and 52,2% for total phosphate were obtained. Using 40 mg.L⁻¹ of ferric chloride and 11 g of air . m³ of influent⁻¹, the removal of 98,0% for TSS, 91,7% for COD, 98,1% for turbidity, 95,8% for apparent color and 99,0% for total phosphate was achieved. With the application of the ferric chloride dosage (FCD) of 20 mg.L⁻¹ combined with a polymer dosage (PD) of 0,13 mg.L⁻¹ and 7 g of air . m³ of influent⁻¹, the removal of 98,0% for TSS, 87,8% for COD, 94,1% for turbidity and 90,6% for apparent color was obtained. For na FCD of 30 mg.L⁻¹, a PD of 0,21 mg.L⁻¹ and 7 g of air . m³ of influent⁻¹, a removal of 95,3% for total phosphate was achieved.

Therefore, we conclude that the application of flotation in the absence of chemical products produce good results for TSS and COD removal, where the application of small dosages of the synthetic polymer improved these efficiencies, and also, the 30 mg.L⁻¹ ferric chloride dosage associated with the 0,21 mg.L⁻¹ polymer dosage gave na even better efficiency on the removal of TSS and COD improving considerably the removal of total phosphate.

Key words: Domestic Sewage Treatment, Clarification by Flotation, Air Dissolved Flotation, Activated Sludge Flotation, Anaerobic and Aerobic Treatment and Flotation.

1 Introdução

Os processos biológicos são os mais econômicos dentre os utilizáveis na remoção de matéria orgânica dos resíduos e, por esse motivo, são amplamente utilizados no tratamento de efluentes líquidos e de resíduos sólidos. Além da remoção de matéria orgânica, os processos biológicos podem ser utilizados para a oxidação de compostos reduzidos como o nitrogênio amoniacal e sulfetos, bem como na redução de nitratos (desnitrificação) e sulfatos (FORESTI, 1996).

Dentre os processos biológicos largamente empregados no tratamento de águas residuárias, destaca-se o processo aeróbio que, comparativamente ao processo anaeróbio, apresenta melhores resultados, quando analisados isoladamente. Ocorre que, em função de suas vantagens (baixo custo de construção, operação e manutenção das instalações, baixa produção de lodo e possibilidade de aproveitamento do gás metano) em relação ao processo aeróbio, o processo anaeróbio vem sendo cada vez mais empregado. E, devido a sua própria natureza, há a necessidade de um tratamento complementar de seus efluentes, efetuado quase sempre em reatores aeróbios (CAMPOS *et al.*, 1996).

Esses sistemas complexos, que contêm unidades anaeróbias e aeróbias sequencialmente, vêm ao encontro da necessidade de se promover o tratamento completo dos efluentes líquidos, removendo-se a fração orgânica e os nutrientes (FORESTI, 1996).

Como já foi dito, os sistemas anaeróbios de tratamento produzem efluentes que requerem tratamento adicional para poderem se enquadrar na legislação ambiental, cujas exigências são cada vez mais restritivas. Segundo o artigo 18 do Decreto 8.468 de 08/09/1976, "os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nas coleções de água, desde que obedeçam às seguintes condições: i) pH entre 5,0 e 9,0; ii) temperatura inferior a 40°C; iii) materiais

sedimentáveis até 1,0 mL/L em teste de uma hora em “cone imhoff”; iv) substâncias solúveis em hexana até 100 mg/L; v) DBO 5 dias, 20°C no máximo de 60 mg/L. Este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento de águas residuárias que reduza a carga poluidora em termos de DBO 5 dias, 20°C do despejo em no mínimo 80%”.

No que se refere à remoção de carga orgânica, expressa em termos de remoção de DQO, segundo REALI *et al.*, (1998), os reatores UASB usualmente apresentam eficiência na faixa de 65 a 75%. Os mesmos autores afirmam que o tratamento complementar do efluente de reatores anaeróbios deve objetivar a remoção de adicional de carga orgânica, de sólidos suspensos, além da remoção de nitrogênio e fósforo, quando requerido tratamento a nível terciário.

De acordo com CAMPOS *et al.*, (1996), entre as alternativas para o tratamento complementar, incluem-se: a) lagoas facultativas; b) lagoas de alta taxa; c) lagoas aeradas (com retenção do lodo produzido); d) reator de leiteo fluidificado; e) disposição no solo; f) lodos ativados; g) filtro biológico aeróbio; h) tratamento físico-químico, etc. Até o presente, aparentemente, as soluções que mais estão sendo projetadas são pertinentes ao uso de lodos ativados (como pós-tratamento), porém nos meios técnico-científicos já existem vários profissionais que estão tendo sua atenção direcionada para o tratamento físico-químico.

Ainda segundo os autores, o uso de reatores anaeróbios seguidos por reatores que empregam o processo biológico aeróbio ou tratamento físico-químico tem resultado em concepções que redundam em grandes vantagens em relação às concepções que se fundamentam essencialmente no processo aeróbio, tais como: menores custos de operação e manutenção, menor consumo de energia elétrica e menor produção de lodo.

Usualmente, o processo físico-químico por flotação aplicado a efluentes de sistemas de tratamento biológico de esgotos sanitários,

costuma apresentar características com qualidade tal que permite que se faça o reuso desses efluentes (PENETRA et al., 1999; REALI et al., 1998).

De acordo com METCALF & EDDY (1991), existem problemas relacionados à superabundância de organismos filamentosos no liquor misto de lodos ativados (“bulking”). Os flocos filamentosos não sedimentam bem, possuindo inclusive tendência a flotar, e são frequentemente carregados em grandes quantidades no efluente dos tanques de sedimentação.

As condições que favorecem o crescimento de organismos filamentosos são numerosas e variam de uma estação para outra. Segundo os autores, dentre as causas atribuídas a tal fenômeno, pode-se citar:

- ✓ baixa relação alimento/microrganismo (F/M);
- ✓ baixa concentração de oxigênio dissolvido (OD) nos tanques de aeração;
- ✓ esgoto séptico;
- ✓ pH;
- ✓ substâncias tóxicas.

Tais condições podem ser possíveis e até mesmo previsíveis de ocorrerem em sistemas que associem sequencialmente processos anaeróbios e aeróbios.

Verifica-se assim, que a flotação por ar dissolvido (FAD) surge como uma das tecnologias mais promissoras e capaz de solucionar tais problemas, pois trata-se de um processo que, inversamente à sedimentação, promove a ascensão das partículas no interior do reator, através da aderência de microbolhas de gás às partículas previamente floculadas, o que as torna menos densas que a água (flutuáveis), propiciando sua rápida remoção na parte superior da unidade de flotação, com produção de lodo com elevado teor de sólidos, possibilidade de arraste de parcela de substâncias voláteis porventura presentes na água, possibilidade de oxidação de íons metálicos dissolvidos na água, além de constituir processo de alta taxa, resultando em unidades compactas e

versáteis, que possibilitam bom nível de controle operacional através do monitoramento da quantidade de ar fornecida ao processo. Atualmente, a FAD é uma técnica de separação de fases bastante conhecida e utilizada no tratamento de águas naturais superficiais, para consumo humano ou industrial, de águas residuárias de refinarias de petróleo, de indústrias de papel e celulose, de graxas e detergentes, de matadouros, de tintas, mecânicas e alimentícias, visando o tratamento ou a recuperação de produtos valorizados, de efluentes urbanos e de lodos provenientes de tratamentos diversos, visando seu espessamento. Para o tratamento de águas de abastecimento, a FAD tem sido utilizada em substituição aos decantadores secundários, visando a remoção de algas oriundas de corpos d'água eutrofizados e para clarificação de águas com elevada cor associada à baixa turbidez (REALI, 1991).

O Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS – EESC – USP) estabeleceu uma linha de pesquisa sobre FAD desde 1982, através da qual vem estudando e aperfeiçoando o processo, além do estudo de novas aplicações para o mesmo.

O presente trabalho foi concebido e desenvolvido dentro dessa linha de pesquisa. Como objeto de estudo, foi escolhida a estação de tratamento de esgoto da cidade de Piracicaba, a ETE – Piracicamirim, visto que o sistema de tratamento existente nessa estação incorpora reatores anaeróbios (UASB), seguido de pós-tratamento aeróbio em lagoa aerada. A separação dos sólidos suspensos, na estação, é feita por meio de decantadores secundários de alta taxa.

A proposta do trabalho foi o estudo da flotação por ar dissolvido aplicada à clarificação final do efluente da lagoa aerada da ETE-Piracicamirim, visando principalmente a remoção de sólidos suspensos totais, a redução da carga orgânica do efluente, além da redução da concentração de fosfato residual.

Foi investigada a eficiência da flotação com e sem aplicação de produtos químicos auxiliares de coagulação e flotação. Para isso foram testados polímeros sintéticos, cloreto férrico e uma associação entre cloreto férrico e polímero catiônico.

Deve-se salientar que o presente trabalho faz parte de um grande projeto de pesquisa, intitulado “Desenvolvimento e Otimização de Sistemas Não Convencionais de Tratamento e Águas Residuárias Constituídos de Reatores Biológicos e Físico-Químicos Dispostos em Série”, desenvolvido no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP junto ao PRONEX 97 – Programa de Apoio a Núcleos de Excelência.

Os resultados obtidos nesse trabalho constituem subsídios importantes para a melhor compreensão e para o projeto de unidades de flotação por ar dissolvido, aplicadas à clarificação e ao pós-tratamento de efluentes de reatores aeróbios antecidos de reatores anaeróbios, tratando esgotos sanitários.

2 Objetivos

O presente trabalho teve como objetivo principal investigar a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido, alimentado com o efluente da lagoa aerada pertencente à ETE – Piracicamirim (Piracicaba – SP), a qual possui sistema sequencial de tratamento de esgoto sanitário, constituído de reator anaeróbio (UASB) seguido de lagoa aerada. Para a realização desse objetivo principal, foram estabelecidas diferentes etapas de trabalho, configurando os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Utilização da flotação por ar dissolvido para realização de ensaios preliminares, visando a escolha de um polímero sintético dentre 21

diferentes tipos investigados, levando em conta a remoção de turbidez e DQO;

- ✓ Realização de ensaios de clarificação por flotação, com a aplicação do polímero escolhido nos ensaios preliminares, para investigação da dosagem de polímero e da quantidade de ar fornecida ao processo que resultem nas maiores eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, SST e DQO;
- ✓ Realização de ensaios de clarificação por flotação, com a aplicação prévia de cloreto férrico (coagulante), para investigação da dosagem de coagulante e da quantidade de ar fornecida ao processo que resultem nas maiores eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, SST, DQO e fosfato total;
- ✓ Realização de ensaios de clarificação por flotação, com a aplicação da associação de cloreto férrico e polímero, para investigação das dosagens de ambos os produtos químicos e da quantidade de ar fornecida ao processo que resultem nas maiores eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, SST, DQO e fosfato total.

3 Revisão da Literatura

Na revisão da literatura apresentada a seguir, foi procurado dar ênfase somente aos aspectos mais importantes dos processos de coagulação e flotação relacionados ao trabalho experimental desenvolvido na presente pesquisa, tais como: fundamentos gerais do processo de flotação por ar dissolvido (FAD), coagulação e floculação visando a FAD, floculação com a utilização de polímeros sintéticos, papel da hidrofobicidade no processo de flotação e remoção de nutrientes com a utilização da flotação.

3.1 Flotação por ar dissolvido (FAD)

A flotação pode ser definida como a transferência de um sólido, a partir de um meio líquido, para a superfície desse líquido através da aderência a bolhas de gás. Os três processos básicos envolvidos são, portanto, geração de bolhas, adesão das bolhas e separação dos sólidos (HYDE *et al.*, 1977).

A flotação por ar dissolvido (FAD) é um processo que, inversamente à sedimentação, promove a ascensão das partículas no interior do reator, através da aderência de microbolhas de gás às partículas previamente floculadas, o que as torna menos densas que a água (flutuáveis), propiciando sua rápida remoção na parte superior da unidade de flotação. A idéia de se utilizar a FAD tem por base a habilidade prevista para esse tipo de processo na separação dos flocos biológicos com características adversas à sedimentação (REALI, 1991).

Segundo ZABEL (1985), uma instalação de flotação por ar dissolvido (FAD) consiste de uma unidade para misturar os coagulantes químicos com a água bruta e de um estágio para floculação mecânica, seguido do tanque de flotação. Parte da água tratada é recirculada, pressurizada, e saturada com ar numa coluna de saturação. A água recirculada é introduzida na entrada de água floculada por meio de registros. Através deles, a pressão é reduzida à pressão atmosférica, liberando ar na forma de pequenas bolhas. As bolhas de ar aderem aos flocos e o aglomerado "bolha-floco" vai para a superfície do tanque de flotação e é removido como lodo flotado por inundação ou por raspagem mecanizada.

Segundo REALI (1991), as vantagens da FAD sobre a sedimentação são:

- ✓ Possibilidade de arraste de parcela dos contaminantes voláteis porventura presentes na água;

- ✓ Possibilidade de oxidação de íons metálicos dissolvidos na água (ferro e manganês, por exemplo);
- ✓ Produção de lodo com elevado teor de sólidos na superfície do flotador, podendo atingir até 12%, dependendo do tipo de dispositivo de coleta utilizado e das características da dispersão;
- ✓ Constitui processo de alta taxa, resultando em unidades compactas e versáteis, que possibilitam bom nível de controle operacional através do monitoramento da quantidade de ar fornecida ao processo.

ARNOLD *et al.*, (1995) também afirmaram que o processo de FAD oferece vantagens quando comparado à sedimentação. Altas taxas de remoção de sólidos, baixo conteúdo volumétrico de lodo, baixa sensibilidade a variações na qualidade da água e na vazão e economia de espaço são as principais características.

Na flotação, segundo POUET *et al.*, (1995), as velocidades ascensionais são mais altas, permitindo tempos de detenção mais curtos, além de possibilitar a melhor remoção das partículas menores.

MALLEY & EDZWALD (1991)^b compararam a FAD à sedimentação gravitacional convencional, em experimentos em escala de laboratório utilizando água sintética, e em estudos de campo, aplicando alúmen de potássio e cloreto de polialumínio (PAC). Segundo os autores, a grande concentração em volume de bolhas liberadas durante a FAD promoveu muitas oportunidades de colisão entre partículas e bolhas, reduzindo a necessidade de longos períodos de floculação. A FAD atingiu uma boa performance com períodos de floculação de 5 minutos, enquanto na sedimentação foram requeridos, no mínimo, 20 minutos.

SUTMAN (1996) realizou experimentos em escala de laboratório, onde foram comparados os desempenhos dos processos de sedimentação (Jar-test) e de FAD (Jar-test modificado para flotação). De acordo com o autor, os flocos de alta densidade, que são essenciais para a clarificação por sedimentação, obviamente não são um requisito primário para a FAD.

Além disso, uma clarificação por sedimentação eficiente se fundamenta principalmente no mecanismo de agregação, que aumenta o tamanho médio da partícula o máximo possível. Em contraste, a FAD requer uma rápida adesão do maior número possível de partículas às bolhas de ar, à medida que estas sobem à superfície, confirmando a vantagem da FAD de necessitar de unidades de floculação menores.

No processo de sedimentação, a velocidade dos flocos é aumentada com a floculação. Na flotação, a força motriz é criada pelas bolhas de ar. Portanto, qualquer problema na floculação pode não ser crítico para sua performance (VIITASAARI *et al.*, 1995).

Uma das principais vantagens da FAD é o conteúdo de sólidos do lodo flotado. As taxas mais altas de separação e de concentração de sólidos no lodo atingidas, quando comparadas às da sedimentação, reduzem consideravelmente os problemas e os custos de capital do sistema de separação e disposição do lodo (BRATBY, 1982).

Também HYDE *et al.*, (1977) afirmaram que uma vantagem particular da flotação é a produção de um lodo com um conteúdo muito maior de sólidos do que o obtido no tanque de sedimentação. Utilizando uma unidade de flotação em escala piloto para a clarificação de águas de abastecimento, os autores concluíram que o conteúdo de sólidos no lodo removido do tanque de flotação foi independente do coagulante usado (cloreto férrico ou sulfato de alumínio), porém era dependente do período de acúmulo ou frequência de remoção do lodo na superfície do tanque e da turbidez e sólidos suspensos da água bruta.

ARNOLD *et al.*, (1995) estudaram a FAD aplicada ao tratamento de águas de superfície, utilizando um sal de alumínio como coagulante e um polímero catiônico como auxiliar de floculação/flotação. Segundo os autores, quanto maior for o conteúdo de sólidos secos no lodo flotado, mais econômico se torna o seu tratamento. Conteúdos de sólidos maiores correspondem a menores volumes de lodo para estabilização e secagem. O alto teor de sólidos do lodo produzido pela flotação permite que se faça

secagem diretamente, eliminando a etapa do espessamento. Isso acarreta uma diminuição nos custos com equipamento, espaço e consumo reduzido de produtos químicos necessários ao espessamento.

Outra vantagem da flotação é seu efluente aeróbio. KIEFHABER *et al.*, (1982) instalaram uma unidade de FAD em uma estação de tratamento de águas residuárias municipais, que consistia de um sistema de lodos ativados com um decantador secundário subsequente. Com a unidade de FAD operando em paralelo com o decantador, os autores constataram que as concentrações médias de OD no efluente da unidade piloto de flotação foram de 5 mg/L, enquanto a concentração média de OD no efluente do decantador secundário foi de 2,3 mg/L. Portanto, a flotação pode ter um efeito benéfico no balanço de oxigênio, quando comparada à sedimentação.

Segundo ARNOLD *et al.*, (1995), o alto OD no efluente é um fator importante. No caso de um aumento na taxa de aplicação de sólidos, a flotação é capaz de remover uma grande parte das impurezas, que de outra forma seriam descartadas sem tratamento.

VIITASAARI *et al.*, (1995) estudaram a FAD aplicada ao tratamento de águas residuárias industriais, e constataram que, assim como o efluente, o lodo flotado também é aeróbio, não emitindo odores tão desagradáveis como ocorreria, caso se tratasse de um lodo anaeróbio.

A flotação também é capaz de produzir um efluente com menor número de bactérias. SCHOFIELD *et al.*, (1991), realizando carreiras de flotação em escala piloto para o tratamento de águas de abastecimento, utilizando sulfato de alumínio, sulfato férrico, cloreto de polialumínio (PCA) e um polieletrólito como coagulantes, obtiveram diminuição de 87% dos coliformes, nas amostras filtradas.

De acordo com BRATBY & AMBROSE (1995), as variáveis que influenciam a clarificação na FAD são:

- taxa de aplicação superficial;
- a razão de recirculação (R) e, conseqüentemente, a razão ar/sólidos (A/S) – ver item 4.5.2.

As variáveis que influenciam o espessamento são:

- taxa de aplicação de sólidos (massa de sólidos introduzida por unidade de área do tanque de flotação por tempo);
- altura que o lodo flotado alcança acima do nível da água.

KLUTE *et al.*, (1995) estudaram a otimização dos processos de coagulação que antecedem a FAD, através de dados obtidos do funcionamento de duas instalações em escala piloto, sendo que uma delas utilizava o cloreto férrico como coagulante e a outra utilizava o cloreto férrico e um polímero catiônico como auxiliar de floculação/flotação. Segundo os autores, há um número de variáveis controlando a eficiência de remoção de sólidos suspensos no processo de flotação, como por exemplo: a razão ar/sólidos (A/S), a concentração de bolhas, o projeto do registro para entrada da vazão de recirculação, o tempo de contato e o taxa de aplicação superficial.

Para MALLEY & EDZWALD (1991)b, os parâmetros de projeto para FAD, aplicada ao tratamento de águas para abastecimento, incluem também o tempo de detenção, a taxa de aplicação superficial, além da razão de recirculação (R) e pressão da câmara de saturação.

Segundo EDZWALD (1993), a massa de ar fornecida pela massa de sólidos suspensos tratada tem sido usada como um parâmetro de projeto e operação para a flotação destinada ao tratamento de águas residuárias e ao adensamento de lodos.

Um item importante que deve ser deixado claro é a significância da razão ar/sólidos (A/S) durante a flotação. A razão A/S influencia a quantidade de ar adsorvida às partículas e influencia diretamente tanto a taxa de ascensão dos aglomerados “bolhas de ar-partículas” quanto a profundidade dos sólidos flotados abaixo do nível d’água requerida para suportar os sólidos flotados acima do nível d’água (BRATBY & AMBROSE, 1995).

A quantidade de ar fornecida ao tanque de flotação pode ser variada tanto com a mudança da vazão de recirculação quanto com a alteração da

pressão na câmara de saturação (ZABEL, 1985; EDZWALD, 1993; BRATBY & AMBROSE, 1995).

ZABEL (1985) constatou que a quantidade de ar requerida para a flotação, aplicada ao tratamento de águas de superfície, depende apenas da quantidade total de água a ser tratada e é independente da quantidade de sólidos suspensos, a menos que a concentração de sólidos seja muito alta (> 1000 mg/L). A razão ar/sólidos é muito mais alta para o tratamento de águas de superfície (≈ 380 mg de ar/g de sólidos) do que para o espessamento de efluentes de lodos ativados (15-30 mg de ar/g de sólidos). A grande quantidade de ar requerida para o tratamento de águas de superfície é provavelmente necessária para assegurar colisões adequadas entre os flocos e as bolhas de ar, facilitando a adesão.

HO & TAN (1989), comparando a floculação química à flotação por ar dissolvido, utilizando um polímero catiônico como auxiliar de floculação/flotação, no tratamento de um efluente de óleo de palmeira digerido anaerobiamente, mostraram que a performance da flotação é fortemente dependente da razão ar/sólidos. Se a quantidade de ar for insuficiente para corresponder aos sólidos suspensos afluentes, poderá ocorrer um aumento significativo da perda de sólidos no efluente. Mantendo uma razão ar/sólidos entre 0,006-0,01, pode ser atingida uma eficiência de 98% na remoção de sólidos suspensos. Portanto, é possível remover a biomassa mesmo com uma baixa razão ar/sólidos.

HYDE *et al.*, (1977), em seus experimentos de flotação em escala piloto, concluíram que o método de introdução da vazão de recirculação é um fator crítico para a performance da unidade de flotação.

Segundo ZABEL (1985), que estudou as vantagens da utilização do processo de FAD no tratamento de águas, o ar deve ser liberado muito próximo ao ponto onde a água recirculada é misturada à água floculada, com o objetivo de minimizar a perda de bolhas de ar como efeito da coalescência.

MENELL *et al.*, (1974) compararam a precipitação química à FAD, utilizando a cal como coagulante, no tratamento de um efluente primário e constataram que a piora na performance do sistema de flotação, quando foram aplicadas taxas de recirculação abaixo da ótima, era causada provavelmente pela insuficiência de ar disponível para promover o contato bolha de ar-floco, enquanto que, a taxas de recirculação muito elevadas, a piora do funcionamento do sistema era provavelmente resultado da ruptura da ligação floco-bolha devido à excessiva turbulência. Os resultados dos autores mostraram que as maiores remoções de turbidez, sólidos suspensos e fosfato total ocorreram quando foram utilizadas razões de recirculação na faixa de 0,6 a 0,7. Para valores de razão de recirculação fora dessa faixa, a eficiência de remoção desses parâmetros era menor.

A FAD é um processo que deve ser realizado com bolhas pequenas, na faixa de 10 a 100 μm , normalmente uma média de 40 μm (EDZWALD, 1993; MALLEY & EDWALD, 1991a). Para assegurar a produção de bolhas pequenas, a pressão na câmara de saturação precisa operar a várias atmosferas acima da pressão atmosférica. Na prática, costuma-se trabalhar com pressões normalmente na faixa de 483 a 585 kPa (EDZWALD, 1993).

De acordo com MALLEY & EDWALD (1991)b, o tamanho específico da bolha não pode ser controlado na FAD. Entretanto, a concentração de bolhas pode ser otimizada variando a pressão da câmara de saturação ou a razão de recirculação ou ambas. Otimizando a pressão no saturador e a razão de recirculação pode-se reduzir os custos de operação e manutenção nas instalações de FAD.

A concentração de bolhas, em volume, afeta a flotação e é um importante parâmetro de projeto e operação. Uma alta concentração de bolhas assegura boas oportunidades de colisão entre estas e as partículas e a diminuição da densidade das partículas, possibilitando que ocorra a flotação.

ARNOLD *et al.*, (1995) também confirmaram a importância do tamanho da bolhas de ar pois, segundo os autores, bolhas grandes resultam

em altas velocidades ascensionais, que podem exceder os requerimentos para o escoamento laminar e provocar uma má performance da flotação devido à quebra dos flocos. Bolhas grandes também têm menor área de superfície por unidade de volume, havendo uma diminuição do número de bolhas e da chance de colisão bolhas de ar-flocos.

Segundo EDZWALD *et al.*, (1992), na FAD aplicada ao tratamento de águas de abastecimento, são obtidas concentrações de bolhas de 1000-10.000 ppm comparadas a uma concentração de partículas de 1-100 ppm. Isso assegura uma concentração de bolhas suficiente para promover oportunidades de colisão entre partículas e bolhas e a diminuição da densidade do floco.

3.2 Coagulação e floculação visando a flotação por ar dissolvido

Segundo GREGORY (1993), muitos processos de tratamento de águas e águas residuárias têm o objetivo de remover impurezas na forma particulada. Esses processos incluem sedimentação e adensamento, flotação e filtração. Em todos esses processos, a eficiência de remoção é altamente dependente do tamanho das partículas e podem usualmente ser favorecidos pela agregação de partículas pequenas numa sequência de coagulação-floculação.

Segundo KITCHENER (1972), os métodos convencionais de separação falham fundamentalmente quando são aplicados a suspensões coloidais, devido ao fato das partículas permanecerem separadas e discretas. Sabe-se que a única maneira prática de tratar suspensões coloidais é inicialmente operar na química de sua superfície de maneira a induzir a coagulação e então, quando os flocos tiverem se tornado os maiores possíveis, promover sua separação.

É evidente que a agregação adequada do material particulado é um requisito essencial para uma flotação eficiente. As variáveis no processo de coagulação são o tipo e a concentração do coagulante inorgânico (Al^{3+} , Fe^{3+} , PAC), tipo e concentração do auxiliar de floculação orgânico, condições de mistura durante a fase de dosagem dos produtos químicos, intervalo de tempo entre a dosagem de produtos químicos diferentes e condições turbulentas durante a formação do floco (KLUTE *et al.*, 1995).

A FAD é muito dependente do grau de agregação das partículas. É mais provável que haja o contato das microbolhas de ar com agregados do que com pequenas partículas, pois estes possuem um raio de colisão maior. Entretanto, os agregados podem ser menores do que aqueles formados para a remoção por sedimentação e sua densidade deve ser menor. Sabe-se também que é necessário algum grau de hidrofobicidade para que haja a adesão às bolhas.

É importante notar que, apesar das partículas terem que ser desestabilizadas para que haja uma boa aderência bolhas-partículas, as dosagens de coagulante devem ser menores do que aquelas usadas no tratamento convencional por sedimentação, pois não é necessária a formação de flocos grandes (EDZWALD *et al.*, 1992).

Os efeitos de agregação das partículas servem basicamente para aumentar o tamanho eficiente da “partícula” e para reduzir o número de “partículas” a ser recuperado. O primeiro efeito resulta numa maior probabilidade de colisões bolhas-partículas e num aumento da eficiência de coleta das bolhas, o que leva a taxas de flotação mais altas para uma mesma quantidade de ar. O segundo efeito influencia na eficiência econômica do processo, pois cálculos simples mostram que a razão ar/sólidos requerida para flotar simples partículas finas e não floculadas é normalmente muito alta para ser fornecida por processos de FAD, a um custo aceitável.

Poucos pesquisadores têm estudado a floculação especificamente conectada à flotação, com o objetivo de otimizar o resultado da separação

total dos flocos. Enquanto o processo de coagulação/floculação continua sendo realizado da mesma maneira antes da sedimentação e da flotação, parece óbvio que o floco que vai ser flotado requer uma preparação diferente daquele que vai ser sedimentado. Contudo, vê-se que, na prática, os flocladores antes das unidades de flotação têm sido projetados e operados da mesma maneira dos que precedem os tanques de sedimentação (GOCHIN & SOLARI, 1983).

De acordo com GREGORY (1993), que estudou o papel das interações coloidais na separação sólido-líquido, a agregação de partículas e sua adesão à superfície dos grãos nos filtros ou a bolhas de ar são influenciadas por vários tipos de forças inter-partículas, conhecidas como interações coloidais, devido à maioria significativa das partículas pertencer a esta faixa de tamanho (menores que 1 mm). Importantes interações coloidais variam na proporção ao tamanho da partícula, pois forças externas, como gravidade e movimento hidrodinâmico, têm uma forte dependência do tamanho da partícula. As interações coloidais têm um papel crucial na eficiência de colisão entre as partículas.

Há vários tipos de interações coloidais importantes, sendo que as mais conhecidas são as forças de van der Waals e a interação elétrica (de repulsão ou atração, dependendo das condições). Sabe-se que os efeitos hidrófobos também podem ser importantes, promovendo uma atração extra entre as partículas. Outros efeitos significativos vêm da presença de polímeros adsorvidos (ou matéria orgânica natural), promovendo repulsão (interação estérica) ou atração (ponte polimérica).

ØDEGAARD (1995), em seus estudos sobre a otimização da floculação/flotação no tratamento químico de águas residuárias municipais, afirmou que o tratamento químico das águas residuárias consiste de dois processos muito rápidos de reações paralelas: a coagulação de colóides e a precipitação de solúveis, seguidos de dois ou mais processos de separação muito mais lentos: a agregação de partículas (floculação) e a separação dos flocos (sedimentação, flotação e/ou filtração).

Segundo o autor, coagulação é o termo usado para descrever a agregação de partículas muito pequenas, geralmente de tamanho coloidal, frequentemente encontradas no tratamento de águas e águas residuárias. Coagulação é uma parte essencial no processo de separação sólido-líquido.

Coagulação, segundo STUMM & O'MELIA (1968)¹ *apud* JOHNSON & AMIRTHARAJAH (1983), é o processo que supera a barreira repulsiva formada pelas forças elétricas de repulsão e forças de atração (van der Waals) que interagem entre as partículas em solução, permitindo que ocorra a agregação.

São conhecidos quatro diferentes mecanismos de coagulação:

- 1) Compressão da camada difusa;
- 2) Adsorção para produzir neutralização de cargas;
- 3) "Varredura" ou captura em precipitado (de hidróxido metálico ou carbonato);
- 4) Adsorção e formação de "pontes" entre partículas.

A desestabilização de colóides em águas e águas residuárias ocorre provavelmente pela adsorção na superfície dos colóides de espécies hidrolisadas de coagulantes com cargas opostas, solúveis e insolúveis, ou pela captura em precipitado, ou por ambos.

Cátions metálicos, como Fe^{3+} ou Al^{3+} , encontram-se hidratados em água, formando "aquacomplexos", os quais não adsorvem à superfície dos colóides. Quando ocorre a hidrólise, formando complexos hidrolisados do metal com cargas opostas às das partículas, estes adsorvem rapidamente à sua superfície, desestabilizando-as e permitindo que ocorra a coagulação.

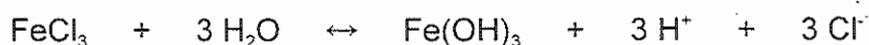
Se for adicionada à dispersão coloidal em água uma quantidade suficiente de coagulante, ocorrerá supersaturação e a rápida precipitação de uma grande quantidade do hidróxido metálico, formando flocos que

¹ STUMM, W & O'MELIA, G. R. (1968). Stoichiometry of Coagulation. *Jour. AWWA*, v. 60, n. 5, pp. 531.

capturam as partículas, removendo-as da solução (mecanismo de “varredura”).

O uso de coagulantes hidrolisáveis (como os sais de ferro e alumínio) tem sido parte integral na purificação de águas por séculos. Esses coagulantes inorgânicos de Fe e Al são eficientes e de custo relativamente baixo (HO & TAN, 1989).

As reações para o cloreto férrico no tratamento de águas residuárias são:



O conhecimento da solubilidade das diversas espécies hidrolisadas de ferro presentes em diferentes valores de pH é de grande importância, pois os mecanismos da coagulação dependem da concentração de cada espécie na solução (PENETRA, 1998). O diagrama de solubilidade do ferro é mostrado na FIGURA 3.1.

De acordo com ØDEGAARD (1995), o objetivo da floculação é:

- agregar o maior número possível de partículas primárias coaguladas/precipitadas em flocos separados;
- preparar as características dos flocos para que eles sejam separados o mais eficientemente possível.

REALI *et al.* (1998), estudando a influência da floculação na flotação de efluentes de reatores anaeróbios (UASB), constataram que, utilizando uma dosagem de cloreto férrico de 65 mg/L, com o emprego dos valores de gradiente de floculação (Gf) em torno de 80 s^{-1} e de tempo de floculação (Tf) entre 15 e 25 minutos, é possível obter excelentes resultados no sistema de FAD, com remoção de até 91% de DQO, 96% de fosfato total, 98% de turbidez e 98% de sólidos suspensos.

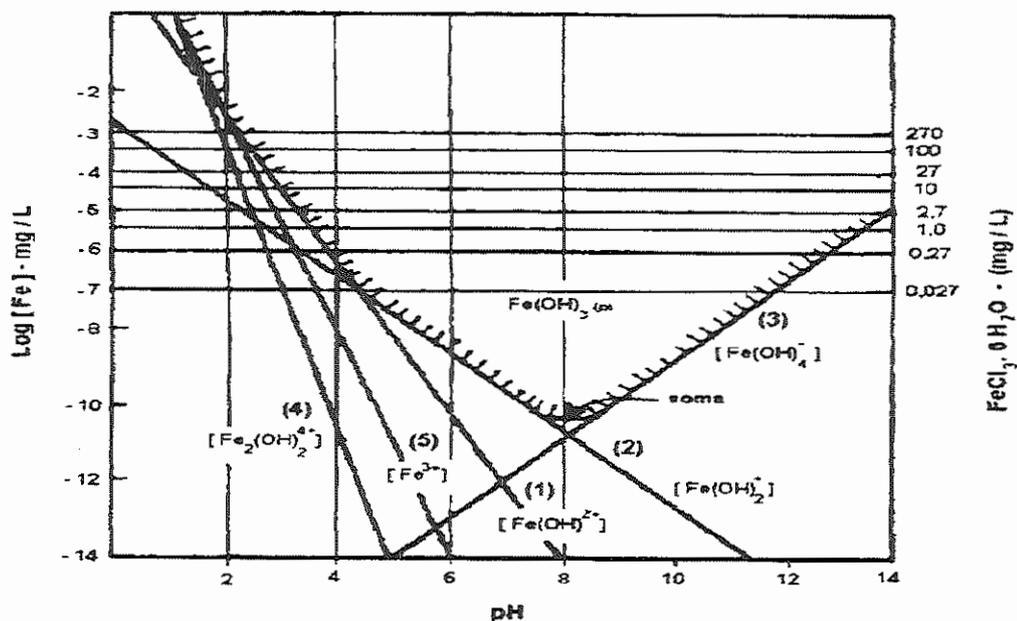


FIGURA 3.1 – Diagrama de solubilidade do ferro em função da concentração molar de ferro, a temperatura de 25°C.

Fonte: SNOEYINK & JENKINS (1980) *apud* JOHNSON & AMIRTHARAJAH (1983).

3.3 Floculação com o uso de polímeros sintéticos

Segundo HO & TAN (1989), a principal desvantagem dos coagulantes inorgânicos (hidróxidos de ferro ou alumínio) é a produção de um lodo volumoso, composto de produtos da hidrólise dos metais. Havia então a necessidade de melhorar as características do floco. A descoberta do uso de polímeros sintéticos para a produção de flocos maiores e mais fortes do que aqueles obtidos apenas com o uso de coagulantes inorgânicos aumentou a extensão das práticas para tratamento de água.

PENETRA *et al.*, (1999), estudando o pós-tratamento por FAD de efluentes de reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, concluíram que, apesar da pesquisa ter sido feita aplicando o cloreto férrico como coagulante, seria interessante, antes de se fazer o projeto da unidade de tratamento, executar testes e operar uma unidade piloto para avaliar o uso

do FeCl_3 , associado a polieletrólitos, com o objetivo de reduzir a produção de lodo.

BRATBY (1982) estudou o tratamento do excesso de esgoto bruto proveniente de um by-pass localizado após o decantador primário da ETEB-Sul de Brasília, com a utilização da FAD. Segundo o autor, a possibilidade do uso adicional de um floculante em conjunto com o coagulante melhora a adesão bolha-partícula durante a flotação.

KITCHENER (1972), estudando os princípios da ação dos floculantes poliméricos, afirmou que o mérito destes é sua habilidade em produzir flocos maiores e mais fortes dos que aqueles formados pelos coagulantes inorgânicos.

Esses floculantes poliméricos podem ser usados tanto depois da desestabilização do despejo como no lugar do coagulante inorgânico. O modo de adição dos floculantes, a dosagem e a composição química do despejo são fatores importantes que podem influenciar na eficiência do tratamento. Essas substâncias poliméricas atuam através de dois mecanismos que podem operar simultaneamente. Quando o polímero é iônico e carrega uma carga oposta à das partículas coloidais, a adsorção dos polímeros reduz a carga líquida da partícula, desestabilizando o colóide. Independente de sua carga, a molécula do polímero pode adsorver a duas partículas separadas em diferentes pontos ao longo do comprimento da cadeia, formando uma ponte entre as partículas e promovendo a floculação. Apenas uma faixa ótima de concentrações pode produzir uma floculação eficiente; uma quantidade excessiva de floculante polimérico causa a reestabilização, isto é, pode ocorrer a redispersão das partículas coloidais.

De acordo com GREGORY (1993), camadas de polímero adsorvidas podem ter uma grande participação na estabilidade de colóides. Em alguns casos, pequenas quantidades de polímero adsorvido podem promover floculação através do mecanismo de pontes. Em grandes quantidades, os polímeros podem aumentar a estabilidade dos colóides através de um efeito conhecido como estabilização estérica. Os estabilizadores mais eficientes

são polímeros que têm alguma afinidade pela superfície, mas adsorvem de tal maneira que segmentos das cadeias dos polímeros se prolongam através da fase aquosa, a uma determinada distância. O caso mais simples é o de co-polímeros bloqueadores terminalmente adsorvidos (ver FIGURA 3.2), que possuem um certo número de segmentos que adsorvem fortemente às partículas e outros segmentos hidrófilos que se projetam pela fase aquosa. A repulsão estérica ocorre quando as cadeias adsorvidas se sobrepõem.

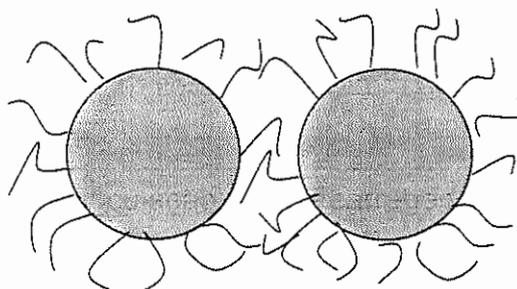


FIGURA 3.2 – Diagrama esquemático que mostra a interação de partículas com cadeias de polímeros terminalmente adsorvidas. A repulsão estérica ocorre quando as cadeias adsorvidas se sobrepõem. Fonte: GREGORY (1993).

A ação de estabilização de tais materiais pode ser interpretada em termos simples. As partículas chegam suficientemente perto, as camadas adsorvidas entram em contato e qualquer maior aproximação envolve a interpenetração das cadeias hidrófilas. Como estas cadeias são hidratadas, a sobreposição dessas camadas causa alguma desidratação e conseqüentemente uma aumento na energia livre, e uma repulsão entre as partículas. Em uma primeira aproximação, pode-se assumir que a repulsão começa a se tornar infinita tão logo as camadas começam a se sobrepôr, e zero a separações maiores.

Um efeito importante do polímero adsorvido é limitar a atração entre as partículas mantendo entre elas uma distância finita, onde a atração pelas

forças de van der Waals é menor. O contato entre as partículas, então, pode levar a agregados fracos, que podem ser facilmente quebrados por agitação. O fator mais importante na determinação do grau de estabilização estérica é a espessura da camada adsorvida em relação ao tamanho da partícula. Como a energia de atração de van der Waals é proporcional ao tamanho da partícula, partículas maiores necessitarão de camadas estabilizadoras mais espessas para conferir o mesmo grau de estabilidade.

Polímeros de cadeia longa geralmente adsorvem às partículas da maneira indicada na FIGURA 3.3 e, em grandes quantidades adsorvidas, podem causar estabilização estérica, como discutido anteriormente. Com quantidades menores de polímero adsorvido, uma cadeia individual pode começar a aderir a duas ou mais partículas, criando uma ponte entre elas. Desta maneira, as partículas formam agregados mesmo que eles sejam carregados e possam repelir um ao outro.

Os requisitos essenciais para que ocorra a ponte polimérica são: 1) as superfícies das partículas devem estar suficientemente livres para que ocorra a adesão de segmentos de polímeros de cadeias aderidas a outras partículas e 2) as pontes poliméricas devem ser de extensão tal que impeçam que ocorra a repulsão inter-partículas. Geralmente, a floculação por pontes mais eficiente ocorre com polímeros lineares de peso molecular muito alto, para que possa haver a formação de "loops" e caudas, aumentando a probabilidade de adesão a outras partículas. Também sabe-se que há uma faixa ótima de dosagens para que ocorra floculação eficiente. A dosagens menores, não há polímero suficiente para formar ligações adequadas entre as partículas. Com excesso de polímero, não há superfície de partícula exposta o suficiente para a adesão de segmentos, ocorrendo a reestabilização das partículas através da repulsão estérica. A FIGURA 3.3 mostra esquematicamente a floculação e a reestabilização de partículas pela adsorção de polímeros. A adsorção por pontes pode produzir agregados (flocos) muito mais fortes do que os produzidos apenas com a adição de sais (isto é, através da redução da repulsão elétrica).

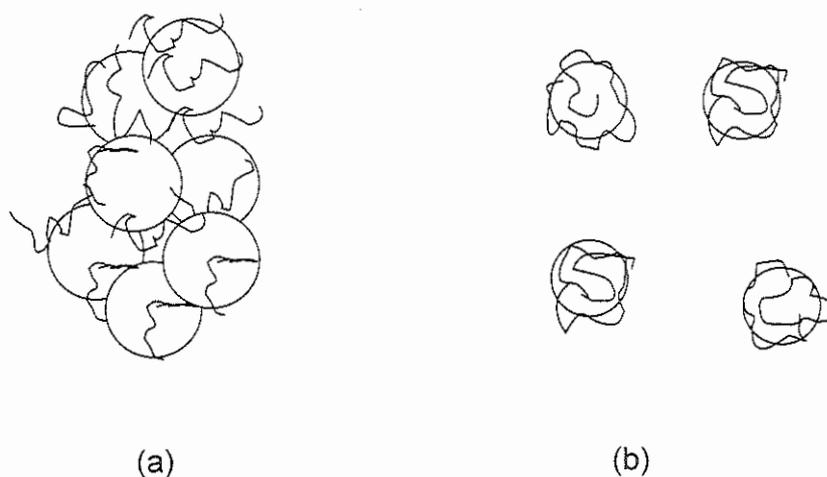


FIGURA 3.3 – Diagrama esquemático que mostra (a) floculação por pontes e (b) reestabilização por cadeias de polímero adsorvidas.
Fonte: GREGORY (1993).

Os dados de GREGORY (1993) sugerem que os polímeros catiônicos revestem as partículas através da mudança de carga; já o iônico e o não-iônico não afetam significativamente sua carga.

Quando as partículas e o polieletrólito são de cargas opostas (como no caso prático de partículas negativas e polímero catiônico), a possibilidade de desestabilização apenas por redução da carga cresce. De fato, em muitos casos, a ação de polímeros catiônicos pode ser explicada em termos de sua forte adsorção às partículas negativas e a consequente redução da repulsão da dupla camada, permitindo que ocorra agregação. A configuração plana adotada por polieletrólitos que adsorvem em superfície de carga oposta faz com que o contato por pontes se torne desfavorável. Por estas razões, os floculantes catiônicos mais eficientes são frequentemente os de mais alta densidade de carga, com o peso molecular sendo de menor importância. No entanto há exceções, especialmente em dispersões concentradas, onde os fatores cinéticos aumentam a importância das interações por pontes.

Outro aspecto importante dos processos de coagulação/floculação é a natureza dos agregados formados, especialmente a densidade do floco. O crescimento de agregados se dá por passos, com pequenas partículas se combinando para formar pequenos agregados e seu subsequente crescimento, envolvendo colisões entre agregados de vários tamanhos.

Quando a eficiência de colisões entre as partículas é alta, ou seja, aproximadamente todas as colisões resultam em adesão permanente, os agregados tendem a possuir preferivelmente estrutura aberta (baixa dimensão fractal, baixa densidade). Isso porque os agregados que colidem se fixam no primeiro encontro, sem a possibilidade de se interpenetrar. Entretanto, quando há alguma repulsão entre as partículas, gerando uma agregação lenta ou de reação limitada, são formadas estruturas mais compactas, devido às partículas que se aproximam terem mais oportunidade de explorar diferentes configurações e uma maior chance de interpenetração.

Então, as condições que levam a uma taxa ótima de coagulação também levam a flocos com densidade preferivelmente baixa. Estes têm também um raio de colisão maior e, conseqüentemente, maior chance de colidir com outros agregados, resultando numa taxa de floculação mais alta. Em alguns casos, pode ocorrer o rearranjo da estrutura do floco para uma forma mais compacta, especialmente se for aplicada uma agitação delicada. Colisões de partículas pequenas com flocos pré-formados podem também gerar estruturas mais densas (GREGORY, 1993).

De acordo com os resultados obtidos por KLUTE *et al.*, (1995) em experimentos em escala piloto com o objetivo de identificar as condições ótimas de coagulação para a FAD, a remoção de partículas de argila por flotação foi altamente dependente da adição de um auxiliar de floculação catiônico. A coagulação apenas com Fe^{3+} resultou na formação de flocos com boas características de sedimentação; entretanto, uma separação significativa desses flocos por flotação não pôde ser detectada. A dosagem do polieletrólito após a coagulação com Fe^{3+} resultou numa melhora

considerável da eficiência de remoção. É interessante notar que o tempo de reação e o fornecimento de energia (G) após a dosagem do polieletrólito influenciaram essa eficiência. O aumento do tempo de reação bem como da intensidade de turbulência produziram flocos com melhores características de remoção. Os autores concluíram então que as condições de reação durante a fase de floculação influenciam significativamente na estrutura dos flocos e, conseqüentemente, sua eficiência de separação por flotação.

Em estudos de HO & TAN (1989), utilizando o polímero catiônico Poliacrilamida na flotação de um efluente digerido anaerobiamente, a melhora na floculação observada na presença do floculante polimérico e sua forte dependência do peso molecular levaram a sugerir que o mecanismo de pontes predominou neste sistema. Como ambos, coagulante (sulfato de alumínio) e auxiliar de floculação, eram carregados positivamente quando ocorreu a floculação, é razoável pensar que essa melhora na floculação pode ter ocorrido através de alguma forma de efeito sinérgico. Então, o floculante polimérico catiônico pode ter efeito duplo, neutralizando as cargas da superfície das partículas e também formando pontes.

Realizando o processo de flotação sem a aplicação de produtos químicos, os autores obtiveram uma remoção de sólidos suspensos de 94%, porém a eficiência de remoção de DBO foi de apenas 80%. Entretanto, com a adição de sulfato de alumínio e do polieletrólito como auxiliar de floculação para a flotação, foi observado uma melhora na performance do processo. A remoção de DBO aumentou significativamente para 90%, porém a remoção de sólidos suspensos aumentou apenas para 97%. O coagulante inorgânico, juntamente com o polieletrólito, desestabilizaram os particulados, e os flocos então desenvolvidos puderam aderir às microbolhas, resultando numa melhor taxa de flotação dos flocos em suspensão.

GREGORY (1976), estudando o efeito dos polímeros catiônicos na estabilidade coloidal de partículas de látex, afirmou que a desestabilização e reestabilização de partículas negativas por polímeros catiônicos ocorre principalmente por neutralização e reversão de cargas, o que é

demonstrado pelo fato da mobilidade eletroforética das partículas, a uma concentração ótima de flocculante, estar próxima a zero. Segundo os resultados do autor, polímeros catiônicos que diferiam apenas quanto ao peso molecular, possuíam a mesma concentração ótima para a flocculação de partículas de látex negativas. Em outras palavras, a flocculação ótima ocorria quando uma certa quantidade de carga positiva era adsorvida às partículas, independentemente do comprimento das cadeias dos polímeros que carregavam a carga.

A implicação desses resultados é que a ligação de partículas negativas por polímeros catiônicos através de pontes pode não ser de grande significância prática. É desnecessário dizer que essa conclusão não se aplica ao desempenho de polímeros aniônicos com partículas negativas, onde a flocculação por pontes continua a ser, de longe, o mecanismo mais plausível.

3.4 Hidrofobicidade associada às partículas ou flocos

Além da desestabilização das partículas por neutralização de sua carga de superfície, a produção de partículas hidrófobas é outra condição necessária para que haja flotação favorável (EDZWALD, 1995).

GOCHIN & SOLARI (1983) estudaram a flotação por ar dissolvido de partículas de quartzo, com o objetivo de determinar o papel do grau de hidrofobicidade na eficiência do processo e se ela é ou não um pré-requisito para o sucesso da recuperação de sólidos. Nesses experimentos, descobriu-se que a presença de material suficientemente hidrófobo é crítica para o controle da resposta da flotação.

O sucesso da aderência das bolhas às partículas no processo depende das condições hidrodinâmicas do sistema e do grau de hidrofobicidade das partículas. De fato, a partícula que não apresenta algum

grau de hidrofobicidade não pode flotar, exceto pela chance de englobamento na espuma ou na camada de lodo da superfície.

Segundo os autores, W_{AD} é definido como o trabalho de adesão da água ao sólido e W_{CO} é o trabalho de coesão do líquido. A flotação é possível se $W_{AD} < W_{CO}$, isto é, desde que haja um ângulo de contato diferente de zero entre a partícula e a bolha. Na prática, um valor de pelo menos 25° é normalmente requerido para que ocorra flotação.

Classicamente, o ângulo de contato entre a bolha e a partícula é usado para descrever a flotação de partículas pelas bolhas. Esse ângulo deve ser finito e grande o bastante para que o trabalho ou energia de adesão da água à partícula sólida seja menor que a energia de coesão da água. Um ângulo de contato maior indica hidrofobicidade e boa adesão.

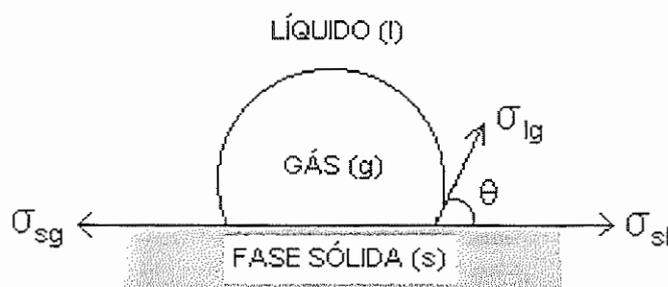


FIGURA 3.4 – Ilustração do ângulo de contato para a adesão da bolha a uma superfície sólida.

Fonte: EDZWALD (1995).

Sólidos hidrófilos, como os óxidos, possuem ligações polares com a água devido às hidroxilas que cobrem a sua superfície e, portanto, apresentam altos valores de W_{AD} . Contudo, sólidos hidrófilos podem se tornar hidrófobos pela adsorção de agentes tensoativos na interface sólido-líquido. Esses agentes podem ser adicionados à dispersão ou podem estar presentes como resultado de causas naturais ou algum processo industrial

anterior. Seu papel é mascarar ou eliminar os sítios polares nos sólidos através da adsorção e reduzir o valor de W_{AD} (HYDE *et al.*, 1977).

De acordo com GREGORY (1993), a natureza da água que está próxima à superfície da partícula pode ser bem diferente da que se encontra no restante do volume líquido, por várias razões. Como a maioria das partículas carrega uma carga de superfície e, conseqüentemente, grupos iônicos de superfície, é esperado que ocorra alguma hidratação desses grupos, por analogia aos íons na solução. Algumas partículas, especialmente as de origem biológica, têm vários tipos de material hidrófilo em sua superfície, como proteínas e polissacarídeos. Estes têm uma grande quantidade de água circundante, que interfere na interação dessas partículas.

A aproximação de duas partículas com superfícies hidratadas geralmente será dificultada por uma interação repulsiva extra, diferente da repulsão devido à dupla camada elétrica. Essa repulsão devido à hidratação deriva essencialmente da necessidade das superfícies em se tornar desidratadas se houver um contato real entre as partículas. Isso envolve trabalho e conseqüentemente um aumento da energia livre do sistema.

A faixa dessas forças de hidratação é considerável quando comparada com a faixa de repulsão da dupla camada e espera-se que tenha um efeito na estabilidade dos colóides, especialmente sob força iônica alta.

Quando uma superfície não possui grupos polares ou iônicos ou sítios para a formação de pontes de hidrogênio, não há afinidade com a água, e a superfície é chamada hidrófoba. A natureza da água em contato com tal superfície será diferente da que ocorre com a água que se encontra no restante do volume líquido, que é significativamente estruturada devido às pontes de hidrogênio entre as moléculas. A presença de uma superfície hidrófoba pode restringir a tendência natural de estruturação da água, simplesmente impondo uma barreira que previne o crescimento de aglomeração numa certa direção. A água confinada no espaço entre tais

superfícies será incapaz de formar aglomerados maiores do que um determinado tamanho. Há uma atração entre as superfícies hidrófobas, como consequência da migração das moléculas de água que se encontram entre elas para o restante do volume líquido, onde as oportunidades de formar pontes de hidrogênio são irrestritas e há uma baixa energia livre.

Os resultados de GOCHIN & SOLARI (1983), obtidos do processo de FAD aplicado para a recuperação de partículas de quartzo a partir de uma suspensão, utilizando polímero catiônico, mostraram que partículas de quartzo ou flocos que são hidrófilos não podem ser flotados através do processo de flotação por ar dissolvido. Contudo, se for adicionado um agente de superfície ativo, conhecido por adsorver à superfície sólido-solução, os sólidos podem flotar com o auxílio das microbolhas. Esses agentes de superfície farão o papel de “collectors”, tal qual na flotação de minérios através da flotação por ar disperso, estabelecendo um ângulo de contato entre a fase sólida e a bolha de ar, aparentando ser o fator determinante no mecanismo de adesão. Portanto há pouca diferença entre os sistemas por ar disperso e ar dissolvido, pois ambos necessitam que as forças de ligação com a água sejam suficientemente fracas para permitirem a aderência à bolha, após a colisão.

Descobriu-se que o englobamento físico de bolhas ascendentes aos flocos não resultou na flotação de flocos hidrófilos, provavelmente porque estes logo deixavam escapar as bolhas, mesmo com o leve grau de agitação conferido à suspensão. Entretanto, o fato de um pequeno grau de hidrofobicidade ter induzido a flotação de alguns flocos com estruturas abertas, confirmou que as características dos flocos podem ter influência no mecanismo de adesão. Então, devido a sua grande área de superfície e pequena densidade, os flocos grandes e abertos provavelmente requerem poucos sítios hidrófobos que induzam a aderência de um número suficiente de microbolhas. Os flocos pequenos e compactos são muito mais sensíveis. A probabilidade de que a adsorção do “collector” seja heterogênea pode favorecer a flotação.

3.5 Remoção de fósforo e nitrogênio por flotação

A principal causa de eutrofização em corpos de água, principalmente em grandes reservatórios, é o acúmulo de nutrientes como nitrogênio e fósforo. Entretanto, há limites para a remoção desses nutrientes com os atuais processos de tratamento a nível secundário. Assim, na maioria das vezes, torna-se necessário realizar tratamento mais avançado, a nível terciário, para a remoção desses nutrientes, em áreas onde os padrões regulamentares para os efluentes sejam mais restritivos (XIE *et al.*, 1994). Segundo NESBITT (1969), o carbono, o nitrogênio e o fósforo são elementos nutricionais para a produção de algas e plantas verdes. Já que o carbono está prontamente disponível na maioria das águas como bicarbonato e o nitrogênio pode ser assimilado da atmosfera por algumas plantas aquáticas (além de ser de difícil remoção das águas residuárias), o fósforo tem sido escolhido por muitos pesquisadores como um nutriente a ser controlado. Recentemente, entretanto, alguma atenção está sendo dada ao controle do nitrogênio.

Segundo ESTEVES (1988), há muito é conhecida a importância do fósforo nos sistemas biológicos. Essa importância se deve à participação deste elemento em processos fundamentais do metabolismo dos seres vivos, tais como: armazenamento de energia (forma uma fração essencial da molécula de ATP) e estruturação da membrana celular (através de fosfolipídeos). O fósforo é o principal fator limitante da produtividade da maioria das águas continentais e tem sido apontado como o principal responsável pela eutrofização artificial desses ecossistemas. Toda forma de fósforo presente em águas naturais, seja na forma iônica, seja na forma complexada, encontra-se sob a forma de fosfato. Atualmente, a maioria dos pesquisadores tem empregado uma classificação sumária, que agrega as várias formas em apenas cinco:

- Fosfato particulado (P-particulado);
- Fosfato orgânico dissolvido (P-orgânico dissolvido);
- Fosfato inorgânico dissolvido ou ortofosfato ou fosfato reativo (P-orto);
- Fosfato total dissolvido (P-total dissolvido) e
- Fosfato total (P-total).

Dentre as formas de fosfato, o P-orto assume maior relevância por ser a principal forma assimilada pelos vegetais aquáticos.

O fosfato presente em ecossistemas aquáticos continentais tem origem em fontes naturais (rochas de bacias de drenagem (através da intemperização), material particulado presente na atmosfera e fosfato resultante da decomposição de organismos de origem alóctone) e artificiais (esgotos domésticos e industriais, fertilizantes agrícolas e material particulado de origem industrial presente na atmosfera).

De acordo com ØDEGAARD (1979), uma fração substancial do fósforo está contida na forma de matéria em suspensão, nas águas residuárias, e essa fração é removida por coagulação. Os precipitantes para remoção do fósforo mais comumente usados são o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, o sulfato ferroso e a cal.

Segundo MENNEL *et al.*, (1974), numerosos processos têm sido sugeridos para a remoção de fosfatos presentes nas águas residuárias. A maioria destes métodos é baseada na adição de produtos químicos que convertem os compostos solúveis de fósforo em precipitados insolúveis, processo este que é seguido pela separação do precipitado por sedimentação. A sedimentação por gravidade é um processo lento, e por isso, uma unidade comparativamente grande é necessária para promover a separação dos sólidos.

A remoção do fosfato das águas residuárias envolve a incorporação deste em uma forma particulada (sólidos suspensos) e, na sequência, a remoção dos sólidos suspensos. Os tipos de sólidos suspensos nos quais os fosfatos podem ser incorporados são biológicos (microrganismos) ou

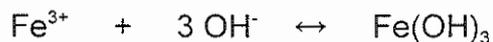
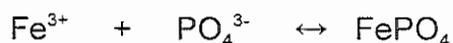
químicos (fosfatos de metal precipitados pouco solúveis). A precipitação química do fosfato é necessária quando os limites de emissão de fósforo são menores do que aqueles alcançados pelo tratamento biológico. A precipitação do fosfato é conseguida pela adição de um metal, o que acarreta a formação dos fosfatos precipitados pouco solúveis. Este metal pode ser o cálcio (Ca^{2+}), o ferro (Fe^{2+} ou Fe^{3+}) ou o alumínio (Al^{3+}). Os sais normalmente empregados são a cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), o aluminato de sódio (NaAlO_2), o cloreto férrico (FeCl_3), o sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), o sulfato ferroso (FeSO_4) e o cloreto ferroso (FeCl_2). O conhecimento da natureza dos fosfatos formados pela adição destes precipitantes às águas residuárias, de sua solubilidade e de suas variações de solubilidade de acordo com as condições da solução, é essencial para a previsão e o controle dos resultados da remoção química de fosfato. Uma lista de alguns sólidos formados pode ser vista na TABELA 3.1. É importante ressaltar que outros sólidos que não contenham fosfato também podem ser formados. Durante a sua formação, estes sólidos consomem uma parcela dos precipitantes e há produção adicional de lodo (JENKINS & HERMANOWICZ (1991)² *apud* PENETRA (1998)).

Os fatores que afetam a escolha de determinado produto químico visando a remoção de fósforo são: (i) concentração de fósforo afluente, (ii) concentração de sólidos suspensos, (iii) alcalinidade, (iv) custos do produto químico (inclusive o transporte), (v) fornecimento garantido do produto, (vi) unidades para manipulação do lodo, (vii) meios adequados para disposição final e (viii) compatibilidade com outros processos.

Metal	Precipitado	pH	Comentário
Ca ²⁺	Vários fosfatos de cálcio, ex.: Fosfato de β-tricálcio: Ca ₃ (PO ₄) ₂ (s) Hidroxiapatita: Ca ₅ (OH)(PO ₄) ₃ (s) Fosfato de dicálcio: CaHPO ₄ (s)	≥ 10	Produz as menores Concentrações residuais de P. A alcalinidade da água determina a dosagem por causa da formação de CaCO ₃ . P residual entre 1 e 2 mg/L
	Carbonato de cálcio: CaCO ₃	≤ 9,5	
Fe ²⁺	Fosfato ferroso: Fe ₃ (PO ₄) (s) Fosfato férrico: Fe _x (OH) _y (PO ₄) ₃ (s) Hidróxido ferroso: Fe(OH) ₂ (s) Hidróxido férrico: Fe(OH) ₃ (s)	6 – 8,5	Há alguma oxidação de Fe ²⁺ a Fe ³⁺
Fe ³⁺	Fosfato férrico: Fe _x (OH) _y (PO ₄) _z (s) Hidróxido férrico: Fe(OH) ₃ (s)	6 – 8,5	
Al ³⁺	Fosfato de alumínio: Al _x (OH) _y (PO ₄) ₃ (s) Hidróxido de alumínio: Al(OH) ₃ (s)	6 – 8,5	

TABELA 3.1 – Precipitados formados durante a precipitação química do fosfato
Fonte: JENKINS & HERMANOWICZ (1991)² *apud* PENETRA (1998).

Quando os sais de ferro são adicionados às águas residuárias brutas, eles reagem com o ortofosfato solúvel e produzem um precipitado segundo as reações:



Em águas com baixa alcalinidade, devido ao consumo de OH⁻, a adição ocasional de uma base pode ser necessária para manter o pH entre 5 e 7. Os sais de alumínio e ferro são geralmente utilizados em uma razão molar na faixa de 1 a 3 íons de metal para 1 íon de fósforo. A razão

²JENKINS, D. & HERMANOWICZ, S. W. (1991). "Principles of chemical phosphate removal", in *Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater*, 2nd ed., R. I. Sedlak, ed., Chelsea, MI, Lewis Publishers.

molar exata da aplicação é determinada através de ensaios e depende das características da água residuária e da remoção desejada de fósforo (METCALF & EDDY, 1991).

As curvas de solubilidade de $\text{FePO}_4(\text{s})$ são mostradas na FIGURA 3.5. A solubilidade mínima do $\text{FePO}_4(\text{s})$ está ao redor do pH 5,3 enquanto a do $\text{AlPO}_4(\text{s})$ está por volta do pH 6,3. A solubilidade mínima do $\text{AlPO}_4(\text{s})$ aparenta ser menor do que a do $\text{FePO}_4(\text{s})$. Essas duas curvas foram desenvolvidas a partir do precipitado formado pela adição gradual do reagente químico $\text{FePO}_4(\text{s})$ ou $\text{AlPO}_4(\text{s})$ à água destilada, em laboratório. Entretanto, a curva de solubilidade observada durante a co-precipitação dos fosfatos de ferro e alumínio em sistemas de lodos ativados, mostrada na FIGURA 3.6, é diferente daquelas conseguidas em laboratório. Os resultados práticos obtidos demonstram que as baixas concentrações residuais de ortofosfato obtidas na co-precipitação dos fosfatos de ferro ou de alumínio em sistemas de lodos ativados também são conseguidas na pré ou na pós precipitação.

Quando os sais de ferro são adicionados às águas residuárias para precipitação do fosfato, é obtida uma curva de dosagem química em função do ortofosfato residual solúvel e semelhante àquela mostrada na FIGURA 3.7. Essa curva é característica para valores moderados de pH ($< 7,5$) e para valores moderados a baixos de alcalinidade (aproximadamente 100 mg/L CaCO_3) da água residuária. A curva indica que baixas concentrações residuais de ortofosfato podem ser conseguidas, mas somente com a adição de altas dosagens de Fe^{3+} . A forma dessa curva é confirmada pelos dados operacionais obtidos em várias unidades de lodos ativados na Baía de Chesapeake, EUA.

Duas regiões predominantes podem ser identificadas na curva: uma região “estequiométrica”, com altas concentrações efluentes de fósforo, e uma região de “equilíbrio”, com baixas concentrações efluentes de fósforo, como pode ser visto na FIGURA 3.8. Na região estequiométrica, a remoção de ortofosfato solúvel é estequiometricamente proporcional à adição de sal

de metal, enquanto na região de equilíbrio são necessários incrementos cada vez maiores na dosagem química para remoções cada vez menores de ortofosfato solúvel (JENKINS & HERMANOWICZ, 1991² *apud* PENETRA, 1998).

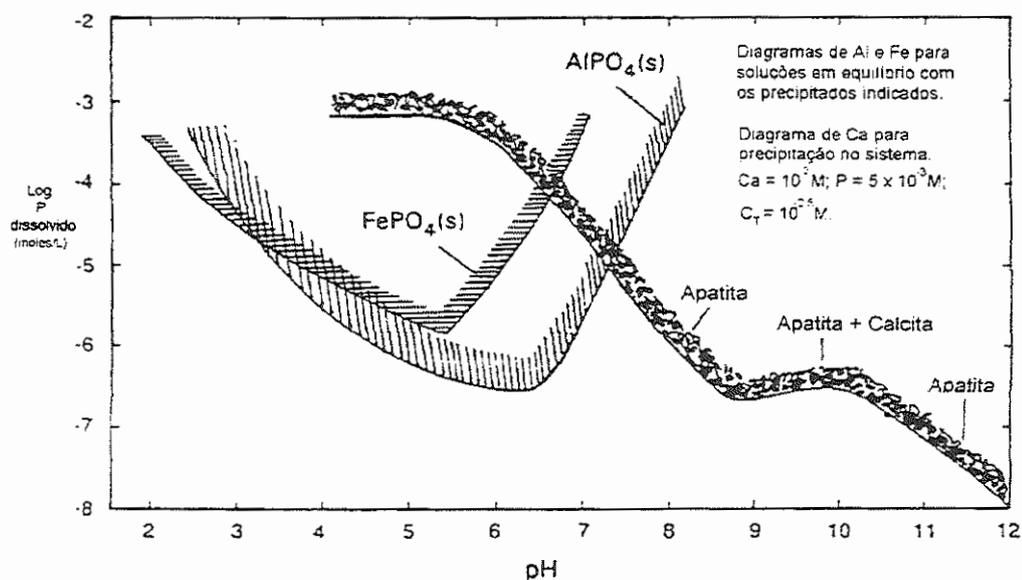


FIGURA 3.5 – Diagramas de equilíbrio de solubilidade para fosfatos de Fe, Al e Ca.
 Fonte: JENKINS & HERMANOWICZ (1991)² *apud* PENETRA (1998).

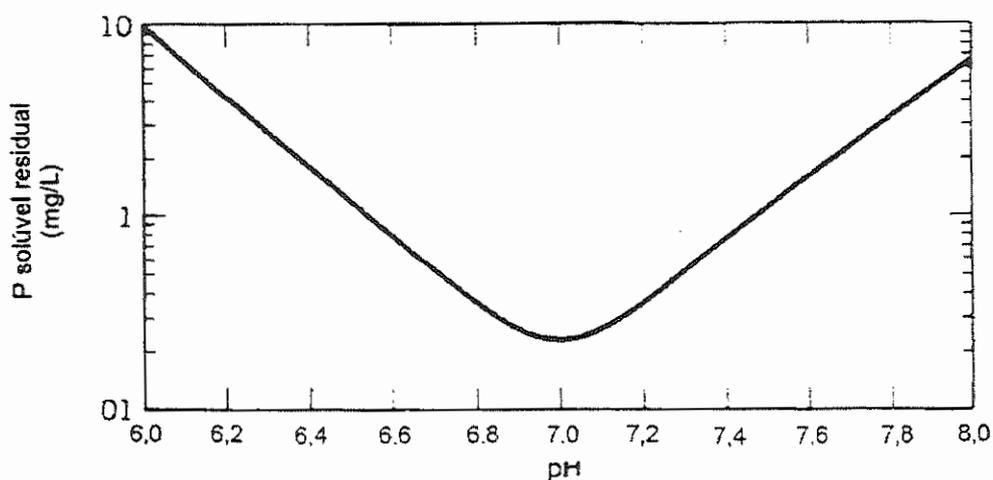


FIGURA 3.6 – Ortofosfato solúvel residual em função do pH, durante co-precipitação dos fosfatos de ferro ou de alumínio em sistemas de lodos ativados.
 Fonte: DROSTE (1997).

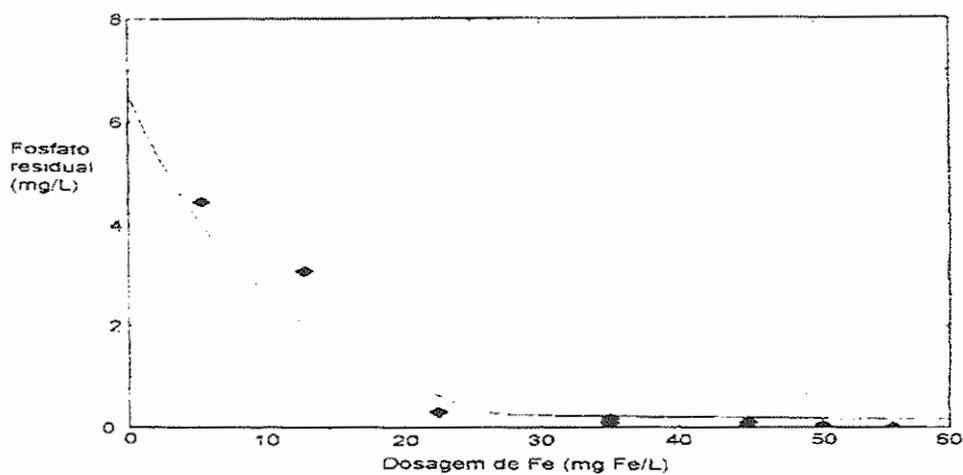


FIGURA 3.7 – Concentração de ortofosfato residual em função da dosagem de Fe^{3+} (pH não controlado e concentração de ortofosfato afluente entre 6 e 7 mg/L).
Fonte: JENKINS & HERMANOWICZ (1991)² apud PENETRA (1998).

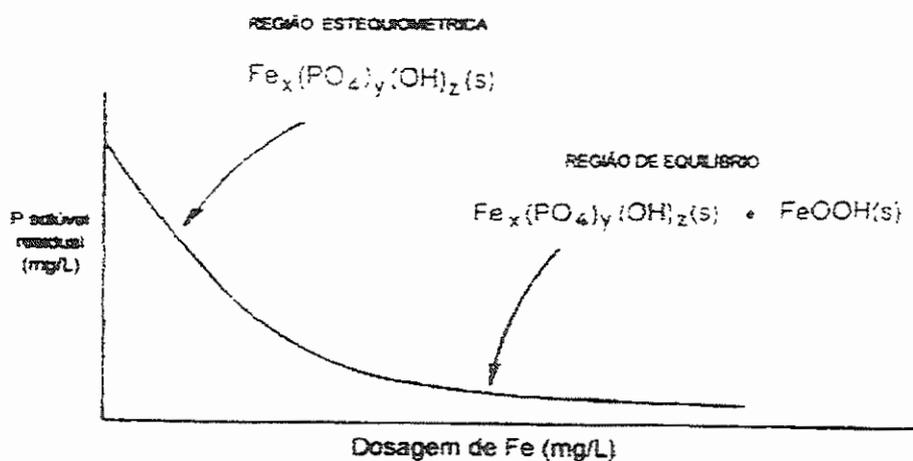


FIGURA 3.8 – Curva característica da concentração de ortofosfato residual em função da dosagem de Fe.
Fonte: JENKINS & HERMANOWICZ (1991)² apud PENETRA (1998).

De acordo com pesquisas feitas em ETEs existentes, a remoção de fósforo é de, no máximo, 40%, para afluentes com concentração média de fósforo de 2,7 mg P/L. Isso ocorre porque o fósforo contido na água residuária excede a quantidade necessária para a síntese dos organismos. Os microrganismos em lodos ativados absorvem fósforo em excesso, em determinadas circunstâncias e, enquanto há métodos que exploram esta característica, é difícil alcançar altos níveis de eficiência de remoção de fósforo que permaneçam estáveis. Sabe-se que o método de remoção de fósforo mais confiável é a precipitação química. A precipitação pode ser feita com cal e com sais metálicos, como os sais de ferro e alumínio; ambos os métodos removem o fósforo por meio da formação de compostos fosfóricos insolúveis e a posterior precipitação destes (XIE *et al.*, (1994).

Se os lodos ativados forem equipados com uma seção anaeróbia na qual o efluente primário seja introduzido juntamente com o lodo que retorna, o fosfato pode ser eficientemente acumulado pelas bactérias na seção aeróbia adjacente. Em comparação com a tradicional eliminação química de fosfato, não há a formação adicional de lodo com hidróxidos metálicos, não há aumento do teor de cátions (vindos da adição de sais de Fe e Al) e os custos são menores. Entretanto, a estabilidade do processo de eliminação biológica de fósforo normalmente não é suficiente para assegurar uma concentração de fósforo total no efluente de 1 mg/L por longos períodos. Por essa razão, uma dose adicional de produtos químicos pode ser necessária (RÖSKE & SCHÖNBORN, 1994).

CAMPOS *et al.*, (1996) obtiveram uma remoção de fosfato total de 84% no tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios, aplicando a dosagem de cal hidratada de 50 mg/L associada à dosagem de 100 mg/L de cloreto férrico. Já REALI *et al.*, (1998) constataram que, empregando o processo de FAD no tratamento de efluentes de reatores anaeróbios (UASB), aplicando uma dosagem de cloreto férrico de 65 mg/L, Gf de 80s⁻¹ e Tf entre 15 e 25 minutos, é possível obter uma remoção de fosfato total de 96%. PENETRA *et al.*, (1998), também

empregando a FAD no tratamento de efluentes de reatores anaeróbios (UASB), com aplicação de 65 mg/L de cloreto férrico e 19 g ar/m³ afluente (recirculação de 20%, em volume), obtiveram remoção de fosfato total de 95,4%.

O nitrogênio é um dos elementos mais importantes no metabolismo de ecossistemas aquáticos. Esta importância deve-se principalmente à sua participação na formação de proteínas, um dos componentes básicos da biomassa. Quando presente em baixas concentrações, pode atuar como fator limitante na produção primária de ecossistemas aquáticos.

O nitrogênio está presente nos ambientes aquáticos sob várias formas, por exemplo: nitrato (NO₃⁻), nitrito (NO₂⁻), amônia (NH₃), íon amônio (NH₄⁺), óxido nitroso (N₂O), nitrogênio molecular (N₂), nitrogênio orgânico dissolvido (peptídeos, purinas, aminas, aminoácidos, etc.), nitrogênio orgânico particulado (bactérias, fitoplâncton, zooplâncton e detritos), etc.

Dentre as diferentes formas, o nitrato, juntamente com o íon amônio, assumem grande importância nos ecossistemas aquáticos, uma vez que representam as principais fontes de nitrogênio para os produtores primários (ESTEVES, 1988).

Segundo CAMPOS (1989), o nitrogênio amoniacal presente nos corpos d'água geralmente tem origem em atividades industriais, na decomposição de resíduos orgânicos e efluentes de estações de tratamento de águas residuárias. De acordo com ESTEVES (1988), altas concentrações do íon amônio podem ter grandes implicações ecológicas, como por exemplo: influenciando fortemente a dinâmica do oxigênio dissolvido do meio, uma vez que para oxidar 1,0 mg do íon amônio (devido à nitrificação), são necessários cerca de 4,3 mg de oxigênio, e influenciando a comunidade de peixes, pois em pH básico o íon amônio se transforma em amônia (NH₃ livre, gasoso) que, dependendo de sua concentração, pode ser tóxica para esses organismos.

Os nitratos têm suas origens principais nas atividades agrícolas e industriais, e também podem ser lançados em corpos receptores por

estações de tratamento de águas residuárias que efetuam nitrificação (HOVEL *et al.*, 1982³ *apud* CAMPOS, 1989).

A atuação do homem na indústria (munições, fertilizantes, semi-condutores, leite, carnes, fibras sintéticas, etc.), agricultura e urbanização, aumenta o grau de complexidade do ciclo do nitrogênio de maneira considerável, pela inclusão de ampla diversidade de compostos de nitrogênio em partes distintas do ciclo (COLLINS *et al.*, 1988).

A presença de nitrogênio em corpos receptores provoca graves problemas à vida aquática e, em águas para abastecimento, também causa sérios prejuízos à saúde dos consumidores.

Em síntese, pode-se esperar que quando se efetua o lançamento de N-amoniaco em corpos receptores aeróbios, parte dele é removida por assimilação pelas algas, porém, como já foi dito, sempre que se verifica a nitrificação, ocorrerá a depleção de oxigênio do meio, alterando o ambiente aquático.

Se a presença de algas é benéfica na atenuação da agressão à vida aquática geral, sua proliferação excessiva, em consequência do excesso de nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo, também é extremamente danosa (CAMPOS, 1989).

Aparentemente os nitratos não provocam danos à flora e à fauna aquáticas, ao contrário do que acontece com os nitritos, que são tóxicos para a fauna (KERLAN, F. & SENELIER, Y. S., 1985⁴ *apud* CAMPOS, 1989).

É bastante conhecido e difundido o fato de que os nitritos e nitratos podem provocar metemoglobinemia em consumidores de água que contém concentrações elevadas desses íons. Os efeitos do nitrato na saúde pública

³ HOVEL, N.; DEGUIN, A.; MOULINOT, J. P.; RICHARD, Y.; RIZET, M & SIBONY, J. (1982). Elimination des formes azotées dans les eaux alimentaires. *Techniques & Sciences Municipales*. v. 77, pp. 292.

⁴ KERLAN, F. & SENELIER, Y. S. (1985). La Pollution des Eaux par les Composéés de L'Azote et du Phosphore. Les Moyens de Lutte. *Techniques e Sciences Municipales*. v. 80, n. 6, pp. 289-94.

geralmente não são consequência direta desse composto e sim do nitrito, produzido no próprio corpo, pela conversão do nitrato (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1984⁵ *apud* CAMPOS, 1989).

Os nitritos reagem com a hemoglobina e formam a metemoglobina. que, então, não terá mais a mesma capacidade de fixar o oxigênio no sangue (porque o ferro na hemoglobina foi oxidado), através de ligação reversível, para transportá-lo do pulmão até os tecidos (HOVEL *et al.*, 1982³ *apud* CAMPOS, 1989).

Segundo o Organização Mundial de Saúde, também deve haver prudência com relação a compostos nitrogenados (nitrosaminas e nitrosamidas), pois experiências com animais demonstram que esses compostos têm poder carcinogênico, teratogênico e mutagênico. Esses compostos podem ser produzidos no corpo de animais, a partir de nitritos, nitratos e de uma série grande de precursores, entre os quais destacam-se as aminas, as amidas e os pesticidas (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1984⁵ *apud* CAMPOS, 1989).

Existem muitas alternativas tecnicamente viáveis para o tratamento de águas residuárias visando a remoção de nitrogênio. Segundo METCALF & EDDY (1991), entre os processos e operações existentes, os mais usuais são: nitrificação e desnitrificação biológicas, cloração ao “break-point”, troca iônica seletiva de amônia e amônia “stripping”. Dentre esses, há ainda uma grande tendência para se usar processos biológicos para a remoção de nitrogênio, ou seja, a escolha dos processos de nitrificação e desnitrificação.

MENNEL *et al.*, (1974) promoveram a remoção do nitrogênio contido no efluente através do “stripping” da amônia por flotação. A água residuária primária foi dosada com 800 mg/L de cal até um pH de 11,5 pois, de acordo com a teoria, a um pH acima de 9,5 a maior parte da amônia presente está na forma de gás NH_3 e pode ser eliminada (“stripped”) do despejo. O

⁵ WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for Drinking Water Quality. Health Criteria and Other Supporting Information. Vol. 2. Belgium, WHO, 1984. 336 p.

tratamento resultou em reduções na DQO de 45 a 70%, reduções na DBO de aproximadamente 80% e reduções no NTK variando de 30 a 54%. Os autores afirmam que, quando esse “stripping” não ocorre com o auxílio da flotação, a razão entre o volume de ar/água está muito baixa ou o contato não é suficientemente vigoroso para permitir uma remoção significativa de amônia.

KROFTA *et al.*, (1995) utilizaram, para o tratamento avançado de águas residuárias municipais, um sistema piloto possuindo uma configuração particularmente projetada, que consistia de uma unidade primária de flotação e um clarificador com flotação/filtração combinadas. Esse sistema exibiu um alto grau de eficiência de remoção de SST (99%), a eliminação de 75-88% do carregamento orgânico e uma remoção razoável de fósforo e nitrogênio (82-96% e 30-55%, respectivamente).

CAMPOS *et al.*, (1996) determinaram, de acordo com seus ensaios de flotação para tratamento de efluente anaeróbico, que uma dosagem de cal hidratada de 50 mg/L associada a uma dosagem de 100 mg/L de cloreto férrico, pode fornecer 49% de remoção de NTK.

REALI *et al.*, (1998), realizando o processo de FAD para o tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, com a utilização de T_f igual a 15 minutos associado a G_f de $80s^{-1}$ e T_f de 25 minutos associado a G_f de $50s^{-1}$, obtiveram remoção de NTK de apenas 31%.

PENETRA *et al.*, (1998) obtiveram 24,3% de remoção de NTK para o ensaio de flotação com as condições que haviam fornecido a maior remoção de DQO, ou seja, empregando recirculação de 20%, em volume.

3.6 Custos envolvidos em sistemas de FAD

De acordo com VIITASAARI *et al.*, (1995), os custos na flotação consistem de custos de capital e operação. Quando comparados à

sedimentação, tanto a área quanto o volume das unidades da flotação são essencialmente menores, resultando em menores custos de construção. São utilizadas frequentemente estruturas pré-fabricadas, o que torna a construção mais fácil. Como até os menores flocos podem ser flotados, os custos de construção da unidade de floculação também podem ser reduzidos. Por outro lado, há um aumento nos custos devido à necessidade de equipamentos adicionais associados à flotação.

Um dos fatores mais importantes é a frequente possibilidade do uso de locais existentes devido ao pequeno tamanho da unidade de flotação. Isso é uma vantagem, pois há casos onde não há área adicional disponível fora da estação ou esta não é adequada. Devido ao volume de água no tanque de flotação ser relativamente pequeno, é rara a necessidade de fundação pesada. Quando se usa flotação, usualmente não há necessidade de espessamento adicional do lodo.

Os custos operacionais variam muito de caso para caso. Eles consistem de bombeamento, uso de produtos químicos, dissolução do ar e distribuição da água saturada, aquecimento, iluminação e ventilação, tratamento e disposição do lodo e operação e manutenção.

No tratamento químico, os precipitantes químicos podem representar a maior fração individual dos custos operacionais. Devido aos flocos grandes não serem absolutamente necessários na flotação, há uma economia devido à redução na dose desses produtos químicos.

O consumo de energia elétrica para dissolução do ar e distribuição da vazão de recirculação fica em torno de $0,03 \text{ kWh/m}^3$ da água tratada. Esse consumo é válido para o tratamento de água potável, quando a pressão é 600 kPa e a taxa de recirculação é de 10%. Em aplicações para águas residuárias, o consumo de eletricidade pode ser maior, devido à necessidade de uma maior vazão de recirculação, à temperatura do despejo ser maior e ao conteúdo de sólidos na água de recirculação ser maior. Devido ao adensamento não ser necessário, os custos de energia para a realização deste são eliminados.

Os custos de aquecimento, iluminação e ventilação são proporcionais ao volume das instalações, que é essencialmente menor no caso da flotação do que na sedimentação.

A situação é algo diferente com águas residuárias contendo altas concentrações de sólidos suspensos. BRATBY & MARAIS (1976) calcularam os custos da clarificação para sistema de lodos ativados e constataram que os custos totais da flotação serão maiores do que os da sedimentação se os sólidos suspensos do afluente ultrapassarem 1000 mg/L. Acima dessa concentração, o crescimento dos custos operacionais da flotação favorecem a sedimentação. Nesses cálculos, os custos com a área para construção da unidade e com o processamento do lodo não foram considerados.

Os custos com equipamento para remoção de lodo podem ser de 10 a 20% do custo total da instalação. Como o sistema de saturação representa aproximadamente 50% do custo com energia do processo de flotação, é importante otimizar o projeto do sistema de recirculação para minimizar os custos operacionais.

As circunstâncias locais podem ter uma influência significativa no custo de um processo particular, como por exemplo a variação substancial do custo da energia em diferentes países.

A flotação, quando comparada à sedimentação, tende a ter menores custos de capital porém maiores custos operacionais. Qualquer comparação de custos, entretanto, deve levar em conta as vantagens adicionais do processo como melhor qualidade da água tratada, maior flexibilidade da instalação, menor tempo de partida (≈ 45 min para flotação), manuseio do lodo mais fácil, a dispensa do uso de polieletrólitos e a construção de tanques mais rasos e compactos (ZABEL, 1985).

4 Materiais e Métodos

4.1 Considerações iniciais

Como descrito no item 2, o presente trabalho teve como proposta a investigação do desempenho da flotação por ar dissolvido (FAD) no lugar do decantador secundário, como pós-tratamento para o efluente da estação de tratamento de esgotos, ETE – Piracicamirim.

O trabalho foi realizado com a utilização do equipamento de flotação por ar dissolvido, construído em escala de laboratório, denominado Flotatest. A mistura rápida foi feita no equipamento também em escala de laboratório denominado Jar-test e a floculação foi feita no próprio Flotatest. Para promover a coagulação do efluente foram utilizados, isoladamente, polímero catiônico e cloreto férrico e ambos usados simultaneamente. Os parâmetros testados foram dosagem de produto químico e razão ar/sólidos (A/S).

Os ensaios foram divididos em quatro etapas. Na primeira foram escolhidos quatro polímeros a serem utilizados nas fases posteriores. Nas outras três etapas foi selecionado um polímero dentre os quatro previamente escolhidos e testadas várias dosagens desse polímero, de cloreto férrico e de uma associação entre o polímero e o cloreto férrico, bem como vários valores de A/S, de acordo com as grades de ensaio programadas. Todos os ensaios foram realizados utilizando-se instalação de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório.

4.2 Descrição do sistema de tratamento da ETE - Piracicamirim

Segundo PASSIG *et al.*, (1999), a ETE – Piracicamirim, localizada em Piracicaba, deverá atender a uma população de aproximadamente 100.000 habitantes, com vazão de 500 L/s (final de plano, 2015).

O projeto da ETE – Piracicamirim visou a integração de sistemas biológicos de tratamento, através de processos anaeróbio e aeróbio, com o intuito da redução de custos e inovação tecnológica.

A ETE – Piracicamirim conta com sistema de gradeamento mecanizado, seguido por caixa de areia aerada. O efluente da caixa de areia é encaminhado para três módulos de reatores anaeróbios (UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket), de 2.772 m³ cada. Os módulos de reatores são por sua vez divididos em quatro células de 693 m³ (ver FOTOGRAFIA 4.1).

Os efluentes dos reatores anaeróbios são encaminhados para uma lagoa aerada com volume de 8.624 m³, com oito aeradores superficiais de alta rotação e fluxo descendente de 15 CV (ver FOTOGRAFIA 4.2), seguida de decantadores secundários de placas paralelas, também divididos em 3 módulos de 845 m³ (ver FOTOGRAFIA 4.3). O efluente final passa por um canal aerado artificialmente, por calha Parshall e por um canal em cascata antes de atingir o corpo receptor (ver FOTOGRAFIA 4.4). Os sólidos descartados da caixa de areia são encaminhados para o leito de drenagem de areia, cujo percolado é lançado na lagoa aerada. Os lodos já estabilizados, descartados dos reatores de manta de lodo, são encaminhados para um sistema de centrifugação, antes de sua disposição final.

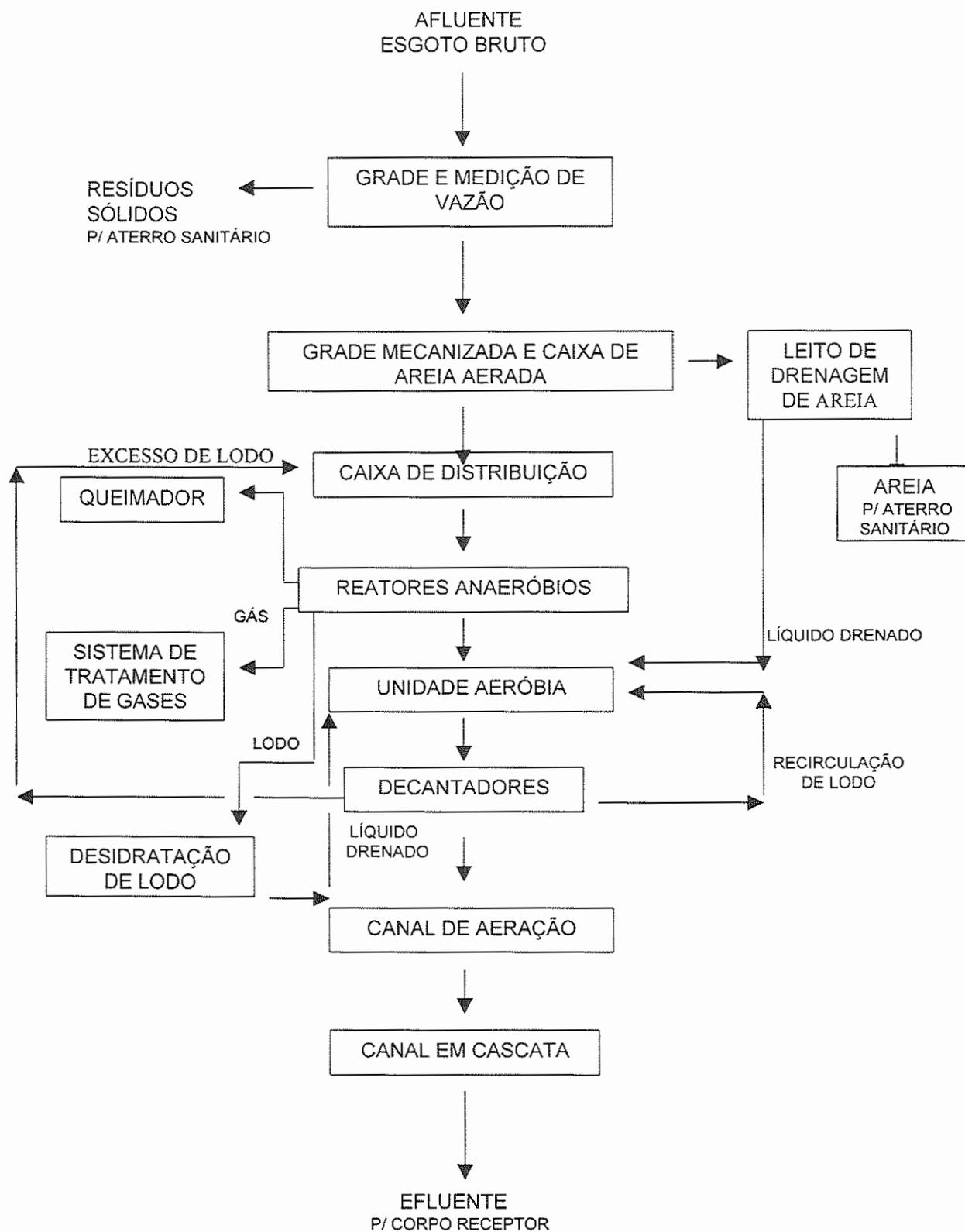


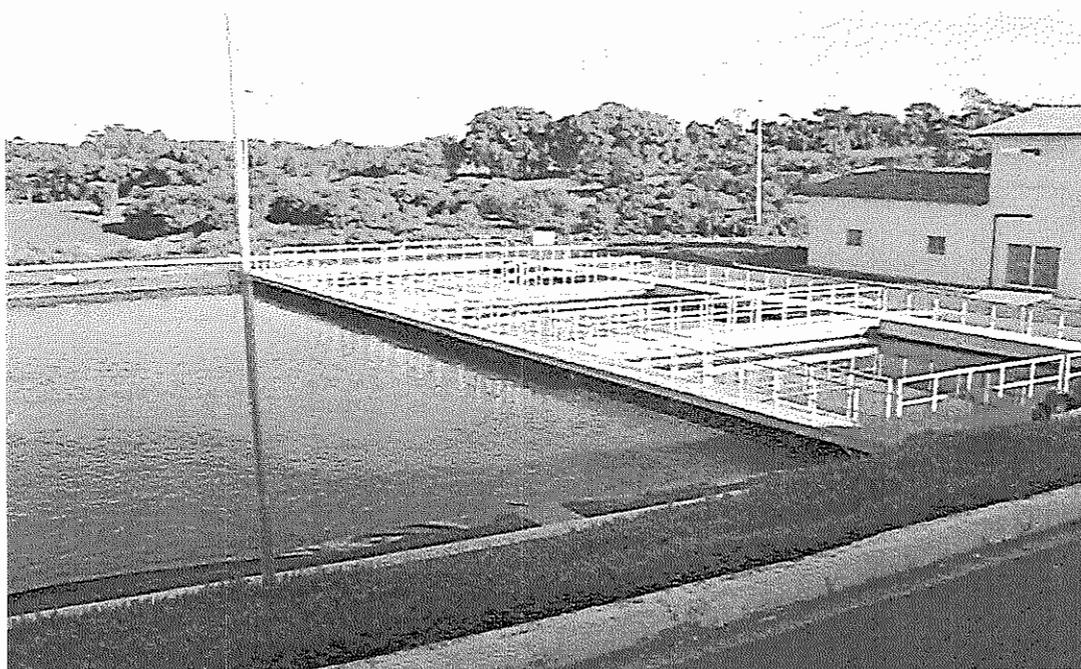
FIGURA 4.1 - Fluxograma simplificado do sistema de tratamento



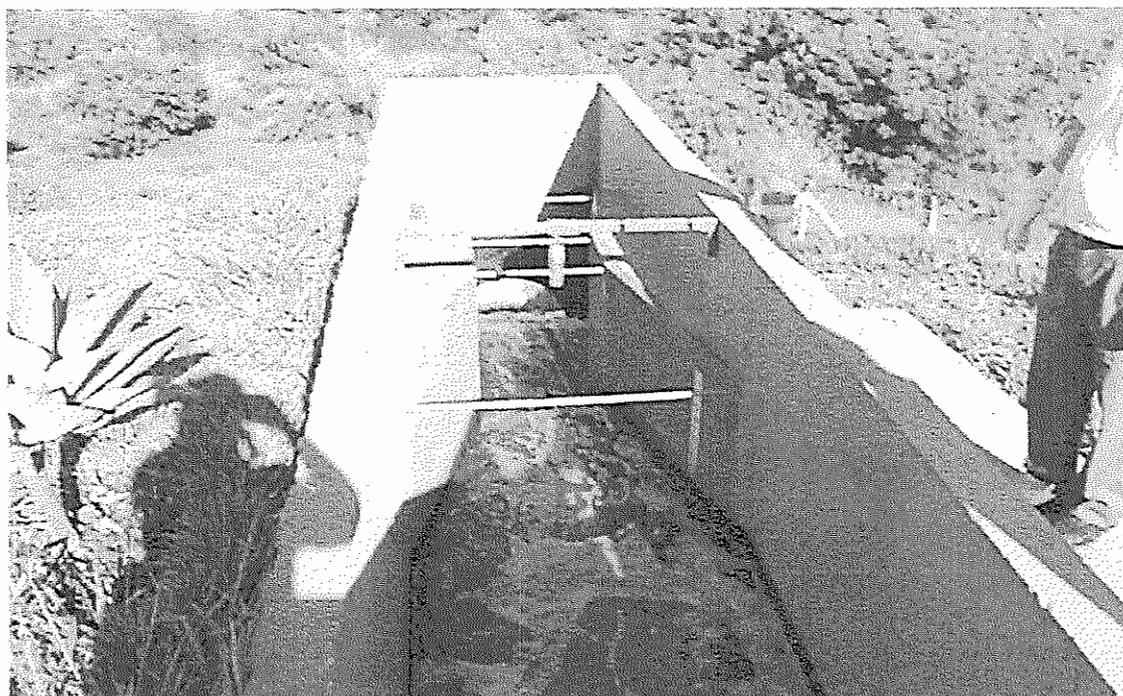
FOTOGRAFIA 4.1 – Fotografia dos 3 módulos de reatores anaeróbios (UASBs).



FOTOGRAFIA 4.2 – Fotografia da lagoa com os aeradores.



FOTOGRAFIA 4.3 – Fotografia onde aparecem os decantadores.



FOTOGRAFIA 4.4 – Fotografia do canal em cascata.

4.3 Descrição das instalações utilizadas na pesquisa

4.3.1 Descrição do equipamento de floculação/flotação em escala de laboratório (Flotateste)

O equipamento para ensaios de flotação em escala de laboratório (Flotateste) foi desenvolvido no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP e é composto por quatro colunas cilíndricas (colunas de flotação), independentes entre si e interligadas a uma câmara de saturação (FOTOGRAFIA 4.5 e FIGURA 4.2).

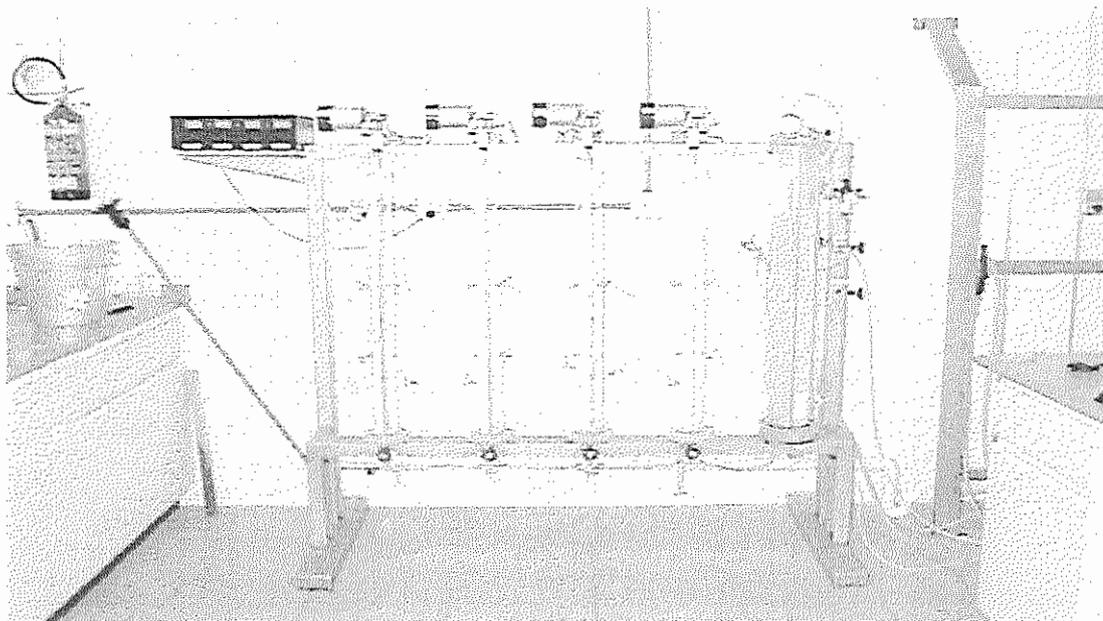
Cada coluna possui 60 mm de diâmetro interno, 950 mm de altura, parede de acrílico com 5 mm de espessura e capacidade útil para 2,7 litros.

Para promover a floculação, cada coluna possui agitador próprio (tipo eixo vertical, paletas paralelas ao eixo, dois braços e uma paleta por braço), impulsionado por meio de um conjunto moto-redutor e ligado a um regulador de tensão para controle da energia fornecida para a floculação (rotação do agitador).

Todas as colunas de flotação são interligadas a uma câmara de saturação comum, constituída de um tubo de acrílico com espessura de parede de 10 mm, 110 mm de diâmetro interno, 1000 mm de altura e volume útil de 9,5 litros. A câmara de saturação possui manômetro para controle da pressão de saturação, válvula de segurança, entrada de ar comprimido e entrada de água proveniente da rede de abastecimento público. Para o fornecimento do ar comprimido, foi utilizado um compressor de ar Schulz, modelo MSV 10 VL/200 – 2 HP – 1 estágio, 810 rpm. O controle da vazão da água saturada é feita por meio de registros de agulha, localizados na entrada das colunas de flotação.

A coleta das amostras do líquido clarificado era feita através de pontos localizados ao longo da altura das colunas de flotação. Essas

amostras, depois de caracterizadas, eram utilizadas para a construção de curvas de flotação, de acordo com método proposto por REALI (1991).



FOTOGRAFIA 4.5 – Fotografia do equipamento de flotação/flotação em escala de laboratório (Flotateste).

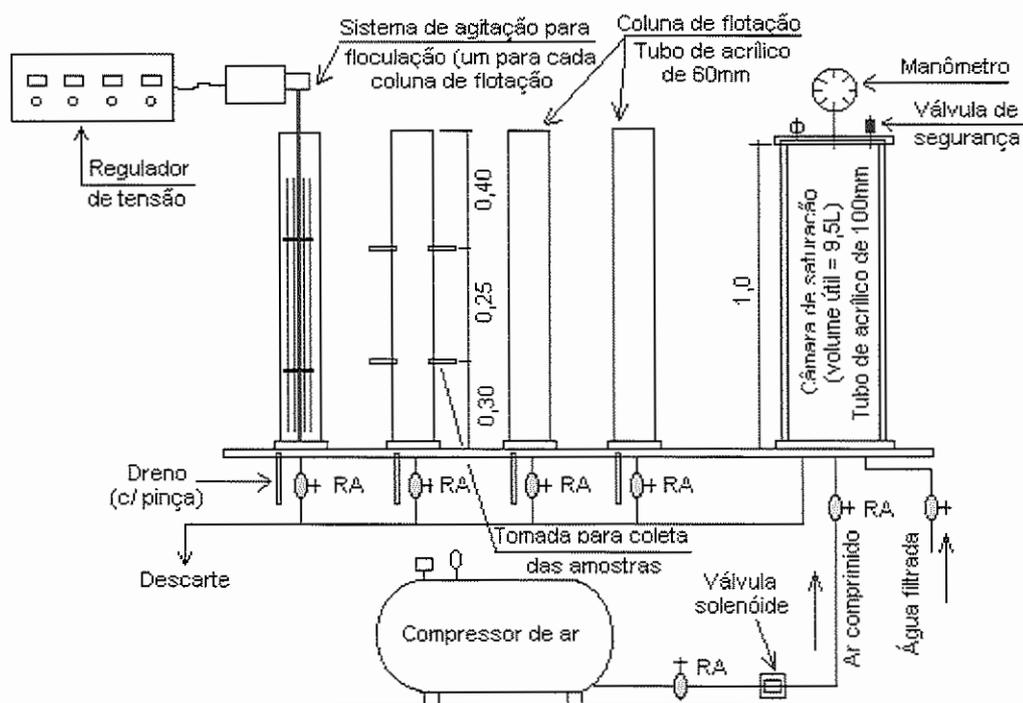


FIGURA 4.2 – Esquema geral do Flotateste.

4.3.2 Outros equipamentos e materiais utilizados nos ensaios

Além do Flotatest, outros equipamentos foram utilizados durante os ensaios e estão listados a seguir:

- 1) Equipamento denominado Jar-test, utilizado para efetuar a mistura rápida nos ensaios. Este equipamento foi utilizado pois sabe-se que o Flotatest não é adequado para efetuar a mistura rápida quando se emprega cloreto férrico como coagulante, pois a relação altura/diâmetro das colunas é de tal forma elevada que impossibilita a distribuição uniforme do cloreto ao longo de sua altura;
- 2) Turbidímetro, marca HACH, modelo 2100P;
- 3) Espectrofotômetro, marca HACH, modelo DR-4000, para leitura de cor aparente, fosfato total, nitrato e nitrito;
- 4) Reator para digestão de DQO, marca HACH, capacidade para 25 tubos;
- 5) Espectrofotômetro, marca HACH, modelo DR-2000, para leitura de DQO, sulfeto e sulfato.
- 6) Autoclave, marca PHOENIX, amplitude de 100 a 143°C e 0 a 3 Kgf/cm², para digestão das amostras usadas na determinação de fosfato total;
- 7) Unidade digestora para nitrogênio, marca MARCONI, modelo 851;
- 8) Unidade destiladora para nitrogênio, marca MARCONI, modelo 036;
- 9) Bomba de vácuo, marca THOMAS, modelo 2107VG20TFEL, para filtração das amostras usadas na determinação dos sólidos suspensos;
- 10) Membrana fibra de vidro GF 52/C, Ø 47mm, abertura 1,2 µm, marca SCHLEICHER & SCHUELL, para filtração das amostras usadas na determinação dos sólidos suspensos;
- 11) Membrana filtrante ME24, Ø 47mm, abertura 0,2 µm, marca SCHLEICHER & SCHUELL, para filtração das amostras usadas na determinação de nitrato e nitrito;

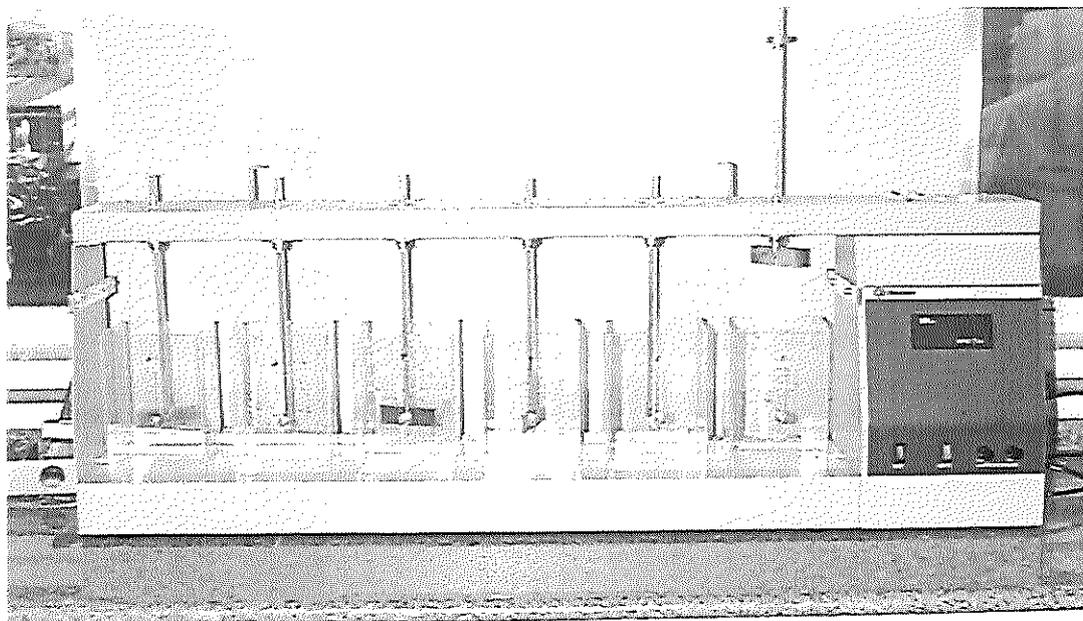
- 12) Estufa, marca FANEM, modelo 320-SE, para secagem das amostras usadas na determinação dos sólidos suspensos;
- 13) Mufla, marca FORLABO, para calcinação das amostras usadas na determinação dos sólidos suspensos;
- 14) Balança analítica, marca DENVER INSTRUMENT, modelo AA-160, sensibilidade de 0,0001g;
- 15) Balança, marca HELMAC 1000, sensibilidade de 1000 mg;
- 16) Bureta digital, marca BOECO, modelo DCB5000;
- 17) Medidor de pH, marca ORION, modelo 410A;
- 18) Vidrarias diversas.

4.4 Ensaio de clarificação por flotação utilizando o Flotateste

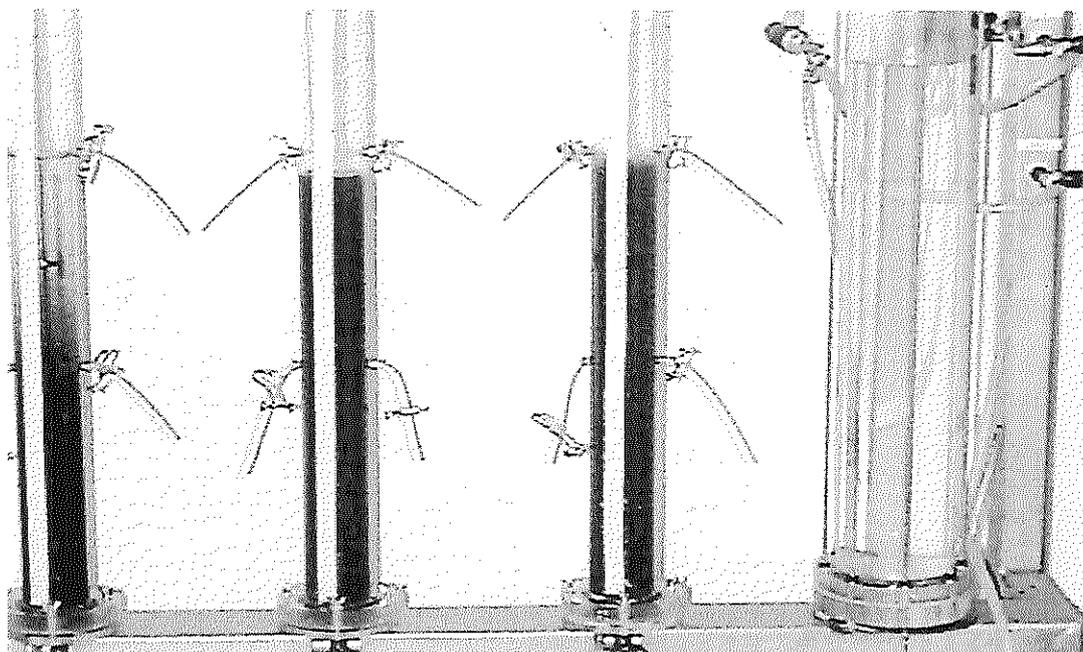
O ensaio de clarificação utilizando o Flotateste foi realizado da seguinte forma: quando se pretendia utilizar o coagulante inorgânico (cloreto férrico), utilizava-se o aparelho Jar-test para promover a mistura rápida entre a solução de coagulante e a amostra homogeneizada, pois este atinge maiores valores de gradiente de mistura (G) (ver FOTOGRAFIA 4.6). Em seguida, colocava-se imediatamente a amostra na coluna de flotação e ligava-se o agitador para promover a mistura lenta (floculação). Nos ensaios em que estava prevista a adição de polímeros sintéticos como auxiliar de floculação/flotação, os mesmos eram adicionados diretamente às colunas de flotação, após o início do período de floculação (ver FOTOGRAFIA 4.7). Terminado o tempo previsto para a floculação, abria-se o registro de agulha que controla a entrada da recirculação pressurizada, proveniente da câmara de saturação, promovendo a flotação dos flocos em suspensão presentes na câmara de flotação (ver FOTOGRAFIA 4.8). Enquanto os aglomerados “flocos-microbolhas de ar” eram submetidos à flotação, coletavam-se amostras em intervalos de tempo correspondentes às velocidades de

flotação previamente escolhidas. O ponto para coleta de amostra é mostrado na FOTOGRAFIA 4.8.

As velocidades de flotação, nesse tipo de ensaio, eram calculadas de acordo com o método proposto por REALI (1991).



FOTOGRAFIA 4.6 – Fotografia do equipamento de mistura rápida em escala de laboratório (Jar-test).



FOTOGRAFIA 4.7 – Fotografia que mostra a mistura lenta (floculação).



FOTOGRAFIA 4.8 – Fotografia onde está ocorrendo a flotação.

4.5 Procedimentos para o cálculo de alguns parâmetros utilizados nos ensaios

4.5.1 Cálculo da massa de sólidos suspensos totais removidos por flotação

Com uma amostra retirada do Jar-Test após a mistura rápida e com uma amostra do efluente da flotação fêz-se a determinação dos sólidos suspensos totais (SST_{coag} e SST_f). Sabendo-se os valores do volume de amostra coagulada (V_{coag} = volume inserido na coluna de flotação) e do volume de amostra flotada (V_f = volume inserido na coluna de flotação + volume de água pressurizada proveniente da câmara de saturação), é possível o cálculo da massa de sólidos removidos por flotação, da seguinte forma:

Massa de sólidos removidos na flotação = Massa de SST inicial – Massa de SST efluente

onde:

$$\text{Massa de SST}_{\text{inicial}} \text{ (mg)} = V_{\text{coag}} \text{ (L)} \cdot \text{SST}_{\text{coag}} \text{ (mg/L)} \quad (1)$$

$$\text{Massa de SST}_{\text{efluente}} \text{ (mg)} = V_f \text{ (L)} \cdot \text{SST}_f \text{ (mg/L)} \quad (2)$$

Portanto,

$$\begin{aligned} \text{Massa de sólidos removidos na flotação (mg)} &= V_{\text{coag}} \text{ (L)} \cdot \text{SST}_{\text{coag}} \text{ (mg/L)} \\ &- V_f \text{ (L)} \cdot \text{SST}_f \text{ (mg/L)} \end{aligned}$$

Para obtenção da relação “massa de SST removidos por flotação / unidade de volume de esgoto tratado”, tem-se:

$$\begin{aligned} &\text{Massa de sólidos removidos na flotação (mg)} / \text{volume de esgoto tratado (L)} \\ &= \\ &= [V_{\text{coag}} \text{ (L)} \cdot \text{SST}_{\text{coag}} \text{ (mg/L)} - V_f \text{ (L)} \cdot \text{SST}_f \text{ (mg/L)}] / V_{\text{coag}} \text{ (L)} \end{aligned}$$

4.5.2 Cálculo da dosagem dos polímeros e da razão ar/sólidos (A/S)

Quando o processo de flotação por ar dissolvido é executado com a pressurização de apenas uma parcela do efluente recirculada, a razão ar/sólidos deve ser calculada através da fórmula a seguir, extraída de METCALF & EDDY (1991):

$$A/S = K \cdot s_a \cdot (f \cdot P - 1) \cdot R / \text{SST} \cdot Q$$

Sendo: A/S = razão ar/sólidos, (mg ar/ mg sólidos)

s_a = solubilidade do ar, (mL/L)

f = fração de ar dissolvido à pressão P

P = pressão, (atm)

$= p + 101,35 / 101,35$

p = pressão padrão, (kPa)

R = vazão de recirculação pressurizada, (m³/d), ou volume de água pressurizada proveniente da câmara de saturação, em ensaios tipo batelada (L)

SST = Sólidos suspensos totais no afluente, (mg/L)

Q = vazão afluente, (m³/d), ou volume de água bruta em ensaios tipo batelada (L)

Temp. °C	0	10	20	30
s_a , mL/L	29,2	22,8	18,7	15,7

O fator K é a massa (em miligramas) de 1 mL de ar (adotado igual a 1,25 no presente trabalho) e o termo (-1) dentro dos parênteses leva em conta o fato de que o sistema está sendo operado sob condições atmosféricas. No caso desta pesquisa foi admitido um valor de " f " igual a 1, pois admitiu-se que após 10 minutos de aeração sob a pressão aplicada, a água na câmara atingia uma saturação de 100%. A pressão utilizada nos ensaios foi de 450 kPa e o valor do parâmetro s_a adotado igual a 18,7 mL/L, correspondente a 20°C, de acordo com METCALF & EDDY (1991).

Cada bateria de ensaios de flotação com o efluente da lagoa aerada da ETE – Piracicamirim era iniciada tão logo eram recebidos os recipientes contendo o volume de amostras vindo de Piracicaba – S.P. Com vistas a prevenir o máximo possível sua degradação, as amostras eram colocadas em câmara fria existente no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do SHS – EESC – USP. Além disso, procurou-se executar cada uma das baterias de ensaios no menor intervalo de tempo possível. Para se

obter maior precisão, era necessário que se fizesse uma estimativa inicial da concentração de sólidos suspensos totais nas amostras recebidas, para que se pudesse calcular as dosagens dos polímeros, que seriam expressas em g/Kg SST, bem como as quantidades de ar dissolvido a ser fornecido em cada ensaio de flotação, quantidades essas que resultassem nos valores de A/S programados para serem investigados.

Como a determinação dos valores de SST da amostra demorava muitas horas, optou-se pela utilização de método indireto para estimativa do teor de SST nas amostras. O método consistiu em se construir uma curva de correlação entre o teor de SST e turbidez, através da qual era possível estimar-se o primeiro parâmetro através da determinação expedita do segundo, nas amostras oriundas da ETE – Piracicamirim, objeto do presente estudo.

Para isso, foi coletada uma amostra do líquido misto de um reator microaerado (operado com valores de oxigênio dissolvido menores que 1 mg/L) em escala de laboratório, alimentado com o efluente de um reator anaeróbio de leite expandido, operado pela doutoranda Eng^a. Margarida Marchetto. Optou-se por elaborar a curva de correlação com amostra proveniente desse reator por tratar-se de um sistema muito semelhante ao da ETE – Piracicamirim, além do fato de estar localizado no Campus USP – São Carlos.

Deixou-se que esta amostra decantasse e, no decorrer desse período, foram coletadas 5 amostras do sobrenadante para as quais foram feitas leituras de turbidez e determinação dos SST. Com esses dados elaborou-se um gráfico de Turbidez X SST (ver página 97) e, a partir dessa relação, foi possível estimar grosseiramente os valores de SST de todas as amostras a partir dos valores de turbidez que essas apresentavam.

A dosagem de polímero, por sua vez, era calculada da seguinte forma:

$$DP = MP \cdot 1000 / MSST$$

Sendo: DP = dosagem de polímero, (g polímero / Kg SST)
 MP = massa de polímero, (g)
 MSST = massa de sólidos suspensos totais, (Kg)

O cálculo do volume de polímero a ser utilizado, a partir da dosagem calculada de acordo com a equação anterior, era feito da seguinte maneira:

$$V_{\text{pol.}} = DP \cdot SST \cdot V_{\text{am.}} / CP \cdot 1000$$

Sendo: $V_{\text{pol.}}$ = volume de polímero a ser dosado, (L)
 DP = dosagem de polímero, (g polímero / Kg SST)
 SST = sólidos suspensos totais presentes na amostra de afluente floculado, (mg/L)
 CP = concentração da solução, (mg/L). Exemplo: para uma concentração de solução de 0,015%, CP = 150 mg/L.

Como a dosagem do polímero também era relativa aos sólidos suspensos totais da amostra, foi utilizada a mesma relação de Turbidez X SST descrita anteriormente.

No decorrer do trabalho percebeu-se que essa relação Turbidez X SST não estava sendo satisfatória, ou seja, os resultados de SST inferidos através da turbidez estavam muito longe dos valores obtidos nas determinações posteriores de sólidos suspensos. Com isso, muitas vezes a dosagem de polímero e o A/S aplicados nos ensaios acabaram sendo muito diferentes dos valores que se desejava inicialmente aplicar, pois estes eram calculados com base nos valores de SST estimados.

4.6 Primeira etapa – Ensaios preliminares com o Flotatestes para determinação dos polímeros a serem utilizados nas etapas seguintes do trabalho

O objetivo dessa fase foi a seleção de 4 polímeros de um total de 21 testados, sendo estes catiônicos, aniônicos e não iônicos, como pode ser visto na TABELA 4.1. Para a realização desses ensaios foi utilizado o efluente do Reator Anaeróbico de Leito Expandido (RALEX), construído no campus da EESC – USP, que trata o esgoto proveniente de um bairro de São Carlos. A amostra do efluente do RALEX, antes de ser utilizada nos ensaios, foi caracterizada quanto à temperatura, pH, turbidez e DQO bruta e filtrada. A escolha do reator RALEX para coleta das amostras deveu-se ao fato do seu efluente ser semelhante ao efluente dos reatores UASB que alimentavam a lagoa aerada da ETE – Piracicamirim, aliado à facilidade de obtenção de amostras do efluente do referido reator (RALEX).

Devido à concentração de SST na amostra bruta do efluente do RALEX não ser muito elevada (faixa de 50 a 100 mg/L), os ensaios feitos com o Flotatestes foram de clarificação (segundo o procedimento descrito no item 4.4).

Essa fase de estudo foi realizada em parceria com o Eng^o. Rogério Gomes Penetra, doutorando do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP, também sob orientação do Prof. Dr. Marco A. P. Reali, tendo em vista a utilização dos mesmos dados em seu trabalho de doutorado.

Essa etapa preliminar foi dividida em duas baterias de ensaios. Na primeira bateria foram testados 10 polímeros. Na segunda foram testados 11 polímeros e fez-se uma repetição com aquele que apresentou os melhores resultados nos ensaios anteriores. Todos eram polímeros sintéticos, do tipo comercial, marca ADESOL, cujas características estão descritas na TABELA 4.1:

TABELA 4.1 – Características dos polímeros testados no item 4.6.

Primeira Bateria de Ensaio			
Tipo de floculante	Especificação	Carga Iônica	Peso Molecular
Polímero Poliacrilamida	W 301	Fortemente Aniônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	W 302	Levemente Aniônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	W 303	Não Iônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	W 320	Catiônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	W 341	Catiônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	W 360	Catiônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	W 360 C	Catiônico	Alto
Polímero Poliamina	W 3076	Catiônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	W 3081	Catiônico	Alto
Polímero Poliamina	G 9049	Catiônico	Baixo
Segunda Bateria de Ensaio			
	Polímero	Carga Iônica	Peso Molecular
Polímero Poliacrilamida	G 991	Median. Catiônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	G 992	Median. Catiônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	G 997	Levemente Aniônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	G 998	Fortemente Aniônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	G 999	Não Iônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	G 3055	Levemente Aniônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	G 9046	Fortemente Catiônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	G 9047	Fortemente Catiônico	Alto
Polímero Poliacrilamida	G 9048	Levemente Catiônico	Alto
Polímero Poliamina	G 9049	Catiônico	Baixo
Polímero Poliacrilamida	G 9050	Fortemente Aniônico	Altíssimo
Polímero Poliacrilamida	G 9052	Median. Aniônico	Alto

Peso molecular: Baixo \Rightarrow até 10^3

Médio \Rightarrow de 10^3 a 10^6

Alto \Rightarrow maior que 10^6

As soluções para todos os polímeros foram preparadas com água destilada, numa concentração de 0,05 % (500 mg/L). Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios. Foi utilizada uma dosagem de polímero de 4,0 mg/L; a vazão de recirculação pressurizada foi de 20% ($R = 20\%$, em volume); a pressão de saturação (P_{sat}) foi de 450 ± 10 kPa; $T_{mr} = 30$ s; $G_{mr} = 600$ s^{-1} ; $T_f = 20$ min.; $G_f = 60$ s^{-1} e as velocidades de flotação estudadas foram: $V_{flot1} = 5,0$ cm/min.; $V_{flot2} = 10,0$ cm/min.;

Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min. O pH não foi um parâmetro monitorado durante esses ensaios, bem como no decorrer do trabalho. Na TABELA 4.2 pode-se ver a sequência de ensaios para a seleção dos quatro polímeros.

A caracterização físico-química das amostras, assim como os ensaios de flotação, foram realizados no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR) da Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

TABELA 4.2 - Ensaios para escolha dos quatro polímeros a serem utilizados posteriormente (primeira etapa do trabalho – item 4.6).

Objetivo da etapa	Parâmetros Fixos dos Ensaios	Caracterização das Amostras
Investigação do desempenho da flotação em ensaios com adição de 10 diferentes tipos de polímeros sintéticos	T _{mr} = 30 s; G _{mr} = 300 s ⁻¹ ; T _f = 20 min.; G _f = 60 s ⁻¹ ; R = 20% (em volume); P _{sat} = 450 ± 10 kPa; Vflot1 = 5,0 cm/min.; Vflot2 = 10,0 cm/min.; Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min.; Dosagem dos polímeros = 4,0 mg/L; Temperatura do efluente do RALEX = 22 ± 1 °C.	Leituras de turbidez das amostras correspondentes a todas as velocidades de flotação e determinação da DQO bruta e filtrada da amostra correspondente à Vflot = 10 cm/min.
Investigação do desempenho da flotação em ensaios com adição de 11 diferentes tipos de polímeros sintéticos e repetição do ensaio com o melhor polímero da etapa anterior	T _{mr} = 30 s; G _{mr} = 300 s ⁻¹ ; T _f = 20 min.; G _f = 60 s ⁻¹ ; R = 20% (em volume); P _{sat} = 450 ± 10 kPa; Vflot1 = 5,0 cm/min.; Vflot2 = 10,0 cm/min.; Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min.; Dosagem dos polímeros = 4,0 mg/L; Temperatura do efluente do RALEX = 22 ± 1 °C.	Leituras de turbidez das amostras correspondentes a todas as velocidades de flotação e determinação da DQO bruta e filtrada da amostra correspondente à Vflot = 10 cm/min.

4.7 Segunda etapa – Ensaio com o Flotatest, alimentado com o efluente da lagoa aerada da ETE – Piracicamirim, para seleção de um polímero dentre os quatro escolhidos na primeira etapa, determinação da dosagem ótima e razão ar/sólidos (A/S) ótima

Nessa fase de estudo, foi selecionado apenas um polímero dentre os polímeros W 341, W 360 C, G 9046 e G 9049, escolhidos na primeira etapa (realizada com o efluente do RALEX do Campus USP – São Carlos) e a determinação da dosagem e razão A/S mais adequadas.

Para a realização desses ensaios foi feita a primeira viagem à ETE – Piracicamirim e foram coletados 250 litros de amostra do efluente da lagoa aerada.

A coleta das amostras foi feita na saída da lagoa, em três diferentes poços para coleta, distribuídos ao longo de uma passarela localizada entre a lagoa e os decantadores (FOTOGRAFIA 4.9). As amostras eram coletadas por um funcionário da ETE com a utilização de um balde (FOTOGRAFIA 4.10) e acondicionadas em galões plásticos de 10 e 20 litros (FOTOGRAFIA 4.11).

Chegando ao Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR), onde foram realizados os ensaios de flotação, as amostras que não seriam utilizadas no mesmo dia foram colocadas em câmara fria, a uma temperatura de 4 ± 1 °C, para sua conservação. Para posterior utilização das amostras conservadas na câmara fria, sua temperatura era elevada até a temperatura ambiente com a utilização de um aquecedor.

O volume de efluente necessário para os ensaios do dia era colocado num recipiente grande e, a cada vez que se retirava uma parcela para utilização, o líquido era cuidadosamente homogeneizado, para que fossem coletadas amostras representativas.

Os ensaios tentaram representar o máximo possível o processo em um flotor contínuo, ou seja, no qual uma parcela do próprio líquido

clarificado (efluente da unidade de flotação) é encaminhada para a câmara de saturação e usada como vazão de recirculação pressurizada. Para isso, encheu-se a câmara de saturação acoplada ao Flotateste com uma parcela da própria amostra a ser flotada. Esse líquido consistia do sobrenadante da amostra previamente sedimentada e filtrado em filtro de tecido, com vistas a se obter amostra com baixa concentração de SST no interior da câmara de saturação.

O efluente da lagoa e o líquido destinado à câmara de saturação foram então caracterizados quanto a temperatura, pH, turbidez, cor aparente, DQO bruta e filtrada e Sólidos Suspensos (Totais, Fixos e Voláteis). Como as determinações de DQO e sólidos da amostra bruta eram feitos após a realização dos ensaios de flotação, juntamente com as amostras flotadas, todos os parâmetros que dependiam do valor de SST (dosagem de polímero e A/S) foram calculados com base no procedimento descrito no item 4.5.2.

Essa segunda etapa do trabalho foi dividida em duas baterias de ensaios, de acordo com o FLUXOGRAMA 4.1.



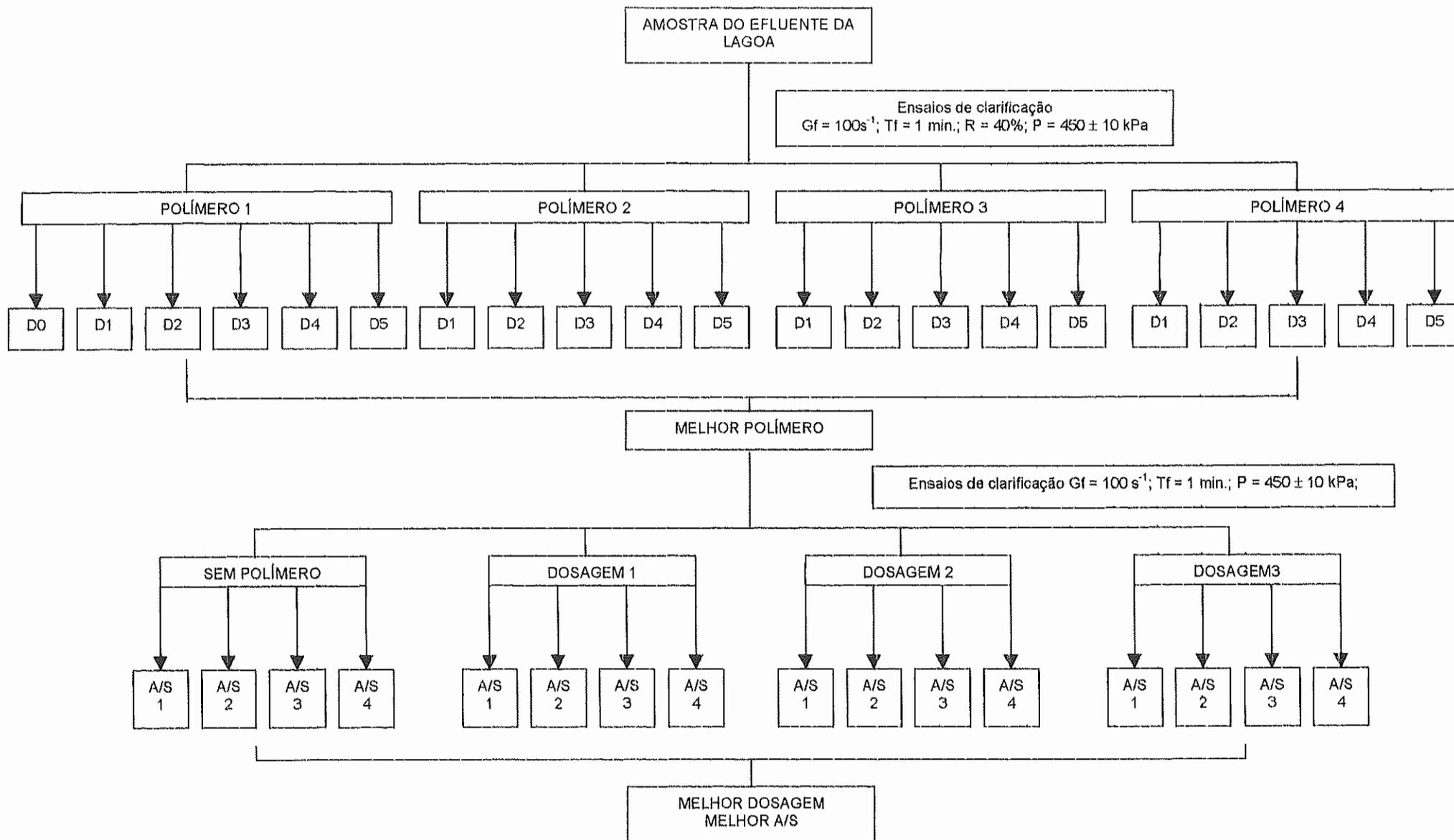
FOTOGRAFIA 4.9 – Fotografia mostrando a passarela onde se localizavam os poços para coleta das amostras do efluente da lagoa aerada.



FOTOGRAFIA 4.10 – Fotografia que mostra como era feita a coleta das amostras.



FOTOGRAFIA 4.11 – Fotografia que mostra a colocação do efluente nos galões.



FLUXOGRAMA 4.1 – Grade de ensaios para a segunda etapa do trabalho (itens 4.7.1 e 4.7.2).

4.7.1 Ensaios de clarificação por flotação com a aplicação dos quatro polímeros, variando a dosagem

Na primeira bateria foram feitos ensaios de flotação com os polímeros catiônicos W 341, W 360 C, G 9046 e G 9049. Todas as soluções dos polímeros, para esses ensaios e todos os outros realizados no decorrer da pesquisa, foram preparadas com água destilada, numa concentração de 0,015 % (150 mg/L). Essa concentração baixa foi escolhida devido às pequenas dosagens a serem testadas, possibilitando que se utilizasse um volume maior de solução. Para cada polímero foram testadas as seguintes dosagens, calculadas de acordo com o procedimento descrito no item 4.5.2: 0; 0,094; 0,189; 0,282; 0,376 e 0,564 mg/L (0; 0,65; 1,30; 1,95; 2,60; 3,25 e 3,90 g polímero/Kg SST). Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios. A vazão de recirculação pressurizada foi de 40% ($R = 40\%$, em volume); a pressão de saturação (P_{sat}) foi de 450 ± 10 kPa; $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹ e as velocidades de flotação estudadas foram: $V_{flot1} = 5,0$ cm/min.; $V_{flot2} = 10,0$ cm/min.; $V_{flot3} = 15,0$ cm/min.; $V_{flot4} = 20,0$ cm/min. e $V_{flot5} = 25,0$ cm/min.

Como nesses ensaios foi utilizado apenas polímero, não foi feita mistura rápida e a floculação foi realizada na própria coluna de flotação. Após o término do tempo de floculação, era coletada uma amostra do líquido floculado, para a qual foram determinados os sólidos suspensos totais (SST), considerando a concentração de SST na água da recirculação pressurizada, para o cálculo da massa de sólidos suspensos removidos por flotação.

4.7.2 Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S

Como pôde ser visto pelos resultados apresentados nos ensaios anteriores e através de valores médios fornecidos pelo pessoal da ETE – Piracicamirim, o valor de SST do efluente da lagoa aerada era muito baixo, não correspondendo ao valor esperado para esse tipo de reator. Por alguma razão, naquela ocasião a lagoa não estava produzindo a quantidade de sólidos normalmente apresentada. Por isso, optou-se por concentrar um pouco mais a amostra, tentando nos aproximar da quantidade de sólidos que a lagoa apresentaria se estivesse operando normalmente. Para isso, deixou-se a amostra sedimentar e sifonou-se o sobrenadante por meio de uma mangueira de silicone, resultando numa amostra com maior quantidade de sólidos. Com essa amostra mais concentrada foi executada a segunda bateria de ensaios.

Na segunda bateria foram feitos ensaios de clarificação por flotação aplicando o polímero W 341. Foram utilizadas as seguintes dosagens de polímero: 0; 0,735; 1,47 e 2,21 mg/L (0; 5,30; 10,60 e 15,90 g polímero/Kg SST) e os seguintes valores de A/S: 0,035; 0,053; 0,072 e 0,087 mg ar/mg SST. Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios: pressão de saturação (P_{sat}) = 450 ± 10 kPa; $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹. As velocidades de flotação estudadas foram: $V_{flot1} = 5,0$ cm/min.; $V_{flot2} = 10,0$ cm/min.; $V_{flot3} = 15,0$ cm/min.; $V_{flot4} = 20,0$ cm/min. e $V_{flot5} = 25,0$ cm/min. Nesses ensaios a mistura rápida e a floculação foram feitas na própria coluna de flotação. Na TABELA 4.3 pode-se ver a sequência de ensaios para a segunda etapa do trabalho, compreendendo a primeira e segunda baterias de ensaios.

TABELA 4.3 - Ensaio realizados com Flotateste para escolha de um polímero entre os quatro selecionados na etapa anterior, determinação da melhor dosagem e melhor A/S (segunda etapa do trabalho – item 4.7).

Objetivo da etapa	Parâmetros Fixos dos Ensaio	Parâmetros Variados dos Ensaio
Ensaio de clarificação para escolha de um polímero entre W 341, W 360 C, G 9046 e G 9049 e investigação da melhor dosagem (1ª bateria de ensaios, item 4.7.1)	Tf = 1 min.; Gf = 100 s ⁻¹ ; R = 40% (em volume); P _{sat} = 450 ± 10 kPa; Vflot1 = 5,0 cm/min.; Vflot2 = 10,0 cm/min.; Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min.; Temperatura do efluente da lagoa = 22,5 ± 1 °C; pH do efluente da lagoa = 7,32.	Dosagem de polímero: 0; 0,094; 0,189; 0,282; 0,376 e 0,564 mg/L (0; 0,65; 1,30; 1,95; 2,60; 3,25 e 3,90) g polímero/Kg SST.
Ensaio de clarificação com W 341 para investigação da melhor dosagem e melhor A/S (2ª bateria de ensaios, item 4.7.2)	Tf = 1 min.; Gf = 100 s ⁻¹ ; P _{sat} = 450 ± 10 kPa; Temperatura do efluente da lagoa = 22,5 ± 1 °C; pH do efluente da lagoa = 7,32.	Dosagem de polímero: 0; 0,735; 1,47 e 2,21 mg/L (0; 5,30; 10,60 e 15,90 g polímero/Kg SST). A/S: 0,035; 0,053; 0,072 e 0,087 mg ar/mg SST.

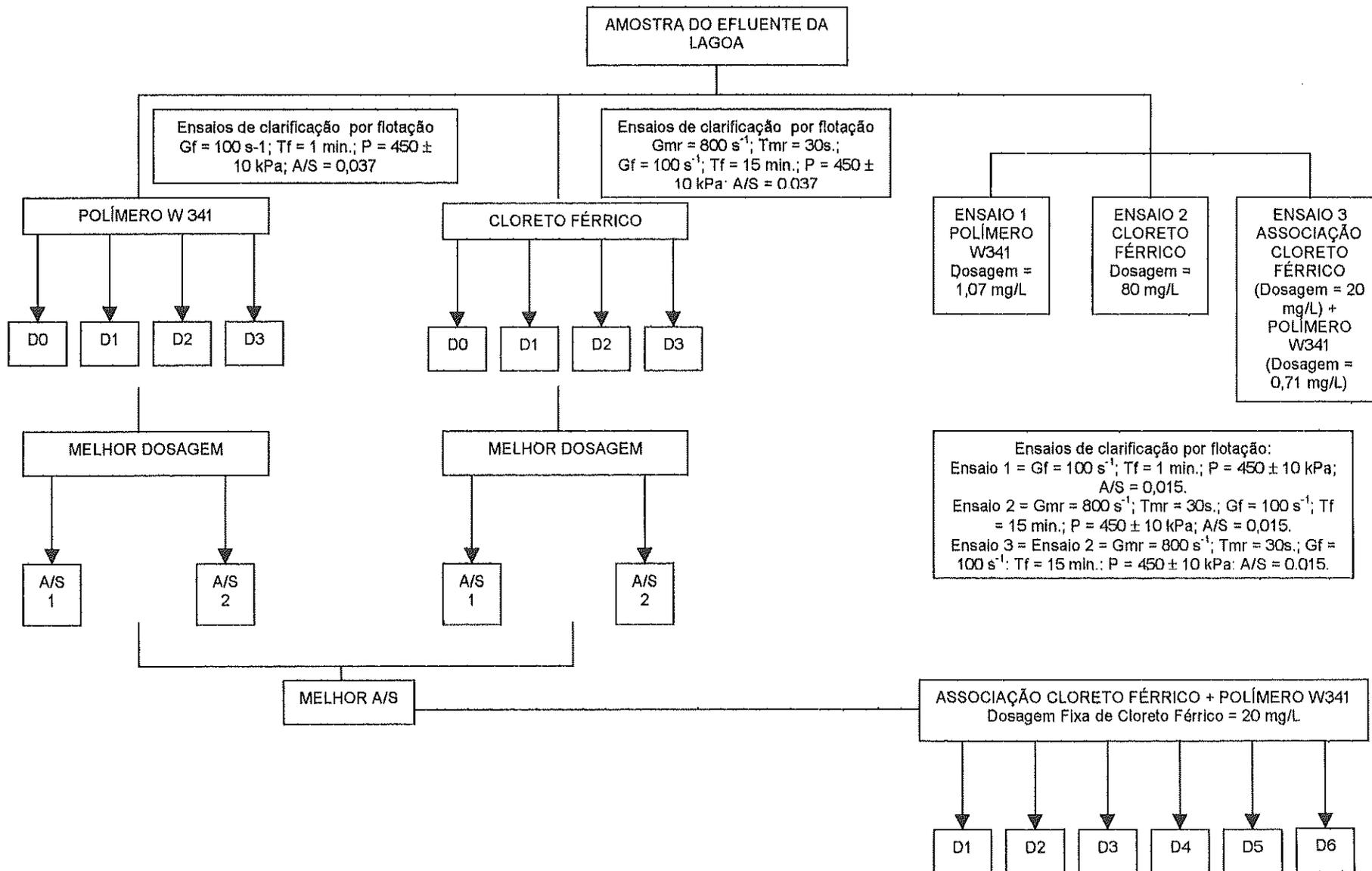
4.8 Terceira etapa – Ensaio com o Flotateste utilizando o polímero catiônico W 341, o cloreto férrico e uma associação entre os dois, e investigação da dosagem e razão ar/sólidos (A/S)

Nessa etapa foram repetidos alguns ensaios realizados na etapa anterior com o polímero W 341. Além disso, foram realizados ensaios de flotação utilizando o cloreto férrico como coagulante e ensaios utilizando uma associação entre o cloreto férrico (como coagulante) e o polímero (como auxiliar na floculação/flotação), além da determinação das dosagens e razões A/S ótimas para cada caso.

Foi feita uma segunda viagem à ETE – Piracicamirim e coletados novamente 250 litros de amostra do efluente da lagoa aerada, do mesmo local e com o mesmo procedimento para coleta descritos no item 4.7. No LATAR, o tratamento dado às amostras também foi o mesmo utilizado anteriormente.

Nos ensaios dessa etapa, a câmara de saturação foi preenchida com água proveniente do sistema de abastecimento público, pois o tratamento dado à amostra da lagoa para simular o efluente da unidade de flotação não foi eficaz na remoção de contaminantes, prejudicando alguns resultados quando se levava em conta a parcela de recirculação.

A terceira etapa do trabalho foi dividida em quatro baterias de ensaios, de acordo com o FLUXOGRAMA 4.2.



FLUXOGRAMA 4.2 – Grade de ensaios para a terceira etapa do trabalho (itens 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3 e 4.8.4).

4.8.1 Ensaio com o polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S

Essa primeira bateria de ensaios foi realizada em duas partes. Na primeira parte foi testado novamente o polímero W 341, agora para as dosagens de 0,54; 1,08 e 1,62 mg/L (2,20; 4,40 e 6,60 g polímero/Kg SST), utilizando um valor fixo de A/S (0,037 mg ar/mg SST). Na segunda bateria de ensaios, com a dosagem que apresentou os melhores resultados (escolhida através dos resultados de turbidez, pois possibilitavam resposta imediata) foram feitos novos ensaios com dois diferentes valores de A/S (0,03 e 0,037 mg ar/mg SST). Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios: pressão de saturação (P_{sat}) = 450 ± 10 kPa; T_f = 1 min.; G_f = 100 s^{-1} . As velocidades de flotação estudadas foram: V_{flot1} = 5,0 cm/min.; V_{flot2} = 10,0 cm/min.; V_{flot3} = 15,0 cm/min.; V_{flot4} = 20,0 cm/min. e V_{flot5} = 25,0 cm/min. Nesses ensaios também foram realizadas mistura rápida e floculação na própria coluna de flotação.

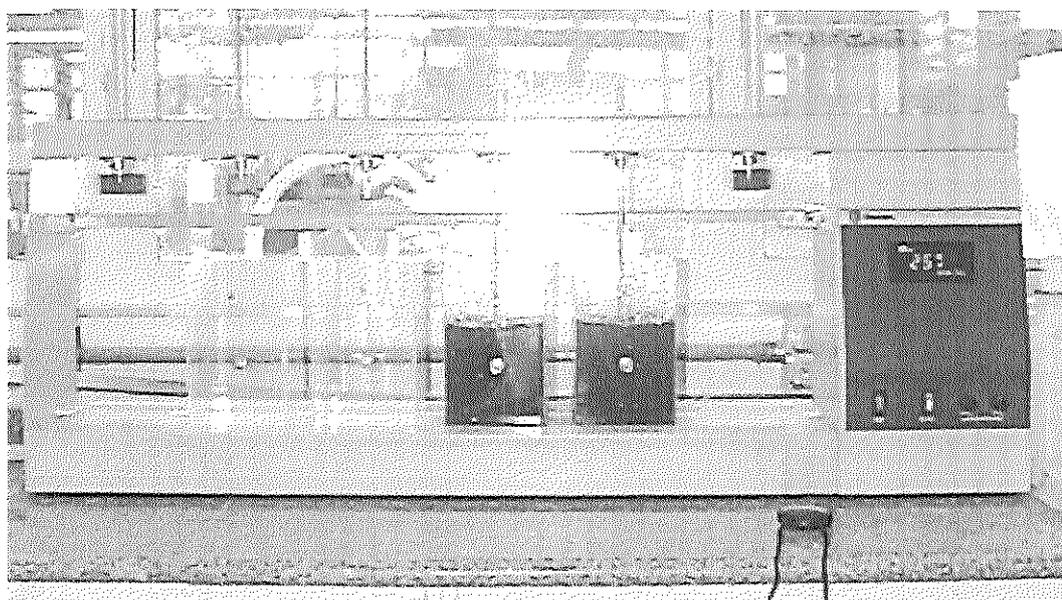
4.8.2 Ensaio com cloreto férrico, variando a dosagem e a razão A/S

A segunda bateria de ensaios também foi dividida em duas partes, onde foram feitos ensaios de flotação com o cloreto férrico como coagulante.

A solução de cloreto férrico, para esses ensaios e todos os outros realizados no decorrer da pesquisa, foi preparada com água destilada, numa concentração de 1,0 % (10 g/L). O cloreto férrico utilizado é do tipo comercial, com as seguintes características (de acordo com o fabricante): densidade = $1,410 \text{ g/cm}^3$; FeCl_3 = 39,02% e acidez = 1,21 %. Todas as dosagens mencionadas no trabalho dizem respeito ao FeCl_3 sólido.

Na 1ª parte foram testadas as seguintes dosagens de cloreto férrico: 20,0; 40,0; 60,0 e 80,0 mg/L. Os ensaios com essas dosagens foram realizados utilizando um valor fixo de A/S (0,037 mg ar/mg SST). Na 2ª parte, com a dosagem que apresentou os melhores resultados (escolhida através dos resultados de turbidez) foram feitos novos ensaios com dois diferentes valores de A/S (0,03 e 0,037 mg ar/mg SST). Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios: pressão de saturação (P_{sat}) = 450 ± 10 kPa; $T_{\text{mr}} = 30$ s.; $G_{\text{mr}} = 800$ s⁻¹; $T_f = 15$ min.; $G_f = 80$ s⁻¹ e as velocidades de flotação estudadas foram: $V_{\text{flot1}} = 5,0$ cm/min.; $V_{\text{flot2}} = 10,0$ cm/min.; $V_{\text{flot3}} = 15,0$ cm/min.; $V_{\text{flot4}} = 20,0$ cm/min. e $V_{\text{flot5}} = 25,0$ cm/min. Nesses ensaios a mistura rápida foi feita no equipamento Jar-test (ver FOTOGRAFIA 4.12) e a floculação foi feita no próprio vaso de flotação.

A amostra, depois de realizada a mistura rápida no Jar-test, com aplicação do cloreto férrico, era vertida com cuidado na câmara de flotação, para as subseqüentes etapas de floculação e flotação. Eram ligados os agitadores para promover a floculação. Após a floculação, retiravam-se os agitadores e promovia-se a flotação.



FOTOGRAFIA 4.12 – Fotografia que mostra o Jar-test promovendo a mistura rápida do cloreto férrico com a amostra.

4.8.3 Ensaios a associação entre o polímero W 341 e o cloreto férrico, variando a dosagem

Na terceira bateria foram realizados ensaios de flotação com uma associação entre o cloreto férrico (coagulante) e o polímero W 341 (auxiliar de floculação).

Para uma dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L, foram testadas as seguintes dosagens do polímero: 0,09; 0,18; 0,27; 0,36; 0,45 e 0,54 mg/L (0,37; 0,74; 1,11; 1,48; 2,22 e 2,96 g polímero/Kg SST). Os ensaios com essas dosagens foram realizados utilizando um valor fixo de A/S (0,037 mg ar/mg SST), escolhido pelos resultados das baterias de ensaios anteriores. Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios: pressão de saturação (P_{sat}) = 450 ± 10 kPa; $T_{\text{mr}} = 30$ s.; $G_{\text{mr}} = 800$ s⁻¹; $T_{\text{f}} = 15$ min.; $G_{\text{f}} = 80$ s⁻¹ e as velocidades de flotação estudadas foram: $V_{\text{flot1}} = 5,0$ cm/min.; $V_{\text{flot2}} = 10,0$ cm/min.; $V_{\text{flot3}} = 15,0$ cm/min.; $V_{\text{flot4}} = 20,0$ cm/min. e $V_{\text{flot5}} = 25,0$ cm/min. Nesses ensaios a mistura rápida foi feita no equipamento Jar-test, como visto na FOTOGRAFIA 4.12 e a floculação foi feita no próprio vaso de flotação (ver FOTOGRAFIA 4.7).

A amostra, depois de realizada a mistura rápida no Jar-test, com aplicação do cloreto férrico, era vertida com cuidado na câmara de flotação, para as subseqüentes etapas de floculação e flotação. Eram ligados os agitadores para promover a floculação, quando era então adicionado o polímero. Após a floculação, retiravam-se os agitadores e promovia-se a flotação.

4.8.4 Ensaio com o polímero W 341, com o cloreto férrico e com a associação entre eles, com apenas um par de valores de dosagem e A/S, para uma amostra da lagoa mais concentrada

Na quarta bateria foram feitos 3 ensaios de flotação, um com o polímero W 341, outro com o cloreto férrico e um terceiro com a associação entre eles, para um determinado par de valores de dosagem e A/S, com uma amostra do efluente da lagoa contendo maior concentração de SST.

No primeiro ensaio, utilizou-se uma dosagem de polímero de 1,07 mg/L (1,75 g polímero/Kg SST). No segundo, foi usada uma dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L e no terceiro, para uma dosagem de cloreto férrico de 20 mg/L, foi usada uma dosagem de polímero de 0,71 mg/L (1,17 g polímero/Kg SST). O valor de A/S nos três ensaios foi de 0,015 mg ar/mg SST. Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios: pressão de saturação (P_{sat}) = 450 ± 10 kPa; T_{mr} = 30 s.; G_{mr} = 800 s^{-1} ; T_f = 15 min.; G_f = 80 s^{-1} e as velocidades de flotação estudadas foram: V_{flot1} = 5,0 cm/min.; V_{flot2} = 10,0 cm/min.; V_{flot3} = 15,0 cm/min.; V_{flot4} = 20,0 cm/min. e V_{flot5} = 25,0 cm/min. Nesses ensaios a mistura rápida foi feita no equipamento Jar-test e a floculação foi feita no próprio vaso de flotação.

No 1º ensaio (com aplicação de polímero) foram realizadas mistura rápida e floculação na própria coluna de flotação. No 2º ensaio, a amostra, depois de realizada a mistura rápida no Jar-test, com aplicação do cloreto férrico, era vertida com cuidado na câmara de flotação, para as subsequentes etapas de floculação e flotação. No 3º ensaio era seguido o mesmo procedimento utilizado no 2º ensaio, sendo que, após serem ligados os agitadores para promover a floculação, era adicionado o polímero. Nos três ensaios, após a floculação, retiravam-se os agitadores e promovia-se a flotação.

Na TABELA 4.4 pode-se ver a sequência de ensaios para a terceira etapa do trabalho, compreendendo a primeira, segunda, terceira e quarta baterias de ensaios.

TABELA 4.4 – Ensaios realizados no Flotatesto com o polímero W 341, com cloreto férrico e com uma associação entre o cloreto e o polímero, e determinação da melhor dosagem e melhor A/S (terceira etapa do trabalho, item 4.8).

Objetivo da etapa	Parâmetros Fixos dos Ensaios	Parâmetros Variados dos Ensaios
Ensaio de clarificação com aplicação do polímero W 341 para investigação da melhor dosagem e melhor A/S (1ª bateria de ensaios, item 4.8.1)	1ª e 2ª partes - Tf = 1 min.; Gf = 100 s ⁻¹ ; P _{sat} = 450 ± 10 kPa; Vflot1 = 5,0 cm/min.; Vflot2 = 10,0 cm/min.; Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min.; Temperatura do efluente da lagoa = 24,8 ± 1 °C; pH do efluente da lagoa = 7,09.	1ª parte - Dosagem de polímero: 0 (apenas para A/S = 0,037); 0,54; 1,08 e 1,62 mg/L (0 2,20; 4,40 e 6,60 g/Kg SST).
	1ª parte - A/S = 0,037 mg ar/mg SST.	2ª parte - A/S: 0,03 e 0,037 mg ar/mg SST.
	2ª parte - dosagem de polímero = 1,08 mg/L (4,40 g/Kg SST)	
Ensaio de clarificação com aplicação de cloreto férrico para investigação da melhor dosagem e melhor A/S (2ª bateria de ensaios, item 4.8.2)	1ª e 2ª partes - Tmr = 30 s.; Gmr = 800 s ⁻¹ ; Tf = 15 min.; Gf = 80 s ⁻¹ ; P _{sat} = 450 ± 10 kPa; Vflot1 = 5,0 cm/min.; Vflot2 = 10,0 cm/min.; Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min.; Temperatura do efluente da lagoa = 24,8 ± 1 °C; pH do efluente da lagoa = 7,09.	1ª parte - Dosagem de cloreto férrico: 20,0; 40,0; 60,0 e 80,0 mg/L.
	1ª parte - A/S = 0,037 mg ar/mg SST.	2ª parte - A/S: 0,03 e 0,037 mg ar/mg SST.
	2ª parte - dosagem de cloreto = 80,0 mg/L	
Ensaio de clarificação com aplicação de polímero W 341 associado a cloreto férrico para investigação da melhor dosagem (3ª bateria de ensaios, item 4.8.3)	Dosagem de cloreto = 20 mg/L; Tmr = 30 s.; Gmr = 800 s ⁻¹ ; Tf = 15 min.; Gf = 80 s ⁻¹ ; A/S = 0,037 mg ar/mg SST; P _{sat} = 450 ± 10 kPa; Vflot1 = 5,0 cm/min.; Vflot2 = 10,0 cm/min.; Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min.; Temperatura do efluente da lagoa = 24,8 ± 1 °C; pH do efluente da lagoa = 7,09.	Dosagem de polímero: 0,09; 0,18; 0,27; 0,36; 0,45 e 0,54 mg/L (0,37; 0,74; 1,11; 1,48; 2,22 e 2,96 g/Kg SST).

Ensaios de clarificação com aplicação somente de polímero W 341, com aplicação somente de cloreto férrico e com aplicação de polímero W 341 + cloreto férrico Efluente da lagoa mais concentrada (4ª bateria de ensaios, item 4.8.4)	$A/S = 0,015 \text{ mg ar/mg SST}$; $P_{\text{sat}} = 450 \pm 10 \text{ kPa}$; $V_{\text{flot1}} = 5,0 \text{ cm/min.}$; $V_{\text{flot2}} = 10,0 \text{ cm/min.}$; $V_{\text{flot3}} = 15,0 \text{ cm/min.}$; $V_{\text{flot4}} = 20,0 \text{ cm/min.}$ e $V_{\text{flot5}} = 25,0 \text{ cm/min.}$; Temperatura do efluente da lagoa = $24,8 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$; pH do efluente da lagoa = 7,09.	As dosagens de polímero e cloreto férrico, bem como o valor de A/S, foram mantidos fixos nos três ensaios.
	1º ensaio – $T_f = 1 \text{ min.}$; $G_f = 100 \text{ s}^{-1}$ Dosagem de Polímero = 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST).	
	2º ensaio – $T_{\text{mr}} = 30 \text{ s}$; $G_{\text{mr}} = 800 \text{ s}^{-1}$; $T_f = 15 \text{ min.}$; $G_f = 80 \text{ s}^{-1}$ Dosagem de cloreto férrico = 80 mg/L.	
	3º ensaio – $T_{\text{mr}} = 30 \text{ s}$; $G_{\text{mr}} = 800 \text{ s}^{-1}$; $T_f = 15 \text{ min.}$; $G_f = 80 \text{ s}^{-1}$ Dosagem de Cloreto férrico = 20 mg/L e dosagem de polímero = 0,71 mg/L (1,17 g/Kg SST).	

4.9 Quarta etapa – Ensaios com o Flotateste utilizando o polímero W 341, cloreto férrico e uma associação entre os dois, e investigação da dosagem e razão ar/sólidos (A/S)

O objetivo dessa fase é testar novamente dosagens e razões A/S para o polímero W 341, para o cloreto férrico e para a associação “cloreto férrico + polímero”.

Foi feita a terceira e última viagem à ETE – Piracicamirim e coletados outros 250 litros de amostra do efluente da lagoa aerada, do mesmo local e com o mesmo procedimento para coleta descritos no item 4.7. No LATAR, essa amostra foi tratada e conservada da mesma forma utilizada na primeira etapa do trabalho.

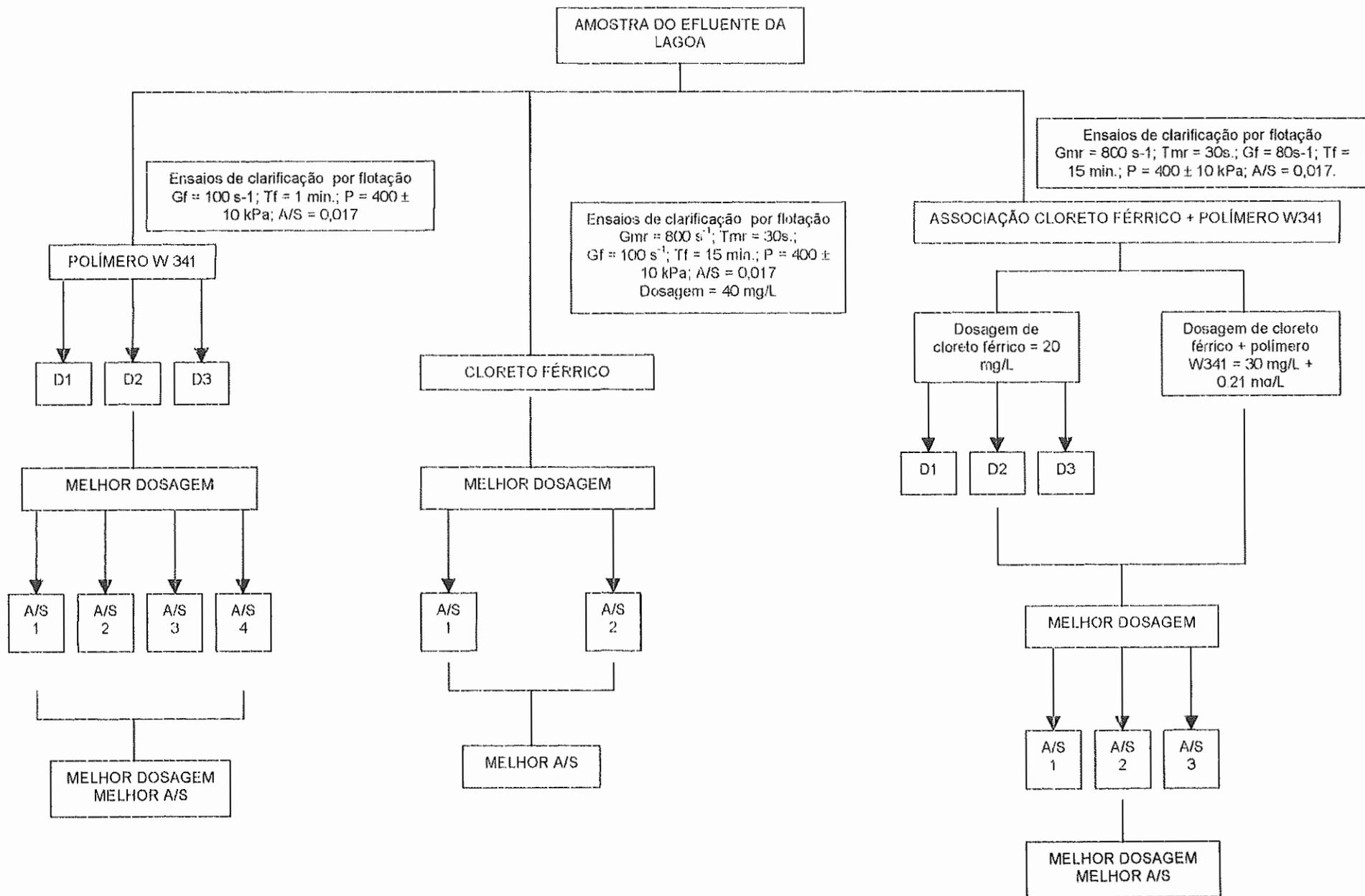
Nos ensaios dessa etapa, também foi utilizada água proveniente do sistema de abastecimento público na câmara de saturação.

Foi observado através dos resultados corrigidos de dosagem e razão A/S utilizados nas etapas anteriores, que a relação entre Turbidez X SST estava acarretando um erro muito grande entre os valores que se queria estudar e os que realmente estavam sendo empregados. A pior

consequência dessa imprecisão era que os sólidos inferidos através do método de correlação com a turbidez eram sempre maiores do que os reais, resultando na utilização de dosagens e *A/S* acima daquelas que se pretendia testar. Então, com novos valores de turbidez e SST, agora obtidos através dos resultados dos ensaios realizados nas etapas anteriores desse trabalho, conseguiu-se uma nova correlação.

Outro parâmetro alterado nessa quarta etapa do trabalho foi a pressão de saturação. Mesmo concentrando a amostra proveniente da lagoa aerada, sua quantidade de sólidos ainda era muito baixa. Então, para que pudessem ser estudados os valores de *A/S* desejados, cujo cálculo depende dos SST, a porcentagem de recirculação teria que ser muito baixa, inviabilizando a flotação. Diminuindo a pressão para 400 kPa, valores maiores de *R* puderam ser usados.

A quarta etapa do trabalho também foi dividida em três baterias de ensaios, de acordo com o FLUXOGRAMA 4.3.



FLUXOGRAMA 4.3 – Grade de ensaios para a quarta etapa do trabalho (itens 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3).

4.9.1 Ensaio de clarificação por flotação com aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S

Na 1ª parte da primeira bateria de ensaios testou-se o polímero W 341 para as dosagens de 0,32; 0,64 e 0,96 mg/L (0,83; 1,66 e 2,49 g polímero/Kg SST), mantendo-se fixo o valor de A/S em todos os ensaios (igual a 0,017 mg ar/mg SST). Na 2ª parte, com a dosagem que apresentou os melhores resultados (escolhida através dos resultados de turbidez) foram feitos novos ensaios com os valores de A/S = 0,012; 0,017; 0,021 e 0,025 mg ar/mg SST. Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios: pressão de saturação (P_{sat}) = 400 ± 10 kPa; T_f = 1 min.; G_f = 100 s^{-1} . As velocidades de flotação estudadas foram: V_{flot1} = 5,0 cm/min.; V_{flot2} = 10,0 cm/min.; V_{flot3} = 15,0 cm/min.; V_{flot4} = 20,0 cm/min. e V_{flot5} = 25,0 cm/min. Nesses ensaios a mistura rápida e a floculação também foram feitas na própria coluna de flotação.

Como se desejava estimar a massa de sólidos suspensos removidos por flotação, e a amostra coletada na coluna de flotação não fornecia resultados satisfatórios, nesses ensaios foi adotado o seguinte procedimento: a floculação que fazia parte do ensaio de flotação, mesmo sendo realizada no próprio Flotateste, era repetida no Jar-test, com os mesmos valores de T_f e G_f , apenas para a coleta de amostra floculada. Depois de coletada essa amostra, o restante era descartado.

Nessa etapa decidiu-se acrescentar o polímero depois de decorridos cinco minutos da mistura lenta, de acordo com os resultados obtidos por SARTORI (1998).

A nova correlação de Turbidez X SST, para essa etapa de ensaios, possibilitou que o valor de sólidos estipulado fosse mais próximo do real.

4.9.2 Ensaio de clarificação por flotação com aplicação de cloreto férrico, variando a razão A/S

Na segunda bateria de ensaios, para uma dosagem de 40 mg/L de cloreto férrico, foram testados os seguintes valores de A/S: 0,012; 0,017; 0,025; 0,033 mg ar/mg SST. A dosagem de 40 mg/L foi escolhida porque, apesar de 80 mg/L de cloreto férrico ter apresentado melhores resultados, com 40 mg/L estes eram bastante próximos àqueles obtidos com a aplicação de 80 mg/L de FeCl_3 . Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios: pressão de saturação (P_{sat}) = 400 ± 10 kPa; $T_{\text{mr}} = 30$ s.; $G_{\text{mr}} = 800 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{f}} = 15$ min.; $G_{\text{f}} = 80 \text{ s}^{-1}$ e as velocidades de flotação estudadas foram: $V_{\text{flot1}} = 5,0$ cm/min.; $V_{\text{flot2}} = 10,0$ cm/min.; $V_{\text{flot3}} = 15,0$ cm/min.; $V_{\text{flot4}} = 20,0$ cm/min. e $V_{\text{flot5}} = 25,0$ cm/min. Nesses ensaios a mistura rápida foi feita no equipamento Jar-test e a floculação foi feita na própria coluna de flotação.

4.9.3 Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação da associação entre o polímero W 341 e o cloreto férrico, variando a dosagem

Na terceira bateria de ensaios de flotação foi investigada uma associação entre o cloreto férrico (coagulante) e o polímero W 341 (auxiliar de floculação/flotação).

Na 1ª parte, para uma dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L, foram variadas as seguintes dosagens do polímero: 0,13; 0,26 e 0,39 mg/L (0,33; 0,66 e 0,99 g polímero/Kg SST). Na 2ª parte, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L, foi utilizada uma dosagem de 0,21 mg/L (0,54 g polímero/Kg SST). Os ensaios da 1ª e 2ª partes foram realizados mantendo-



se fixo o valor de A/S (igual a 0,017 mg ar/mg SST). Na 3ª parte, com a melhor dosagem escolhida entre a 1ª e 2ª partes (pelos resultados de turbidez), foram testados os seguintes valores de A/S: 0,012; 0,017 e 0,025 mg ar/mg SST. Os parâmetros a seguir foram mantidos fixos durante todos os ensaios: pressão de saturação (P_{sat}) = 400 ± 10 kPa; $T_{mr} = 30$ s.; $G_{mr} = 800$ s⁻¹; $T_f = 15$ min.; $G_f = 80$ s⁻¹ e as velocidades de flotação estudadas foram: $V_{flot1} = 5,0$ cm/min.; $V_{flot2} = 10,0$ cm/min.; $V_{flot3} = 15,0$ cm/min.; $V_{flot4} = 20,0$ cm/min. e $V_{flot5} = 25,0$ cm/min. Nesses ensaios a mistura rápida foi feita no equipamento Jar-test e a floculação foi feita no próprio vaso de flotação.

A amostra, depois de misturada no Jar-test com o cloreto férrico, era vertida com cuidado na coluna de flotação. Em seguida, eram ligados os agitadores para que fosse promovida a floculação e então, depois de cinco minutos, adicionava-se o polímero. Após o período de floculação, retiravam-se os agitadores e promovia-se a flotação das amostras.

Na TABELA 4.5 pode-se ver a sequência de ensaios para a quarta etapa do trabalho, compreendendo a primeira, segunda e terceira baterias de ensaios.

TABELA 4.5 – Ensaios realizados no Flotateste com o polímero W 341, com cloreto férrico e com uma associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, e determinação da melhor dosagem e melhor A/S (quarta etapa do trabalho, item 4.9).

Objetivo da etapa	Parâmetros Fixos dos Ensaios	Parâmetros Variados dos Ensaios
Ensaio de clarificação com aplicação do polímero W 341 para investigação da melhor dosagem e melhor A/S (1ª bateria de ensaios, item 4.9.1)	1ª e 2ª partes - Tf = 1 min.; Gf = 100 s ⁻¹ ; P _{sat} = 400 ± 10 kPa; Vflot1 = 5,0 cm/min.; Vflot2 = 10,0 cm/min.; Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min.; Temperatura do efluente da lagoa = 25,3 ± 1 °C; pH do efluente da lagoa = 7,14.	1ª parte - Dosagem de polímero: 0,32; 0,64 e 0,96 mg/L (0,83; 1,66 e 2,49 g/Kg SST).
	1ª parte – A/S = 0,017 mg ar/mg SST. 2ª parte – dosagem = 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST).	2ª parte - A/S: 0,012; 0,017; 0,021 e 0,025 mg ar/mg SST.
Ensaio de clarificação com aplicação de cloreto férrico para investigação do melhor A/S (2ª bateria de ensaios, item 4.9.2)	Dosagem de cloreto férrico = 40 mg/L; Tmr = 30 s.; Gmr = 800 s ⁻¹ ; Tf = 15 min.; Gf = 80 s ⁻¹ ; P _{sat} = 400 ± 10 kPa; Vflot1 = 5,0 cm/min.; Vflot2 = 10,0 cm/min.; Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min.; Temperatura do efluente da lagoa = 25,3 ± 1 °C; pH do efluente da lagoa = 7,14.	A/S: 0,012; 0,017; 0,025 e 0,033 mg ar/mg SST..
Ensaio de clarificação com aplicação do polímero W 341 + cloreto férrico para investigação da melhor dosagem e melhor A/S (3ª bateria de ensaios, item 4.9.3)	Tmr = 30 s.; Gmr = 800 s ⁻¹ ; Tf = 15 min.; Gf = 80 s ⁻¹ ; P _{sat} = 400 ± 10 kPa; Vflot1 = 5,0 cm/min.; Vflot2 = 10,0 cm/min.; Vflot3 = 15,0 cm/min.; Vflot4 = 20,0 cm/min. e Vflot5 = 25,0 cm/min.; Temperatura do efluente da lagoa = 25,3 ± 1 °C; pH do efluente da lagoa = 7,14.	1ª parte - Dosagem de polímero: 0,13; 0,26 e 0,39 mg/L (0,33; 0,66 e 0,99 g/Kg SST).
	1ª parte - Dosagem de cloreto = 20 mg/L A/S = 0,017 mg ar/mg SST.	3ª parte - A/S: 0,012; 0,017 e 0,025 mg ar/mg SST.
	2ª parte - Dosagem de cloreto férrico + polímero W 341 = 30 mg/L + 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST). A/S = 0,017 mg ar/mg SST.	
3ª parte - Dosagem de cloreto férrico + polímero W 341 = 30 mg/L + 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST).		

4.10 Caracterização físico-química das amostras obtidas durante os ensaios com o Flotateste

A seguir serão apresentados os parâmetros físico-químicos determinados em cada uma das etapas da pesquisa:

Primeira etapa (item 4.6): - Turbidez;

- DQO, amostras bruta e filtrada.

Segunda etapa (item 4.7): - Turbidez;

- Cor aparente (apenas para a 1ª bateria de ensaios);

- DQO, amostras bruta e filtrada;

- Sólidos suspensos (SST, SSF e SSV).

Terceira etapa (item 4.8): - Turbidez;

- Cor aparente;

- DQO, amostras bruta e filtrada;

- Sólidos suspensos (SST, SSF e SSV);

- Série do nitrogênio (NTK, N-NH₄⁺, NO²⁻ e NO³⁻);

- Fosfato total, amostras bruta e filtrada.

Quarta etapa (item 4.9): - Turbidez;

- Cor aparente;

- DQO, amostras bruta e filtrada;

- Sólidos suspensos (SST, SSF e SSV);

- Série do nitrogênio (NTK, N-NH₄⁺, NO²⁻ e NO³⁻);

- Fosfato total, amostras bruta e filtrada;

- Sulfato;

- Sulfeto.

As leituras de turbidez e cor aparente foram feitas para as 5 velocidades de flotação (Vflot1, Vflot2, Vflot3, Vflot4 e Vflot5). As outras determinações físico-químicas foram feitas apenas para a Vflot2 (10 cm/min).

As determinações de DQO bruta e sólidos suspensos foram feitas para a amostra correspondente à Vflot = 10 cm/min. de todos os ensaios. As determinações da série do nitrogênio e fosfato total bruto e filtrado foram feitas para as amostras correspondentes à Vflot = 10 cm/min. dos ensaios do item 4.8.4 e da melhor combinação de dosagem e A/S das três baterias de ensaios do item 4.9. As determinações de sulfeto e sulfato foram feitas apenas para a melhor combinação de dosagem e A/S das três baterias de ensaios do item 4.9.

Todos os parâmetros caracterizados obedeceram à padronização descrita no STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1992).

4.11 Procedimento para avaliação do funcionamento global da ETE – Piracicamirim

Com base em dados fornecidos pelo SEMAE, relativos à operação da ETE – Piracicamirim durante os meses de outubro, novembro e dezembro de 1999 (período em que foram feitas as coletas para execução do referente trabalho), foi realizada estimativa dos valores de eficiência global de remoção de DQO do sistema de tratamento sequencial “UASB + lagoa aerada + flotação”, calculados a partir dos valores de DQO correspondentes aos ensaios dos itens 4.7.2, 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3, 4.8.4, 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3, que apresentaram as maiores remoções desse parâmetro.

Os pontos onde são feitas as coletas das amostras referentes aos dados médios fornecidos pelos responsáveis pela operação da ETE, são os

seguintes: antes dos reatores anaeróbios (UASB), cujo poço para coleta é mostrado na FOTOGRAFIA 4.13; depois dos UASB, correspondendo à entrada da lagoa aerada (FOTOGRAFIA 4.14) e efluente final, ou seja, depois do decantador e na parte superior do canal em cascata (FOTOGRAFIA 4.15).



FOTOGRAFIA 4.13 – Fotografia mostrando a coleta da amostra antes da entrada nos UASBs.



FOTOGRAFIA 4.14 – Fotografia mostrando a coleta da amostra depois dos UASBs, correspondendo à entrada da lagoa aerada.



FOTOGRAFIA 4.15 – Fotografia mostrando a coleta da amostra na saída da estação, precisamente na parte superior do canal em cascata.

5 Resultados e Discussões

5.1 Considerações iniciais

Os ensaios que compõem o trabalho foram realizados em quatro etapas, sendo que a primeira, descrita no item 5.2, é constituída de ensaios preliminares de flotação, que visaram a escolha dos 4 melhores tipos de polímeros dentre um elenco de 21 testados.

Com os 4 polímeros escolhidos com base nos ensaios descritos no item 5.2, foram realizados ensaios de flotação, variando a dosagem de polímero e a razão ar/sólidos (A/S), para a escolha de apenas um polímero, com o qual seriam executadas as etapas seguintes do trabalho. Esses ensaios estão representados no item 5.3.

O item 5.4 fornece os resultados dos ensaios de flotação realizados com o polímero catiônico W 341, escolhido com base nos resultados apresentados no item 5.3, bem como dos ensaios realizados com a aplicação de cloreto férrico exclusivamente e com emprego de uma associação de cloreto férrico e polímero catiônico W 341. Nesses ensaios também foram variadas a dosagem dos produtos químicos e a razão “massa de ar aplicada/massa de SST” (A/S).

No item 5.5 podem ser vistos os resultados de outros ensaios realizados com aplicação somente do polímero W 341, somente de cloreto férrico e com a associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, variando novamente a dosagem dos produtos químicos e a razão A/S. Nesse item também são mostradas tabelas que comparam a eficiência do processo de flotação, utilizando polímero, cloreto férrico e a associação entre eles, quanto à remoção de parâmetros como turbidez, DQO, sólidos suspensos, fósforo total, etc.

5.2 Primeira etapa - Ensaio preliminares visando a escolha dos polímeros a serem utilizados nas etapas seguintes do trabalho

As FIGURAS 5.1 e 5.2 mostram as frações de turbidez remanescente, ou seja, a razão entre a turbidez da amostra flotada e a turbidez do efluente do reator anaeróbio de leite expandido (RALEX), em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero de 4,0 mg/L e uma fração de recirculação pressurizada de 20% (em volume).

Pela FIGURA 5.1 e TABELA 5.1, observa-se que os polímeros que forneceram os melhores resultados de remoção de turbidez por flotação foram: W 341, W 360, W 360 C, W 3081 e G 9049. Dentre esses cinco, o polímero G 9049 foi escolhido para ser novamente testado na segunda bateria de ensaios, pois apresentou os melhores resultados quando comparado aos outros polímeros.

Observando-se a FIGURA 5.2 e a TABELA 5.1, vê-se que o polímero G 9049 não forneceu resultados de remoção de turbidez por flotação tão bons quanto os da primeira bateria. Os polímeros que se sobressaíram nessa segunda etapa, devido aos bons resultados de remoção de turbidez foram: G 992, G 9046, G 9047 e G 9048.

Como o objetivo desses ensaios era selecionar apenas quatro polímeros dentre os testados nas duas baterias, optou-se pelos polímeros W 341 e W 360 C, ambos Poliacrilamidas de carga catiônica, com alto peso molecular e densidade de carga de 10%. Ambos eram de fácil preparo, por se encontrarem na forma de emulsão (a diluição em água destilada era feita em, no máximo, 15 minutos, necessitando apenas de agitação suave). Além disso, apresentaram bons resultados de remoção de DQO bruta, como pode ser visto pela FIGURA 5.3 e TABELA 5.2.

O terceiro polímero escolhido foi o G 9046, também uma Poliacrilamida de carga catiônica, de alto peso molecular, com densidade de carga de 40%. Embora os resultados obtidos com os polímeros G 992, G

9047 e G 9048 terem sido também muito bons, semelhantes àqueles apresentados com aplicação do polímero G 9046, escolheu-se este último devido à maior facilidade de dissolução do mesmo (para que os outros fossem diluídos em água, era necessário que se deixasse agitando por duas horas, por estarem na forma granulada). Como pode ser visto na FIGURA 5.4, poucos polímeros dessa segunda bateria de ensaios forneceram uma boa remoção de DQO bruta, com exceção dos já citados G 992, G 9046, G 9047 e G 9048. Quanto à DQO filtrada, a grande maioria proporcionou um aumento desta, incluindo o G 9047. O G 9046, além de apresentar uma boa remoção de DQO bruta, removeu cerca de 20% da DQO filtrada, o que pode ser considerado um bom resultado, quando comparado aos outros.

Por fim, decidiu-se que o quarto polímero a ser testado seria o G 9049 pois, apesar da discrepância entre os resultados apresentados nas duas baterias de ensaios, este obteve o melhor desempenho entre os dez testados na primeira etapa, tanto para remoção de turbidez quanto para DQO bruta e filtrada (FIGURAS 5.1 e 5.3 e TABELAS 5.1 e 5.2). O G 9049 é uma Poliamina catiônica e de baixo peso molecular, apresentada na forma líquida, tornando bastante fácil o preparo da solução 0,05% utilizada nos ensaios.

As FIGURAS 5.1 e 5.2 também mostram que os polímeros não iônicos e aniônicos foram os que apresentaram as mais baixas eficiência de remoção de turbidez. O fato de que os polímeros catiônicos foram significativamente mais eficientes leva a crer que o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas foi importante, favorecido possivelmente pelo mecanismo de floculação por pontes poliméricas, conforme comentado por GREGORY (1993) e HO & TAN (1989) (ver revisão da literatura). Além disso, segundo LU (1991), no caso de partículas carregadas negativamente e floculadas com o auxílio de surfactante catiônico, pode haver uma atração extra introduzida como resultado da camada hidrófoba formada pelo polímero adsorvido à superfície das partículas, principalmente para o caso

da flotação, onde sabe-se que quanto maior o grau de hidrofobicidade das partículas, mais eficiente é a remoção por esse processo.

Segundo GREGORY (1993), os floculantes catiônicos mais eficientes são os de mais alta densidade de carga, com o peso molecular sendo de menor importância. Isso talvez possa explicar os ótimos resultados fornecidos pelo polímero G 9046, que possuía maior densidade de carga que os outros polímeros.

Analisando os resultados de DQO, tanto bruta quanto filtrada (FIGURAS 5.3 e 5.4), apresentados pelos polímeros aniônicos e não iônicos, vê-se que são próximos aos fornecidos pelos polímeros catiônicos. A única exceção foi o polímero W 320 que, apesar de catiônico, apresentou remoção de turbidez semelhante às dos polímeros não iônicos e aniônicos, além de baixa remoção de DQO, tanto bruta quanto filtrada.

TABELA 5.1 – Valores de turbidez residual (uT) e porcentagens de remoção de turbidez (%), correspondentes à velocidade de flotação de 15 cm/min., obtidas nos ensaios preliminares comparativos (1ª e 2ª etapas, item 4.6), realizados com 21 diferentes tipos de polímeros.

Turbidez da amostra do efluente do RALEX = 95,3 uT.

POLÍMEROS TESTADOS NA 1ª BATERIA DE ENSAIOS												
Tipo de Polímero	W301	W302	W303	W320	W341	W360	W360C	W3076	W3081	G9049		
Turbidez Residual (uT)	37,7	37,2	40,3	41,0	20,3	22,0	19,2	30,5	22,9	15,4		
$(1-T/T_0) * 100$	60,5	61,0	57,7	56,9	78,7	77,0	79,9	68,0	75,9	83,9		
POLÍMEROS TESTADOS NA 2ª BATERIA DE ENSAIOS												
Tipo de Polímero	G991	G992	G997	G998	G999	G3055	G9046	G9047	G9048	G9049	G9050	G9052
Turbidez Residual (uT)	39,7	13,8	41,3	38,5	38,5	40,7	12,2	13,1	14,0	31,1	40,8	40,1
$(1-T/T_0) * 100$	36,3	77,9	33,8	38,2	38,2	34,7	80,4	79,0	77,5	50,1	34,5	35,7

* As células hachuradas representam os polímeros que foram escolhidos para a realização dos ensaios de flotação correspondentes ao item 5.3.1, da segunda etapa do trabalho.

TABELA 5.2 – Valores de DQO residual (mg/L) e porcentagens de remoção de DQO (%), correspondentes à velocidade de flotação de 10 cm/min., referentes aos polímeros escolhidos para realização dos ensaios de flotação referentes ao item 4.7.1, com base nos ensaios preliminares comparativos (1ª e 2ª etapas, item 4.6), realizados com 21 diferentes tipos de polímeros.

DQO da amostra bruta do efluente do RALEX = 261,0 mg/L.

DQO da amostra filtrada do efluente do RALEX = 60,0 mg/L.

Tipo de Polímero	DQO bruta		DQO filtrada	
	DQO residual (mg/L)	Porcentagem de remoção (%)	DQO residual (mg/L)	Porcentagem de remoção (%)
G 9046	40,92	69,1	49,80	56,0
G 9049	64,80	75,2	31,20	48,0
W 360 C	82,80	68,30	48,0	20,0
W 341	82,80	68,30	51,60	14,0

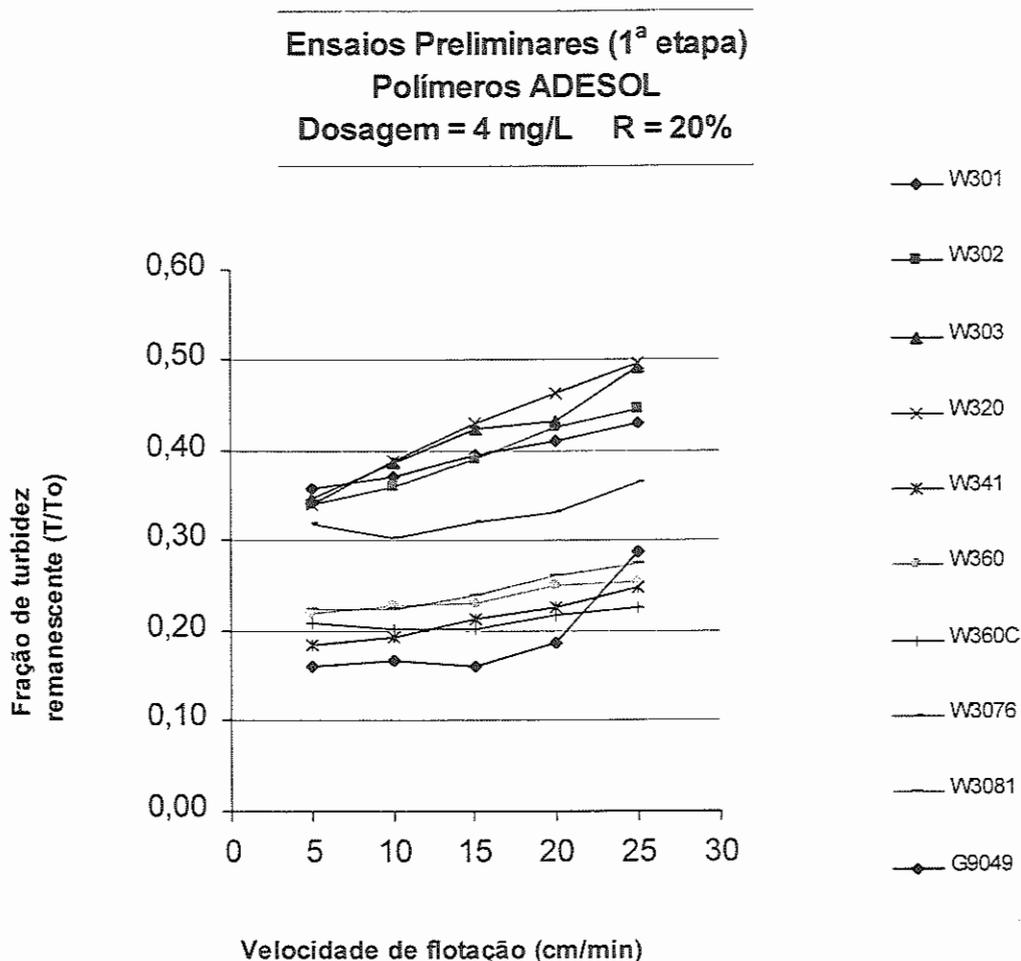


FIGURA 5.1 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, obtidas nos ensaios preliminares comparativos (1ª etapa), realizados com 10 diferentes tipos de polímeros.

1ª bateria de ensaios (item 4.6) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente do RALEX. $T_{mr} = 30$ s; $G_{mr} = 600$ s^{-1} ; $T_f = 20$ min.; $G_f = 60$ s^{-1} ; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; Dosagem de polímero = 4,0 mg/L; R = 20% (em volume). Características do efluente do RALEX: turbidez = 95,3 uT; DQO da amostra não filtrada = 261 mg/L; DQO da amostra filtrada = 60 mg/L; temperatura = 22 °C; pH = 6,59 (ver TABELA 4.2).

Ensaio Preliminares (2ª etapa)
Polímeros ADESOL
Dosagem = 4,0 mg/L R = 20%

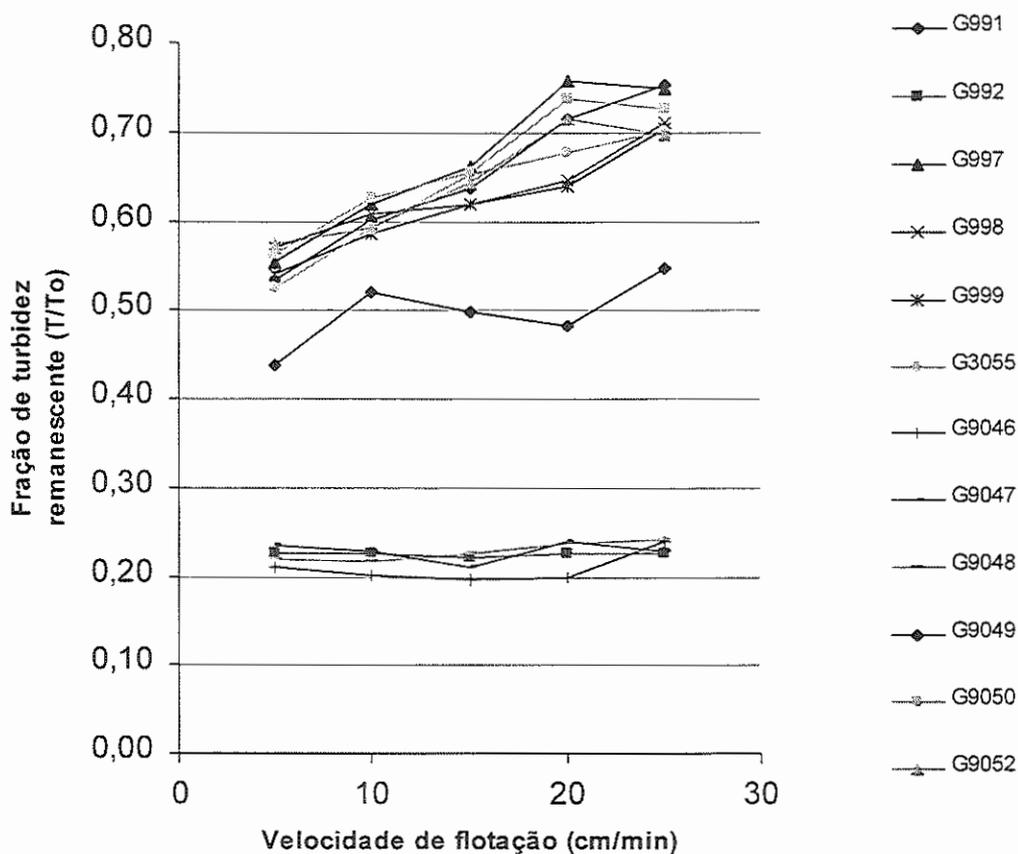


FIGURA 5.2 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, obtidas nos ensaios preliminares comparativos (2ª etapa), realizados com 12 diferentes tipos de polímeros.

2ª bateria de ensaios (item 4.6) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente do RALEX. $T_{mr} = 30$ s; $G_{mr} = 600$ s^{-1} ; $T_f = 20$ min.; $G_f = 60$ s^{-1} ; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; Dosagem de polímero = 4,0 mg/L; R = 20% (em volume). Características do efluente do RALEX: turbidez = 62,3 uT; DQO da amostra não filtrada = 132 mg/L; DQO da amostra filtrada = 31 mg/L; temperatura = 24,2 °C; pH = 6,62 (ver TABELA 4.2).

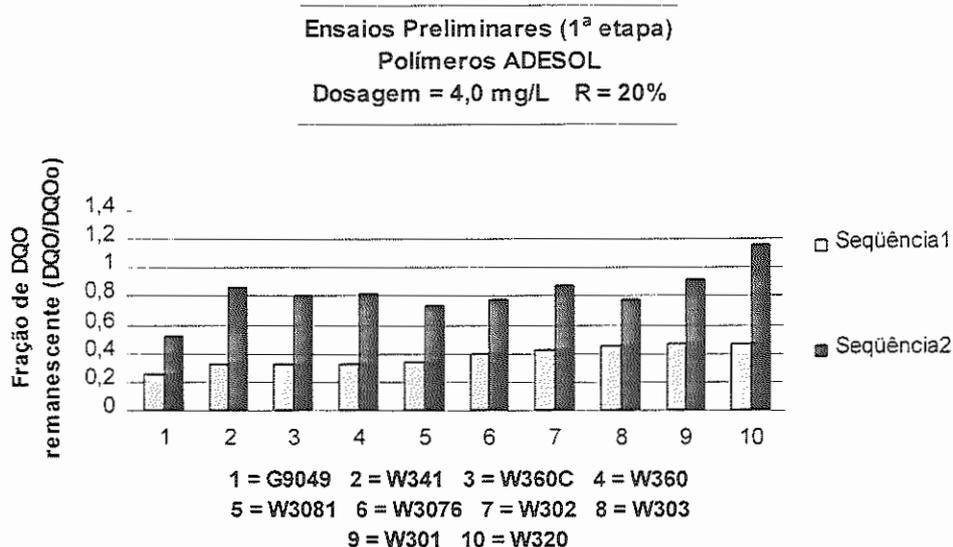


FIGURA 5.3 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para os 10 polímeros testados na 1ª bateria de ensaios.

1ª bateria de ensaios (item 4.6) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente do RALEX. T_{mr} = 30 s; G_{mr} = 600 s⁻¹; T_f = 20 min.; G_f = 60 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; Dosagem de polímero = 4,0 mg/L; R = 20% (em volume). Características do efluente do RALEX: turbidez = 95,3 uT; DQO da amostra não filtrada = 261 mg/L; DQO da amostra filtrada = 60 mg/L; temperatura = 22 °C; pH = 6,59 (ver TABELA 4.2).

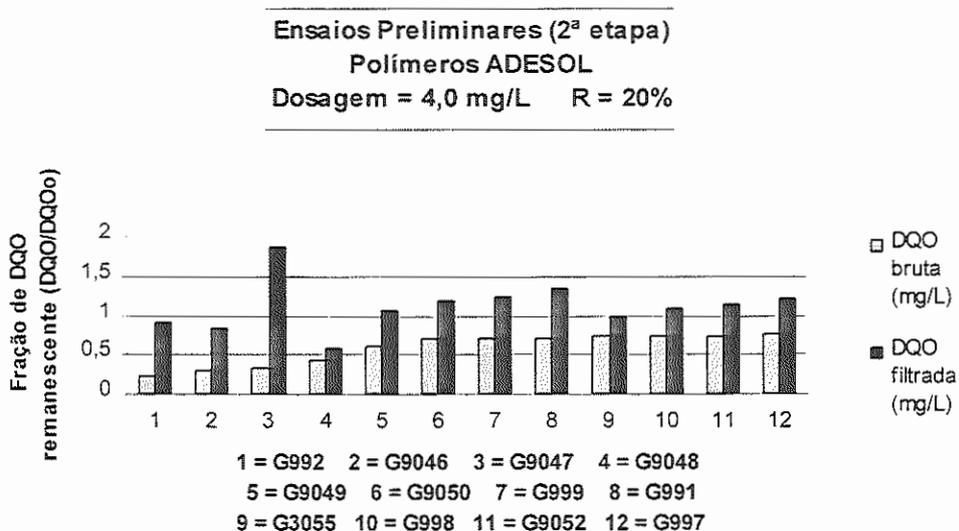


FIGURA 5.4 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para os 12 polímeros testados na 2ª bateria de ensaios.

2ª bateria de ensaios (item 4.6) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente do RALEX. T_{mr} = 30 s; G_{mr} = 600 s⁻¹; T_f = 20 min.; G_f = 60 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; Dosagem de polímero = 4,0 mg/L; R = 20% (em volume). Características do efluente do RALEX: turbidez = 62,3 uT; DQO da amostra não filtrada = 132 mg/L; DQO da amostra filtrada = 31 mg/L; temperatura = 24,2 °C; pH = 6,62 (ver TABELA 4.2).

TABELA 5.3 – Eficiências (%) de remoção de turbidez apresentadas nos ensaios preliminares, referentes aos quatro polímeros escolhidos para a realização da 1ª bateria de ensaios de flotação da segunda etapa do trabalho (item 4.7.1).

Referente aos ensaios (item 4.6) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente do RALEX, mostrados nas FIGURAS 5.1 e 5.2.

Eficiência de Remoção de Turbidez (%)				
Vflot (cm/min)	W 341	W 360 C	G 9046	G 9049
5	81,5 (17,64)	79,2 (16,5)	79,0 (13,08)	83,9 (15,36)
10	80,6 (18,48)	79,9 (19,2)	79,8 (12,6)	83,4 (15,84)
15	78,7 (20,28)	79,9 (19,2)	80,4 (12,24)	83,9 (15,36)
20	77,3 (21,6)	78,3 (20,64)	80,2 (12,36)	81,2 (17,88)
25	75,2 (23,64)	77,4 (21,48)	76,1 (14,88)	71,2 (27,48)
Eficiência de Remoção de DQO bruta (%)				
Vflot (cm/min)				
10	66,9 (86,4)	68,3 (82,8)	69,1 (40,92)	72,3 (64,8)

* Os valores entre parênteses correspondem à turbidez e DQO residuais, em uT e mg/L respectivamente.

5.3 Segunda etapa – Seleção de um polímero dentre os quatro escolhidos no item 5.2, determinação da dosagem ótima e razão ar/sólidos (A/S) ótima

Essa segunda etapa do trabalho foi dividida em duas baterias de ensaios de flotação, cujos resultados são apresentados nos itens 5.3.1 e 5.3.2.

As TABELAS 5.4 e 5.5 mostram os resultados da caracterização do efluente da lagoa aerada, bem como do líquido utilizado na câmara de saturação, utilizados na segunda etapa do trabalho, nos ensaios correspondentes aos itens 4.7.1 e 4.7.2, respectivamente.

TABELA 5.4 – Caracterização do efluente da lagoa aerada utilizado nos ensaios de flotação e do líquido a ser pressurizado na câmara de saturação, utilizados no item 4.7.1, da segunda etapa do trabalho (preparado conforme item 4.7).

	T (°C)	pH	Turbidez (uT)	Cor Aparente. (uC)	DQO bruta (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)
Efluente da lagoa aerada	22,5	7,32	107	815	234	127	145	35	110
Câmara saturação	22,5	7,38	29,1	317	97	37	27,75	1,25	27,50

TABELA 5.5 – Caracterização do efluente Tipo 1 da lagoa (concentrado) utilizado nos ensaios de flotação e do líquido a ser pressurizado na câmara de saturação, utilizados no item 4.7.2, da segunda etapa do trabalho (preparado conforme item 4.7).

	T (°C)	pH	Turbidez (uT)	Cor Aparente. (uC)	DQO bruta (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)
Efluente lagoa	22,5	7,32	279	-	347	40	138,5	51,5	87
Câmara saturação	22,5	7,38	35	-	115	62	32,05	10,3	21,79

A diferença entre os efluentes representados nas TABELAS 5.4 e 5.5 é que o efluente Tipo 1, mostrado na TABELA 5.5, foi concentrado (artificialmente) através da sedimentação de um volume de amostra da lagoa aerada.

A FIGURA 5.5 mostra a correlação entre turbidez e sólidos suspensos totais (SST), utilizada para o cálculo das dosagens dos polímeros e dos valores de A/S, de acordo com o item 4.5.3.

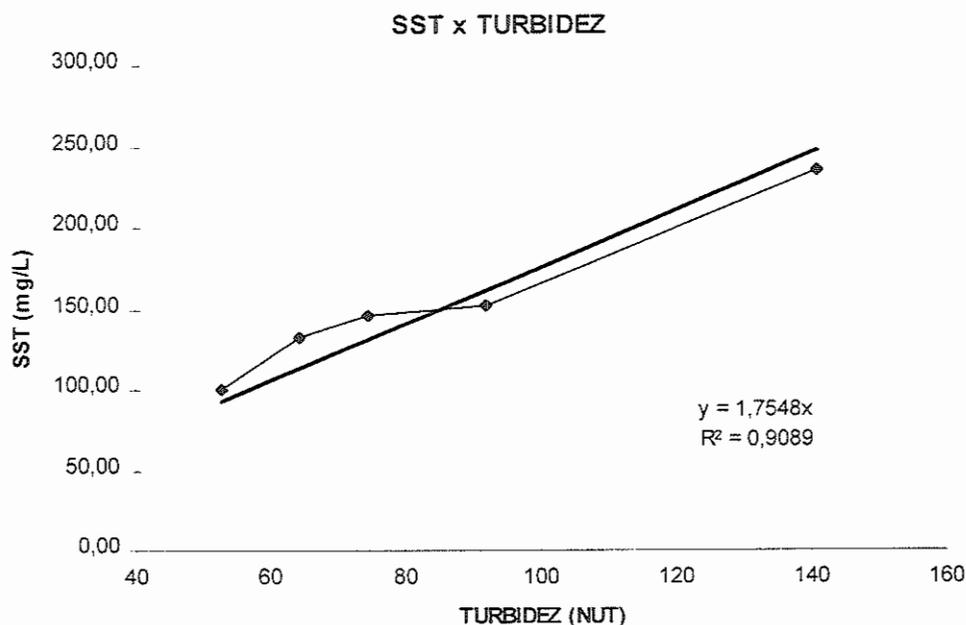


FIGURA 5.5 – Correlação entre turbidez e SST, obtida conforme item 4.5.3.

5.3.1 Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação dos polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341, variando a dosagem

As FIGURAS 5.6 a 5.10 mostram as frações de turbidez remanescente, ou seja, a razão entre a turbidez da amostra flotada e a turbidez do efluente da lagoa aerada, em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360 C e W 341, utilizando as dosagens de polímero: 0; 0,094; 0,189; 0,282; 0,376 e 0,564 mg/L (0; 0,65; 1,30; 1,95; 2,60 e 3,90 g/Kg SST), e uma fração de recirculação pressurizada de 40% (em volume).

Observando as FIGURAS 5.6 a 5.10 pode-se notar que, para velocidades de flotação menores ou iguais a 15 cm/min, as porcentagens de remoção de turbidez para todos os polímeros e para todas as dosagens

foram muito próximas entre si, inclusive as relativas ao ensaio realizado sem adição de polímero, com valores situados na faixa de 88,2% (residual de 12,58 uT, polímero G 9046) a 95,2% (residual de 5,16 uT, polímero W 341).

Além disso, como pode-se ver pela FIGURA 5.7, para a dosagem de polímero de 0,189 mg/L (1,3 g/Kg SST), o polímero G 9046 apresentou remoção de turbidez de 87,7% (residual de 13,14 uT) para a velocidade de flotação de 25 cm/min. Isso é um dado importante, pois é interessante o uso de polímeros que proporcionem situações em que sejam obtidas boas eficiências de clarificação associadas a altas velocidades de flotação, tendo em vista a possibilidade de se operar com taxas mais elevadas na unidade de flotação.

Como pode ser visto na TABELA 5.6, as porcentagens de remoção de turbidez apresentadas pelos polímeros, para todas as dosagens e velocidade de flotação de 15 cm/min., foram muito semelhantes. Além disso nota-se que, para as velocidades de flotação maiores (20 cm/min ou mais), à medida em que se aumentava a dosagem de polímero, a fração de turbidez remanescente ia se tornando maior, se aproximando mais do valor apresentado pelo ensaio onde não foi utilizado polímero. Por exemplo: para o ensaio realizado sem polímero, a porcentagem de remoção para $V_{flot} = 25$ cm/min. foi de 55,5 % (residual de 47,58 uT); nos ensaios onde foi aplicado o polímero G 9049 nas dosagens de 0,094 e 0,564 mg/L, para a mesma velocidade de flotação, obteve-se porcentagens de remoção de turbidez de 82,9 e 72,4% (residuais de 18,32 e 29,52 uT), respectivamente.

Quando foram utilizados polímeros na dosagem igual a 0,189 mg/L (1,3 g/Kg SST), foram obtidos resultados de remoção de turbidez muito parecidos (apenas ligeiramente menores) com os apresentados pelas dosagens maiores que esta.

Como foi dito anteriormente, considerando apenas a faixa de velocidades de flotação menores ou iguais a 15 cm/min., e levando-se em conta somente a remoção de turbidez, não houve vantagem na utilização de polímero, pois a curva correspondente ao ensaio realizado sem a adição

deste apresentou resultados muito próximos aos obtidos nos outros ensaios com aplicação de polímero. Apenas para a dosagem de 0,564 mg/L (3,9 g/kg SST), nota-se que a adição de polímero proporcionou ligeira melhora na eficiência de remoção de turbidez, para essa faixa de velocidades de flotação, conforme pode ser observado na FIGURAS 5.6 a 5.10.

Uma possível explicação para esse fato pode ser devido à elevada razão A/S utilizada nesses ensaios. Como pôde ser verificado após a determinação dos sólidos suspensos das amostras, o efluente da lagoa apresentava somente 145 mg/L de SST. Com essa baixa concentração de sólidos e a recirculação de 40% utilizada, a razão A/S para esses ensaios foi de 0,27 mg ar/mg SST, muito acima da faixa usualmente utilizada, de 0,005 – 0,06 mg ar/mg SST, segundo METCALF & EDDY (1991). As faixas de A/S recomendadas por HO & TAN (1989) para a flotação de um efluente de indústria de óleo de palmeira tratado anaerobiamente – 0,006 a 0,01 mg ar/mg SST e por ZABEL (1985) para o tratamento de águas de abastecimento – 0,015 a 0,03 mg ar/mg SST, também estão bem abaixo do valor utilizado nos ensaios.

Assim, devido à grande quantidade de ar e, conseqüentemente, à grande quantidade de microbolhas inseridas no processo, uma parcela considerável de partículas floculadas apenas biologicamente (sem adição de polímero) podem ter sido removidas por flotação.

Como pôde ser visto nos experimentos de PENETRA *et al.*, (1998), a fração de recirculação que proporcionou maior estabilidade ao processo de flotação do efluente de um reator anaeróbio, coagulado/floculado com cloreto férrico, foi de 20%, ou seja, a metade utilizada nos ensaios do item 4.7.1.

Então, de acordo com as FIGURAS 5.6 a 5.10 e TABELA 5.6, vê-se que não há vantagem em se utilizar dosagem de polímero maior que 0,282 mg/L e que, para os quatro polímeros estudados, as dosagens mais adequadas, para remoção de turbidez, situaram-se na faixa de 0,189 a 0,282 mg/L (1,30 a 1,95 mg/L).

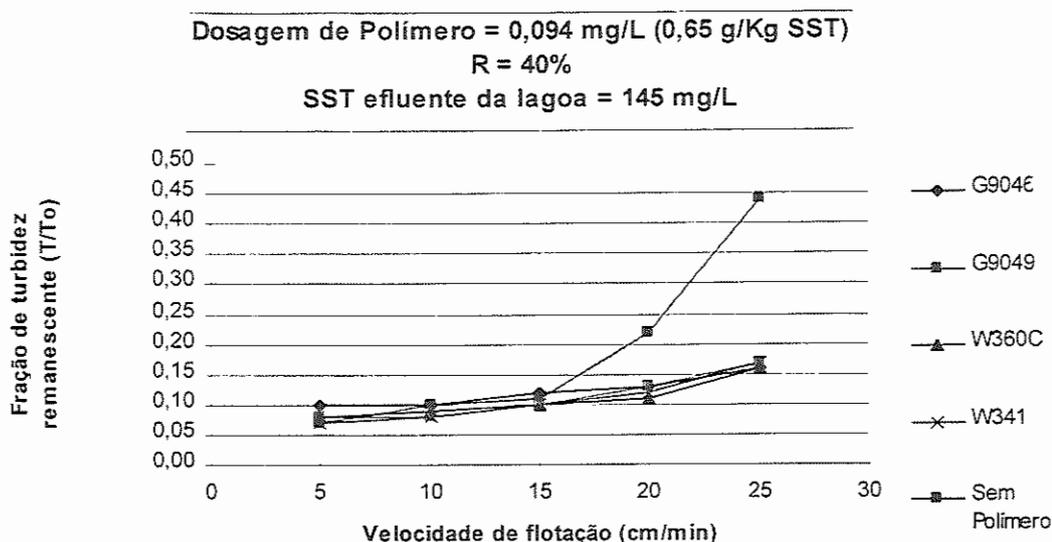


FIGURA 5.6 – Frações de turbidez remanescente (T/T₀) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,094 mg/L (0,65 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotateste e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. Tf = 1 min.; Gf = 100 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; R = 40% (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

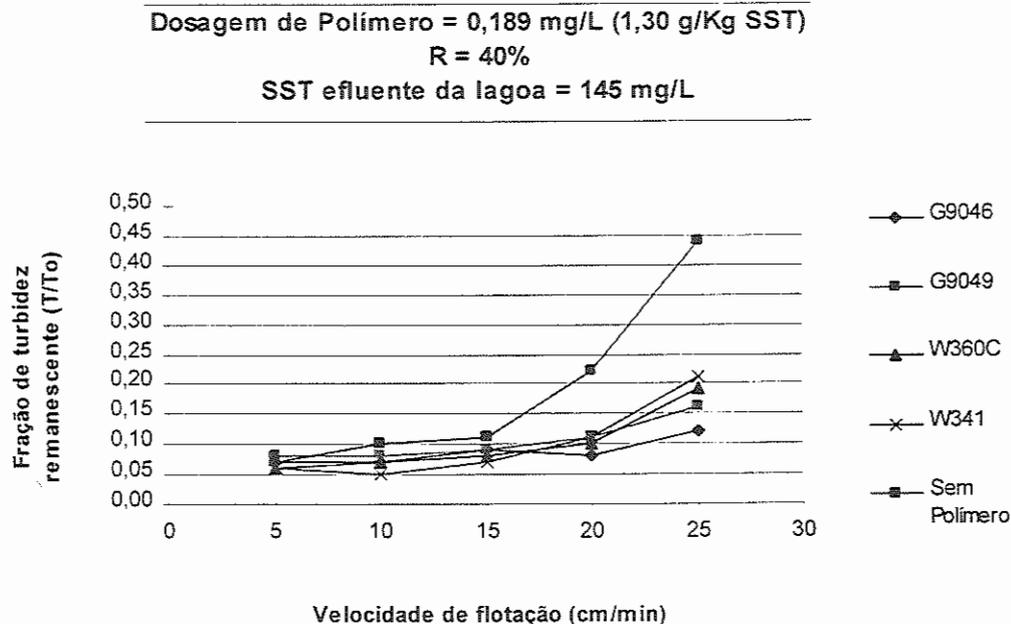


FIGURA 5.7 – Frações de turbidez remanescente (T/T₀) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,189 mg/L (1,30 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotateste e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. Tf = 1 min.; Gf = 100 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; R = 40% (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

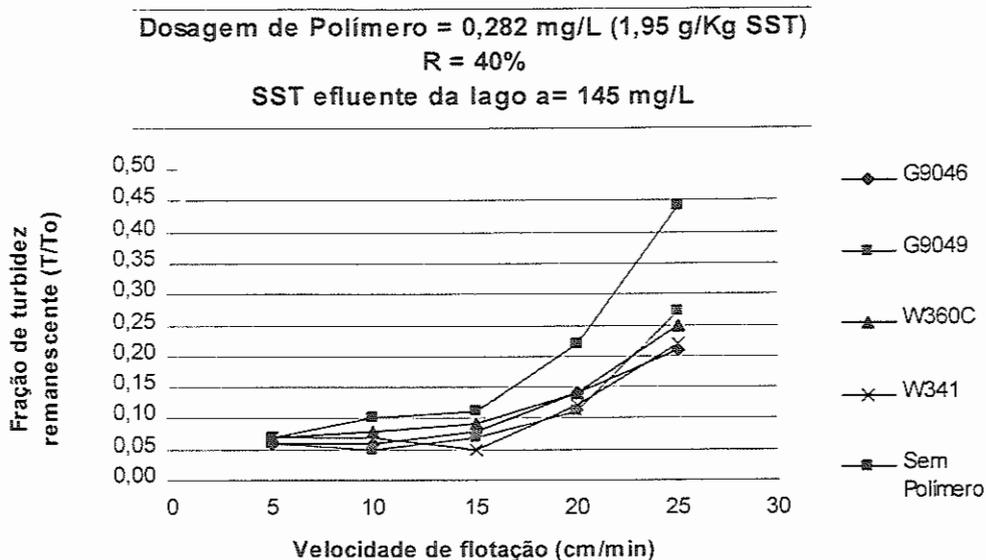


FIGURA 5.8 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,282 mg/L (1,95 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; $R = 40\%$ (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

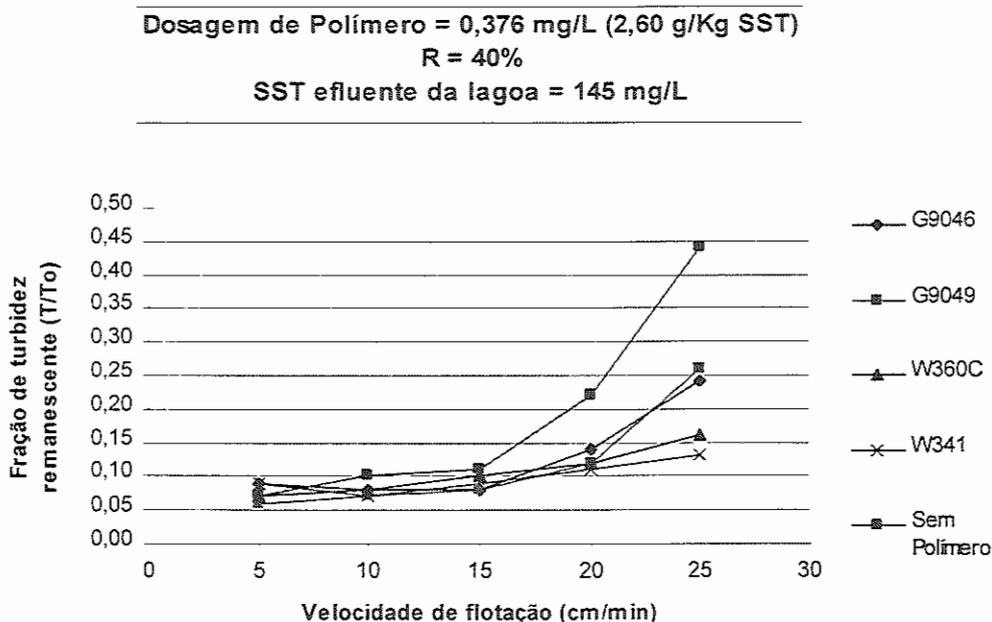


FIGURA 5.9 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,376 mg/L (2,60 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; $R = 40\%$ (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

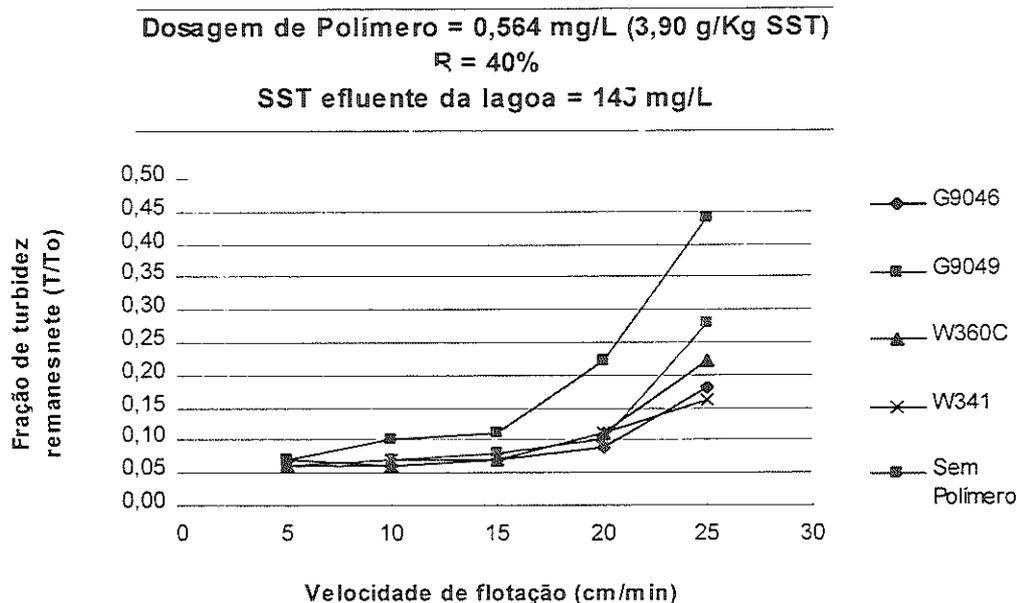


FIGURA 5.10 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,564 mg/L (3,90 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; R = 40% (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

TABELA 5.6 – Porcentagens de remoção de turbidez, correspondentes aos polímeros testados nos ensaios de flotação do item 4.7.1, para cada dosagem e velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.6 a 5.10).

Turbidez da amostra do efluente da lagoa = 107 uT (ver TABELA 5.4).

Tipo de Polímero	Dosagem de Polímero, em mg/L					
	0	0,094	0,189	0,282	0,376	0,564
	89,2 (11,6)					
G 9046		88,0 (12,6)	91,1 (9,50)	91,9 (8,66)	92,3 (8,24)	93,0 (7,54)
G 9049		89,9 (10,76)	90,7 (9,92)	93,1 (7,40)	91,6 (8,94)	92,3 (8,24)
W 360 C		90,3 (10,34)	91,9 (8,66)	90,6 (10,06)	89,9 (10,8)	93,5 (6,98)
W 341		89,8 (10,9)	90,0 (7,54)	95,2 (5,16)	90,6 (10,06)	92,6 (7,96)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez residual, em uT.

Com base nos resultados de remoção de cor aparente, apresentados nas FIGURAS 5.11 a 5.15, pode-se ver que, para as diferentes dosagens, as curvas correspondentes aos quatro polímeros apresentaram comportamentos muito próximos entre si, ou seja, as porcentagens de remoção variaram pouco de um polímero para outro e de uma dosagem para outra.

Para as dosagens de 0,094 e 0,189 mg/L (0,65 e 1,30 g/Kg SST), a remoção média de cor aparente para os 4 polímeros variou de aproximadamente 70 a 80 %, para as de velocidades de flotação estudadas. Para a dosagem de 0,282 mg/L (1,95 g/Kg SST), a remoção variou de 60 a 80%, ou seja, para as maiores velocidades de flotação, essa dosagem maior apresentou comportamento pior do que o fornecido pelas dosagens menores. Já para as dosagens de 0,376 e 0,564 mg/L (2,60 e 3,90 g/Kg SST), a faixa de remoção foi de 70 a 75% e 70 a 80%, respectivamente.

Quanto à vantagem em se adicionar ou não o polímero, vê-se que, para toda a faixa de velocidades de flotação investigadas, os resultados de remoção de cor obtidos no ensaio com aplicação de 0,094 mg/L de polímero foram melhores que aqueles fornecidos pelo ensaio sem a aplicação deste. Por exemplo, para $V_{flot} = 15$ cm/min., a porcentagem de remoção de cor obtida sem a aplicação de polímero foi de 69,5% (residual de 268,4 uC), sendo que, com uma dosagem de 0,094 mg/L do polímero G 9046, para a mesma velocidade de flotação, obteve-se uma remoção de cor de 76,9% (residual de 188,2 uC) (ver TABELA 5.7).

Portanto, pode-se observar através da FIGURAS 5.11 a 5.15 e da TABELA 5.7, que não há vantagem em se utilizar uma dosagem de polímero maior que 0,094 mg/L (0,65 g/Kg SST), se o objetivo do ensaio de flotação for a remoção de cor.

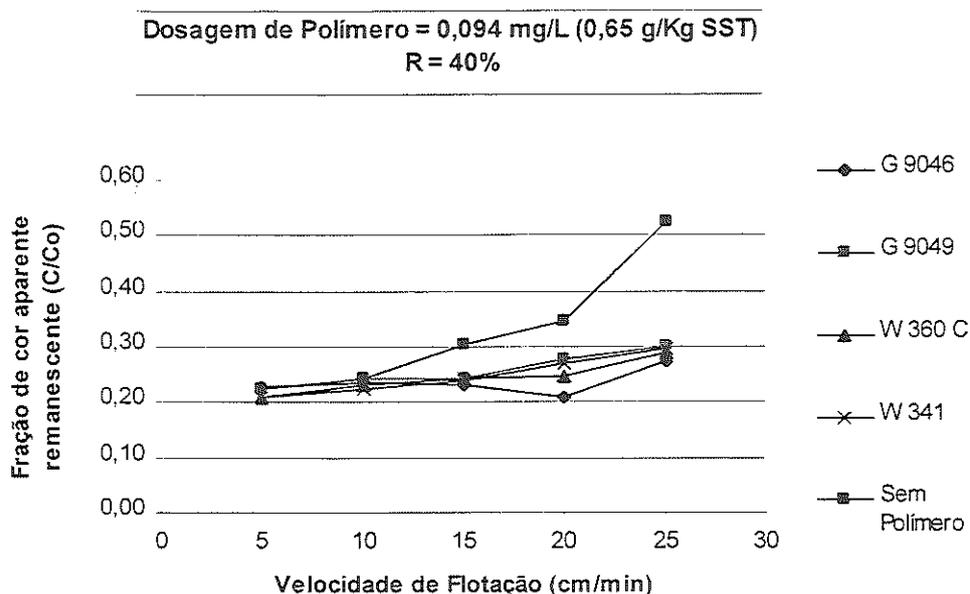


FIGURA 5.11 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,094 mg/L (0,65 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; $R = 40\%$ (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

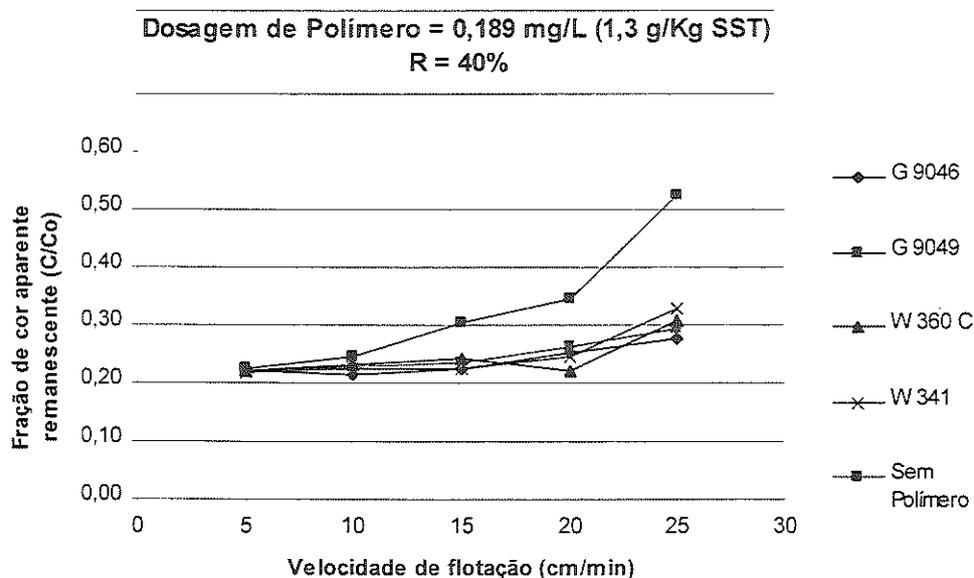


FIGURA 5.12 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,189 mg/L (1,30 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; $R = 40\%$ (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

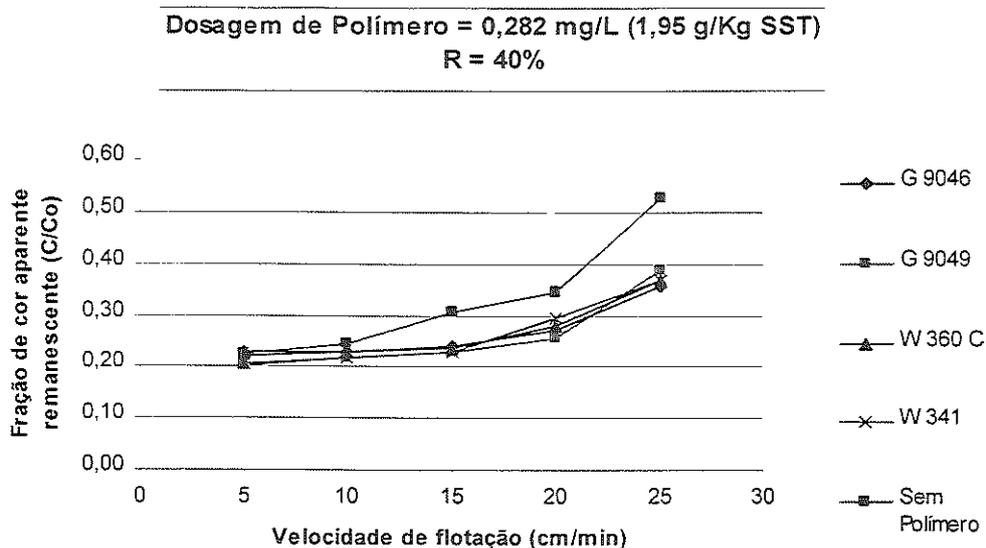


FIGURA 5.13 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,282 mg/L (1,95 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotateste e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; $R = 40\%$ (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

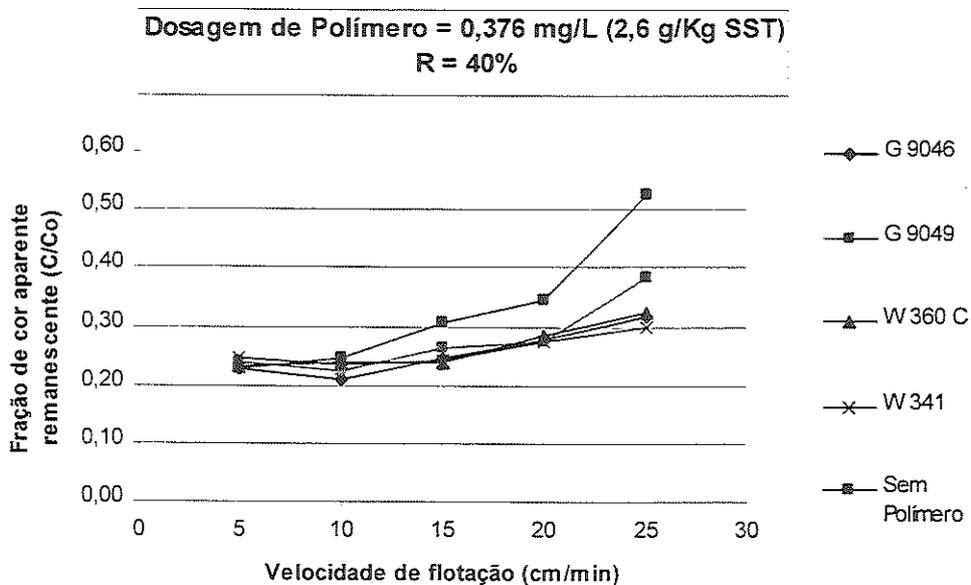


FIGURA 5.14 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,376 mg/L (2,60 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotateste e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; $R = 40\%$ (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

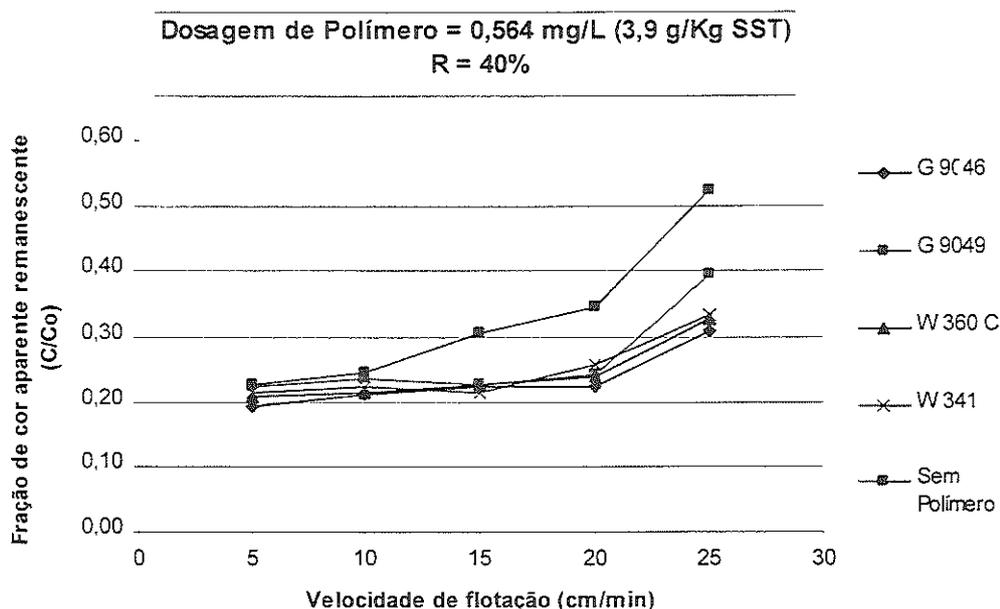


FIGURA 5.15 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para os polímeros G 9046, G 9049, W 360C e W 341 e uma dosagem de polímero de 0,564 mg/L (3,90 g/Kg SST).

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; $R = 40\%$ (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

TABELA 5.7 – Porcentagens de remoção de cor aparente, correspondentes aos polímeros testados nos ensaios de flotação do item 4.7.1, para cada dosagem e velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.11 a 5.15).

Cor aparente da amostra do efluente da lagoa = 815 uC (ver TABELA 5.4).

Polímero	Dosagem de polímero (mg/L)					
	0	0,094	0,189	0,282	0,376	0,564
	69,5 (268,4)					
G 9046		76,9 (188,2)	77,6 (182,6)	76,0 (195,2)	75,5 (199,4)	77,6 (182,6)
G 9049		75,5 (199,4)	76,4 (192,4)	77,1 (186,8)	73,6 (214,8)	77,4 (184,0)
W360C		75,7 (198,0)	75,7 (198,0)	76,2 (193,8)	76,0 (195,2)	77,4 (184,0)
W 341		76,0 (195,2)	77,4 (184,0)	77,1 (186,8)	75,9 (196,6)	78,5 (175,6)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à cor aparente residual, em uC.

Observando a FIGURA 5.16 e a TABELA 5.8, vê-se que os ensaios de flotação onde foram utilizados os polímeros G 9049, W 360 C e W 341, apresentaram porcentagens de remoção de SST muito boas, para dosagens de polímero acima de 0,282 mg/L (1,95 g/Kg SST). Esses valores de remoção de SST variaram de 64% (residual de 52,5 mg/L, polímero G 9049) a mais de 99,9% (residual de 0,5 mg/L, polímero W 341). Dentre esses três polímeros se destacou ainda o W 341, por apresentar sempre, para essas dosagens, remoções de SST acima de 90%.

Pode-se ver também pela FIGURA 5.16 e TABELA 5.8 que os resultados obtidos com a aplicação da dosagem de polímero de 0,282 mg/L, foram muito próximos aos fornecidos pelo ensaio realizado com a dosagem de 0,376 mg/L. Pode-se afirmar também que a remoção de SST diminuiu, para os três polímeros com exceção do W 341, quando foi utilizada uma dosagem de 0,564 mg/L (3,9 g/Kg SST), indicando que, para essa situação, as dosagens mais adequadas situaram-se na faixa de 0,282 a 0,376 mg/L (1,95 a 2,6 g/Kg SST), quando se pretende obter uma boa remoção de sólidos suspensos.

Pode-se ver, pelos resultados de remoção de DQO bruta referentes aos ensaios de flotação apresentados na FIGURA 5.17 e TABELA 5.9, que as porcentagens foram bastante semelhantes para a maioria das dosagens de polímero testadas, sendo que a maior parte permaneceu na faixa de 70% de remoção (de 63,0 a 83,2%, para as dosagens de 0,282 e 0,564 mg/L, respectivamente, referente ao ensaio onde foi aplicado o polímero G 9049). A exceção ocorreu quando foi aplicada a dosagem de polímero de 0,094 mg/L (0,65 g/Kg SST), pois esta forneceu as maiores porcentagens de remoção de DQO, apesar de ser a menor dosagem de polímero utilizada.

Portanto, com base nesses resultados, pode-se dizer que não houve vantagem em se utilizar dosagem de polímero maior que 0,094 mg/L, quando se pretendeu priorizar a remoção de DQO bruta.

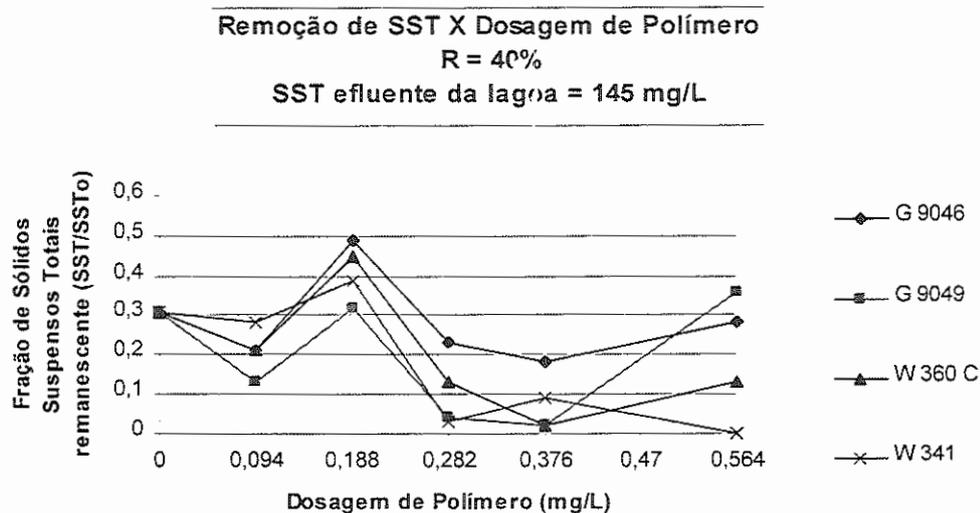


FIGURA 5.16 – Frações de sólidos suspensos totais remanescente (SST/SST₀) em função da dosagem de polímero.

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; R = 40% (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

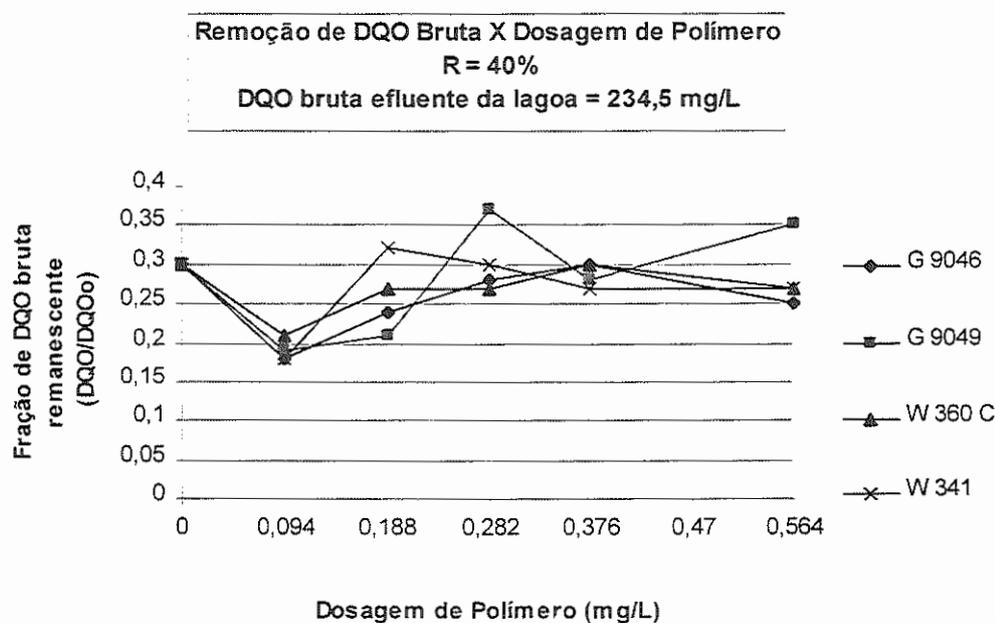


FIGURA 5.17 – Frações de DQO bruta remanescente (DQO/DQO₀) em função da dosagem de polímero.

1ª bateria de ensaios (item 4.7.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; R = 40% (em volume). Características do efluente da lagoa e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.4.

TABELA 5.8 – Porcentagens de remoção de sólidos suspensos totais, correspondentes aos polímeros testados nos ensaios de flotação do item 4.7.1, para cada dosagem e velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.16).

SST da amostra do efluente da lagoa = 145 mg/L (ver TABELA 5.4).

Polímero	Dosagem de polímero (mg/L)					
	0	0,094	0,189	0,282	0,376	0,564
	69,0 (44,5)					
G 9046		79,0 (30,5)	51,0 (70,5)	77,0 (34,0)	82,0 (26,5)	72,0 (41,0)
G 9049		87,0 (18,5)	68,0 (46,5)	96,0 (6,5)	98,0 (2,5)	64,0 (52,5)
W360C		79,0 (30,5)	55,0 (65,5)	87,0 (18,5)	98,0 (2,5)	87,0 (18,5)
W 341		72,0 (40,5)	61,0 (56,2)	97,0 (4,5)	91,0 (12,5)	>99,9 (0,5)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST residual, em mg/L.

TABELA 5.9 – Porcentagens de remoção de DQO bruta, correspondentes aos polímeros testados nos ensaios de flotação do item 4.7.1, para cada dosagem e velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.17).

DQO da amostra do efluente da lagoa = 234 mg/L (ver TABELA 5.4).

Polímero	Dosagem de polímero (mg/L)					
	0	0,094	0,189	0,282	0,376	0,564
	70,5 (69,2)					
G 9046		82,4 (41,2)	76,5 (55,2)	72,0 (65,7)	69,2 (70,5)	75,0 (58,7)
G 9049		80,9 (44,7)	79,4 (48,2)	63,0 (86,7)	72,0 (65,7)	83,2 (64,5)
W360C		79,4 (48,2)	73,5 (62,2)	73,5 (62,2)	70,5 (69,2)	73,5 (62,2)
W 341		82,4 (41,2)	67,5 (76,2)	70,5 (69,2)	73,5 (62,2)	73,5 (62,2)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à DQO residual, em mg/L.

Escolheu-se o polímero W 341 para dar prosseguimento ao trabalho, por ter sempre apresentado resultados muito bons quanto à remoção de turbidez, principalmente para as velocidades de flotação mais altas. Também foi um dos polímeros que forneceu os melhores resultados quanto à remoção de sólidos suspensos e de DQO, como pode ser visto pelas

FIGURAS 5.16 e 5.17 e TABELAS 5.8 e 5.9. A remoção de cor aparente, como já foi dito, não foi um parâmetro importante na escolha do melhor polímero, já que todos apresentaram porcentagens de remoção muito próximas.

Como as porcentagens de remoção de cor e turbidez, para todas as dosagens de polímeros utilizadas, foram muito semelhantes até a velocidade de flotação de 15 cm/min., a escolha da dosagem com a qual seriam feitos os ensaios subsequentes do trabalho foi feita com base nos resultados de remoção de SST. Sendo assim, como já foi dito, os melhores resultados de remoção desses parâmetros, referentes aos ensaios de flotação do item 4.7.1, foram alcançados utilizando dosagens de polímero na faixa de 0,282 a 0,376 mg/L (1,95 a 2,6 g/Kg SST). Portanto, para dar prosseguimento aos ensaios, adotou-se a dosagem de 3 g/Kg SST do polímero W 341, bem como uma dosagem abaixo e uma acima desta (1,5 e 4,5 g/Kg SST).

5.3.2 Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S

Devido à pouca correlação verificada entre os valores de sólidos suspensos totais (SST) e turbidez, todas as dosagens de polímero e valores de A/S foram calculados para um valor estimado de SST maior do que o real, resultando em dosagens de polímeros e valores de A/S significativamente maiores do que aqueles que se pretendia estudar.

Como foi definido no final do item 4.7.1, desejava-se testar as dosagens do polímero W 341 de 1,5; 3,0 e 4,5 g/Kg SST, para os valores de A/S de 0,01; 0,015; 0,020 e 0,025 mg ar/mg SST. Porém, a baixa correlação entre os valores de SST e turbidez acarretou em dosagens de polímero de 5,3; 10,6 e 15,9 g/Kg SST e A/S de 0,035; 0,053; 0,072 e 0,087 mg ar/mg

SST. Apesar dessas dosagens parecerem altas, quando se analisava seu valor correspondente em mg/L, via-se que isso não era verdade. Portanto, foi decidido colocar em evidência os valores em mg/L das dosagens de polímero, para se saber exatamente a quantidade de produto químico que estava sendo empregada em cada ensaio.

Nas FIGURAS 5.17 a 5.21 são apresentados os resultados dos ensaios de flotação realizados com as dosagens de polímero de 0,735; 1,47 e 2,21 mg/L (5,3; 10,6 e 15,9 g/Kg SST), utilizando os valores de A/S de 0,035; 0,053; 0,072 e 0,087 mg ar/mg SST

Observando os resultados das FIGURAS 5.18 a 5.20 pode-se notar que, para a razão ar/sólidos de 0,035 mg ar/mg SST, ou seja, para uma recirculação de 5%, não houve benefício com o aumento da dosagem de polímero, pois nesses ensaios a faixa de remoção foi a mesma, para cada velocidade de flotação, ou seja, para dosagem de 0,735 mg/L, a faixa de remoção de turbidez foi de 35,5% (residual de 179,9 uT) a 82,3% (residual de 49,49 uT); para dosagem de 1,47 mg/L, as porcentagens de de remoção de turbidez variaram de 38,5% (residual de 171,5 uT) a 82,2% (residual de 49,6 uT) e para dosagem de 2,21 mg/L, a faixa de remoção de turbidez foi de 47,9% (residual de 145,3 uT) a 82,5% (residual de 48,96 uT).

Apesar do A/S de 0,035 mg ar/mg SST estar dentro da faixa normalmente empregada (0,005 a 0,06 mg ar/mg SST), a quantidade de ar nesses ensaios não foi suficiente para promover uma boa flotação, pois apresentou uma remoção de turbidez considerável apenas para as velocidades de flotação de 5 e 10 cm/min.

Uma possível explicação para isso é que, segundo REALI (1991), quando se tem suspensões muito diluídas (baixos valores de SST), o parâmetro A/S pode tornar-se inadequado para o monitoramento do processo. Nesses casos, passa a ser mais importante o parâmetro “g ar dissolvido/m³ de afluente”, o qual informa indiretamente a concentração média de microbolhas introduzidas no flotador. Assim, tal parâmetro é capaz

de fornecer melhores informações a respeito da taxa de colisões entre microbolhas e flocos presentes em suspensões diluídas, como por exemplo em flotadores utilizados em tratamento de águas de abastecimento. Para o caso em questão, foi adicionado ao afluente investigado cerca de 5 g de ar/m³ de afluente, valor este baixo quando comparado até mesmo aos valores usuais utilizados na flotação de águas para abastecimento (de 6 a 12 g ar/ m³ de água bruta). Dessa forma, optou-se, daqui por diante, pela apresentação do valor do referido parâmetro (g ar/m³ de afluente) conjuntamente ao valor de A/S.

Vê-se pela FIGURA 5.18 que a razão A/S de 0,053 mg ar/mg SST (7 g de ar/m³ de afluente), ou seja, R = 7%, teve um comportamento semelhante ao apresentado pela recirculação de 5%. Mesmo estando dentro da faixa de valores utilizados para águas de abastecimento, possivelmente essa quantidade de ar é um valor muito baixo para o caso da flotação da água residuária objeto do presente estudo. Pelas FIGURAS 5.18 e 5.21 pode-se ver que a faixa de remoção para R = 7% (7 g ar/m³ afluente) foi semelhante utilizando a dosagem de polímero de 0,735 mg/L (5,3 g/Kg SST) – 49,0% (residual de 142,3 uT) a 84,9% (residual de 42,3 uT) ou não utilizando polímero – 29,4% (residual de 497,0 uT) a 88,3% (residual de 32,64 uT). Comparando esses resultados aos apresentados pelas FIGURAS 5.19 e 5.20, vê-se que a flotação com essa quantidade de ar só apresentou comportamento melhor quando se aumentou a dosagem de polímero, o que confirmou que 7 g de ar/m³ de afluente foi insuficiente para promover uma boa flotação do efluente em questão. Isso está de acordo com os resultados obtidos por PENETRA *et al.* (1998) e REALI *et al.*, (1998), na flotação de um efluente de reator anaeróbio. Esse efluente, assim como o utilizado no presente trabalho, também possuía baixa concentração de SST (faixa de 41 a 102 mg/L). Assim, o parâmetro g ar/m³ afluente também passou a ser mais importante para os autores do que a razão A/S. Nos seus experimentos, os melhores resultados foram obtidos com 19 g ar/

m³ afluyente (R = 20%, em volume), valor este muito acima dos utilizados nos ensaios do item 4.7.2.

De acordo com os resultados apresentados nas FIGURAS 5.18 a 5.20 e TABELA 5.10, os valores de A/S de 0,072 (10 g de ar/m³ de afluyente) e 0,087 (12 g de ar/m³ de afluyente) apresentaram remoções de turbidez muito semelhantes e bem acima das apresentadas pelos outros valores de A/S, para todas as dosagens de polímero.

Observando os resultados mostrados na TABELA 5.10, vê-se que, para a dosagem de polímero de 0,735 mg/L (5,3 g/Kg SST), a diferença na remoção de turbidez é muito grande (59,8% para 7 g de ar/m³ de afluyente e 91,3% para 10 g de ar/m³ de afluyente, para V_{flot} = 15 cm/min.) com um aumento de apenas 3% na recirculação (7 para 10%), confirmando que uma recirculação abaixo da ótima pode fornecer uma quantidade de ar insatisfatória para promover colisões suficientes entre bolhas de ar e flocos (MENELL, 1974).

As FIGURAS 5.18 e 5.20 mostram que a remoção de turbidez para as dosagens de polímero de 0,735, 1,47 e 2,21 mg/L (5,3; 10,6 e 15,9 g/Kg SST) foram bastante semelhantes nos ensaios com aplicação de 10 e 12 g ar/m³ afluyente, para toda a faixa de velocidades de flotação.

Através dos resultados das FIGURAS 5.19 e 5.20, pode-se ver que as razões A/S de 0,053, 0,072 e 0,087 mg ar/mg SST (7, 10 e 12 g ar/g de ar/m³ de afluyente) apresentaram um comportamento muito semelhante até a velocidade de flotação 10 cm/min. sendo que, a partir dessa velocidade, os resultados com 7 g de ar/m³ de afluyente se mostraram piores e com 10 e 12 g de ar/m³ de afluyente continuaram bons e ainda semelhantes. Portanto, conclui-se que 10 g de ar/m³ de afluyente já foram suficientes para promover a flotação.

Para o ensaio onde não foi utilizado polímero, como mostra a FIGURA 5.21, pode-se ver que os melhores resultados foram obtidos com 10 g de ar/m³ de afluyente ao invés de 12 g de ar/m³ de afluyente, como em todos os outros ensaios, representados pelas FIGURAS 5.18 a 5.20.

Quanto à dosagem considerada adequada à flotação, levando-se em conta a remoção de turbidez, verifica-se que 0,735 mg/L de polímero W 341 apresentou resultados bastante parecidos com aqueles obtidos com dosagens maiores, considerando os valores de quantidade de ar fornecidos na faixa de 10 e 12 g ar/m³ afluyente.

Analisando as remoções de sólidos suspensos totais, representadas pela FIGURA 5.22 e pela TABELA 5.11, pode-se observar que as porcentagens apresentadas pelos ensaios onde foram aplicados 10 e 12 g ar/m³ afluyente foram muito semelhantes, sendo que os resultados ficaram na faixa de 69,0% (DP = 1,47 mg/L, 10 g ar/m³ afluyente) a 77,0% (DP = 1,47 mg/L, 12 g ar/m³ afluyente). Os valores de remoção apresentados pelo ensaio onde não foi utilizado polímero foram desconsiderados, por serem piores do que os obtidos nos outros ensaios, principalmente para a quantidade de ar de 12 g ar/m³ afluyente.

Como já havia sido constatado através dos resultados de remoção de turbidez, nota-se que 10 g ar/m³ afluyente se mostrou uma quantidade de ar suficiente para a flotação, promovendo uma boa remoção de SST, não sendo necessário empregar 12 g ar/m³ afluyente.

Observando a FIGURA 5.22 pode-se constatar também que o ensaio realizado com a aplicação da dosagem de polímero de 0,735 mg/L apresentou remoções de SST muito parecidas com as outras dosagens utilizadas, também para as quantidades de ar fornecidas ao processo de 10 e 12 g ar/m³ afluyente. Portanto, isso leva a crer que não houve necessidade de se utilizar dosagem de polímero W 341 maior que 0,735 mg/L quando se pretendeu promover a remoção de sólidos suspensos.

Quanto à remoção de DQO, pode-se ver através dos resultados mostrados na FIGURA 5.23 e TABELA 5.12, que o comportamento foi muito semelhante ao da remoção de SST, ou seja, as porcentagens apresentadas pelos ensaios onde foram aplicados 10 e 12 g ar/m³ afluyente foram parecidas, sendo que os resultados ficaram na faixa de 75,2% (DP = 1,47 mg/L, 10 g ar/m³ afluyente) a 81,4% (DP = 1,47 mg/L, 12 g ar/m³ afluyente).

Os valores de remoção de DQO apresentados pelo ensaio onde não foi utilizado polímero, assim como na remoção de SST, foram desconsiderados, por serem piores do que os obtidos nos outros ensaios, principalmente para a quantidade de ar de 12 g ar/m³ afluyente.

Como a dosagem de 0,735 mg/L de polímero também forneceu resultados de remoção de DQO muito semelhantes aos apresentados pelas dosagens maiores, foi decidido adotá-la como a dosagem do polímero W 341 mais adequada nessa etapa do trabalho. Também adotou-se 10 g ar/m³ afluyente como a quantidade de ar aplicada ao processo que forneceu os melhores resultados nessa segunda etapa do trabalho.

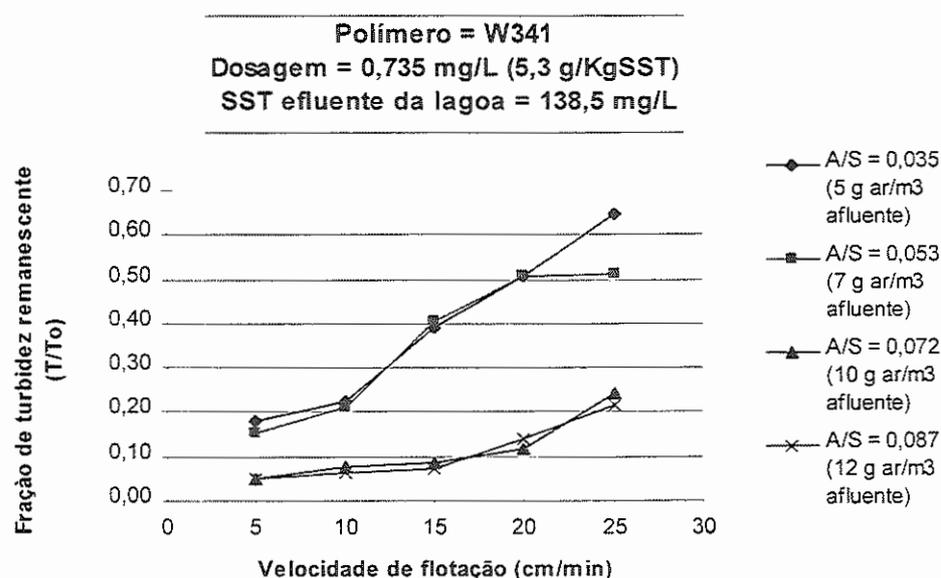


FIGURA 5.18 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 0,735 mg/L (5,30 g/Kg SST) e diferentes valores de A/S.

2ª bateria de ensaios (item 4.7.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $Gf = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa. Características do efluente da lagoa (Tipo 1) e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.5.

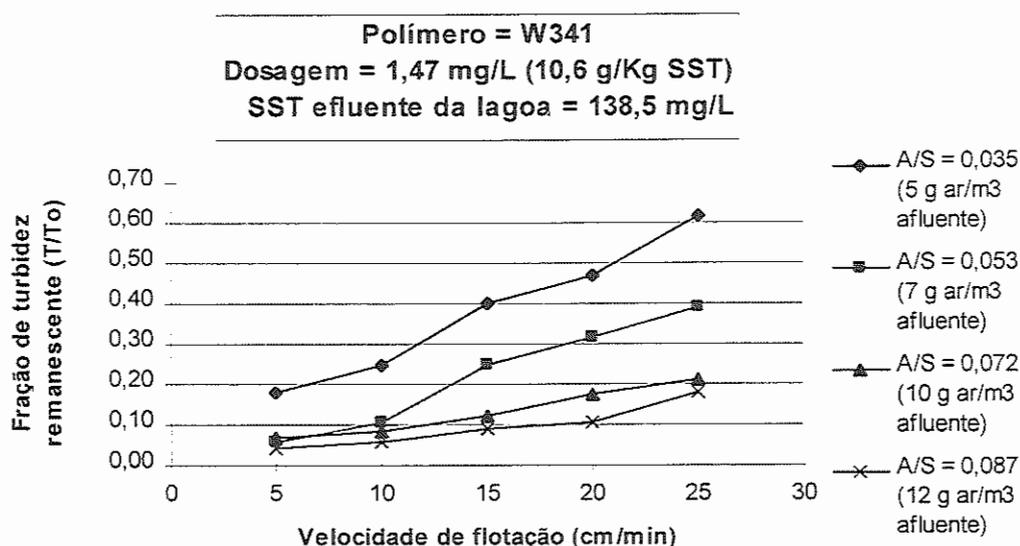


FIGURA 5.19 – Frações de turbidez remanescente (T/T₀) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 1,47 mg/L (10,60 g/Kg SST) e diferentes valores de A/S.

2ª bateria de ensaios (item 4.7.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_f = 1 min.; G_f = 100 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa (Tipo 1) e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.5.

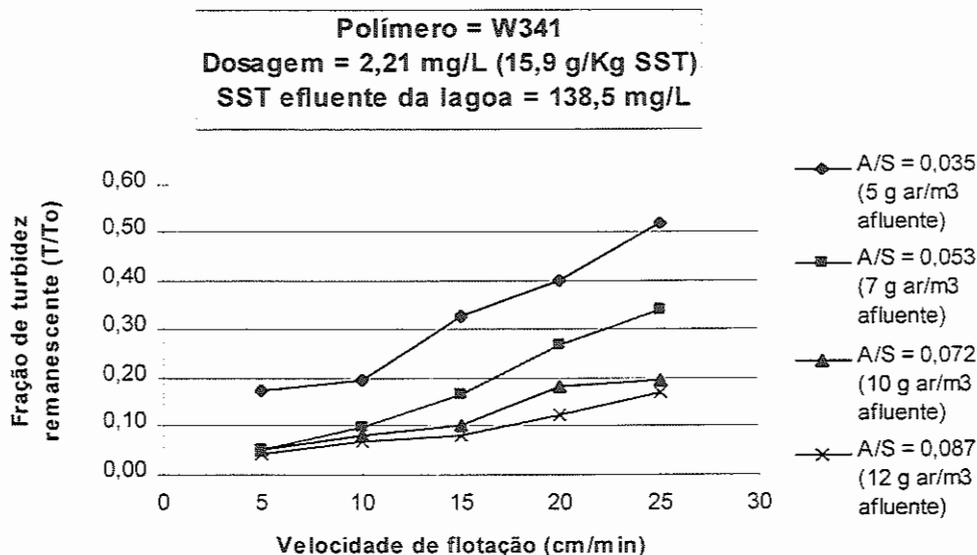


FIGURA 5.20 – Frações de turbidez remanescente (T/T₀) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 2,21 mg/L (15,90 g/Kg SST) e diferentes valores de A/S.

2ª bateria de ensaios (item 4.7.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_f = 1 min.; G_f = 100 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa (Tipo 1) e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.5.

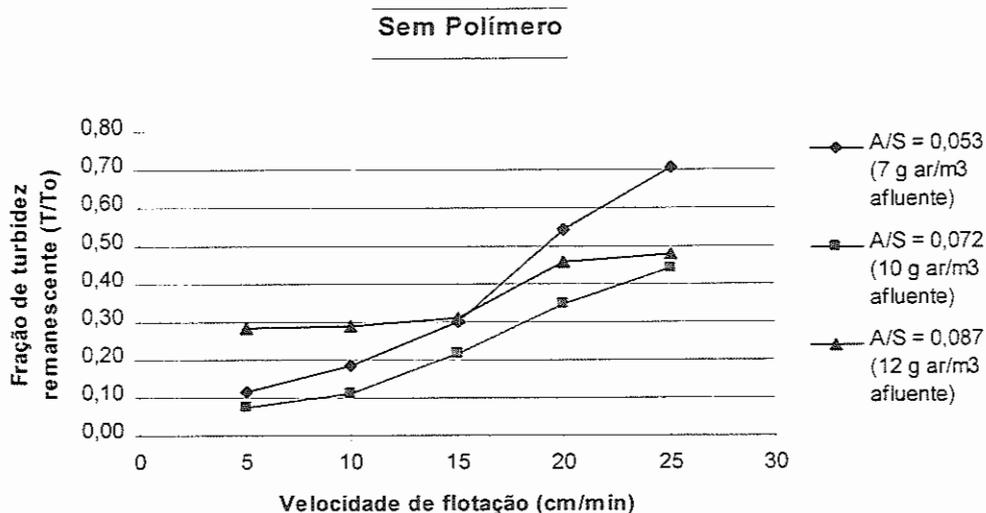


FIGURA 5.21 – Fração de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para diferentes valores de A/S e sem adição de polímero.

2ª bateria de ensaios (item 4.7.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa. Características do efluente da lagoa (Tipo 1) e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.5.

TABELA 5.10 – Porcentagens de remoção de turbidez, correspondentes aos valores de A/S testados nos ensaios de flotação do item 4.7.2, para cada dosagem e velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.18 a 5.21).

Turbidez da amostra do efluente concentrado da lagoa (Tipo 1) = 279 uT (ver TABELA 5.5).

A/S mg ar/mg SST	Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)			
	0	0,735	1,47	2,21
0,035	-	61,1 (108,5)	60,0 (111,6)	67,2 (91,49)
0,053	70,0 (83,82)	59,8 (112,6)	75,2 (69,12)	83,5 (46,16)
0,072	78,6 (59,75)	91,3 (24,33)	88,0 (33,38)	89,9 (28,13)
0,087	69,1 (86,11)	92,7 (20,44)	91,2 (24,58)	92,1 (22,12)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez residual, em uT.

Remoção de Sólidos Suspensos Totais X Dosagem de Polímero
SST efluente da lagoa = 138,5 mg/L

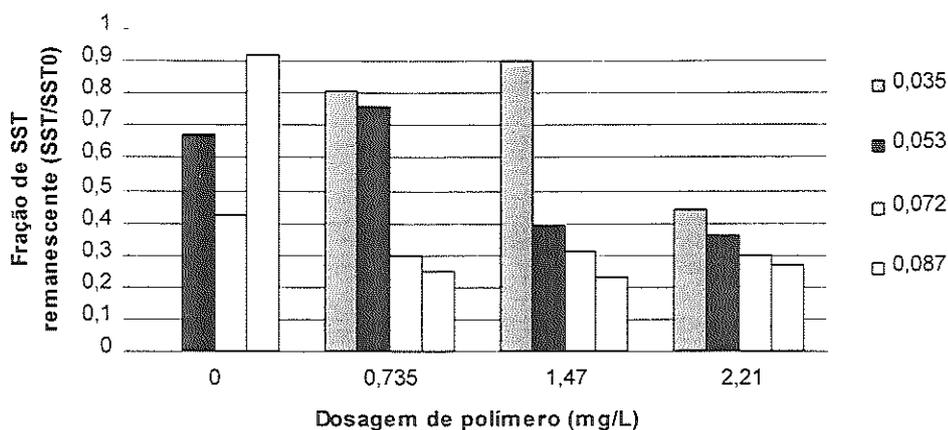


FIGURA 5.22 – Frações de sólidos suspensos totais remanescente (SST/SST0) em função da dosagem de polímero e para diferentes valores de A/S.

2ª bateria de ensaios (item 4.7.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1 \text{ min.}$; $G_f = 100 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}} = 450 \pm 10 \text{ kPa}$. Características do efluente da lagoa (Tipo 1) e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.5.

Remoção de DQO bruta X Dosagem de Polímero
DQO bruta efluente da lagoa = 347 mg/L

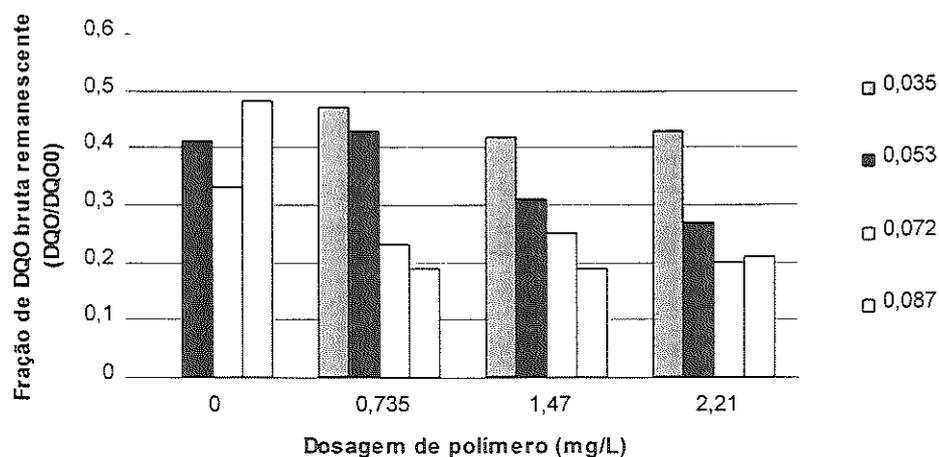


FIGURA 5.23 – Frações de DQO bruta remanescente (DQO/DQO0) em função da dosagem de polímero.

2ª bateria de ensaios (item 4.7.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1 \text{ min.}$; $G_f = 100 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}} = 450 \pm 10 \text{ kPa}$. Características do efluente da lagoa (Tipo 1) e da recirculação pressurizada – ver TABELA 5.5.

TABELA 5.11 – Porcentagens de remoção de sólidos suspensos totais, correspondentes aos valores de A/S testados nos ensaios de flotação do item 4.7.2, para cada dosagem e velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.22).

SST da amostra do efluente concentrado da lagoa (Tipo 1) = 138,5 mg/L (ver TABELA 5.5).

A/S mg ar/mg SST	Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)			
	0	0,735	1,47	2,21
0,035	-	19,0 (112,3)	10,0 (124,6)	56,0 (60,3)
0,053	33,0 (92,7)	24,0 (105,9)	61,0 (53,9)	64,0 (50,2)
0,072	58,0 (57,8)	70,0 (41,2)	69,0 (42,8)	70,0 (40,9)
0,087	8,0 (127,4)	75,0 (34,8)	77,0 (31,6)	73,0 (37,8)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST residual, em mg/L.

TABELA 5.12 – Porcentagens de remoção de DQO bruta, correspondentes aos valores de A/S testados nos ensaios de flotação do item 4.7.2, para cada dosagem e velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.23).

DQO da amostra do efluente concentrado da lagoa (Tipo 1) = 347 mg/L (ver TABELA 5.5).

A/S mg ar/mg SST	Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)			
	0	0,735	1,47	2,21
0,035	-	53,0 (163,0)	58,4 (144,2)	56,9 (149,6)
0,053	59,0 (142,4)	56,6 (150,7)	68,6 (109,1)	73,3 (92,5)
0,072	67,0 (114,7)	76,9 (80,2)	75,2 (85,9)	80,2 (68,7)
0,087	51,7 (159,6)	80,5 (67,5)	81,4 (64,6)	78,8 (73,4)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST residual, em mg/L.

5.4 Terceira etapa – Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação do polímero W 341, de cloreto férrico e de uma associação entre os dois, e investigação da dosagem e razão ar/sólidos (A/S)

Essa terceira etapa do trabalho foi dividida em quatro baterias de ensaios, cujos resultados serão apresentados a seguir, nos itens 5.4.1, 5.4.2, 5.4.3 e 5.4.4. A caracterização do efluente da lagoa aerada, utilizado nos ensaios de flotação correspondentes a esses itens pode ser vista TABELA 5.13. Nesta tabela são mostrados os resultados de caracterização dos dois tipos de efluentes investigados nessa terceira etapa de estudo. Conforme comentado no item 4.7.2, esses efluentes foram obtidos a partir da concentração das amostras da saída da lagoa aerada, com o objetivo de se obter os efluentes Tipo 2 e 3, com diferentes concentrações de sólidos suspensos.

Como especificado no item 4.8, foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento público na câmara de saturação; assim, em todos os cálculos, foi considerado o fator de diluição correspondente.

TABELA 5.13 – Caracterização das amostras do efluente concentrado da lagoa aerada utilizado nos ensaios de flotação correspondentes aos itens 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3 e 4.8.4.

	Efluente da lagoa Tipo 2 (24/11/99) (ensaios dos itens 4.8.1, 4.8.2 e 4.8.3)	Efluente da lagoa Tipo 3 (25/11/99) (ensaios do item 4.8.4)
T (°C)	24,8	24,8
PH	7,09	7,09
Turbidez (uT)	206	407
Cor Aparente (uC)	830	-
DQO bruta (mg/L)	319	650
SST (mg/L)	245	609
SSF (mg/L)	92,5	276
SSV (mg/L)	152,5	333
P-PO ₄ ³⁺ amostra bruta (mg/L)	-	21,14
P-PO ₄ ³⁺ amostra filtrada (mg/L)	-	12,6
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	-	31,71
NTK (mg/L)	-	79,96
NO ₃ ⁻ (mg/L)	-	0,38
NO ₂ ⁻ (mg/L)	-	0

5.4.1 Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 2, com a aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S

A primeira parte dessa bateria de ensaios foi realizada com dosagens do polímero W 341 de 0,54; 1,08 e 1,62 mg/L (2,2; 4,4 e 6,6 g/Kg SST) e com um valor de A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente). A segunda parte foi realizada com a dosagem de 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST), utilizando dois valores de A/S, 0,03 e 0,037 mg ar/mg SST (7 e 9 g ar/m³ afluente).

Na FIGURA 5.24 são apresentados os resultados de remoção de turbidez relativos à 1ª parte dessa bateria de ensaios de flotação, realizados novamente com o polímero W 341. Nota-se que, para toda a faixa de velocidades de flotação estudadas, a aplicação do polímero W 341 com dosagem de 0,54 mg/L (2,2 g/Kg SST) resultou em melhora no desempenho

da flotação, pois apresentou porcentagens de remoção de turbidez na faixa de 71,9% (residual de 57,88 uT) a 89,8% (residual de 20,93 uT), sendo maiores que 54,5 % (residual de 93,63 uT) a 88,0% (residual de 24,74 uT), fornecidas pelo ensaio realizado sem polímero.

Para velocidades de flotação menores ou iguais a 15 cm/min., as três dosagens apresentaram resultados muito semelhantes, como pode ser visto na FIGURA 5.24 e TABELA 5.14. Porém, para as velocidades de flotação de 20 e 25 cm/min., os resultados da flotação utilizando a dosagem de polímero de 0,54 mg/L (2,2 g/Kg SST) se mostraram piores (para $V_{flot} = 20$ cm/min., a dosagem de 0,54 mg/L forneceu remoção de 80,2%, com residual de 40,77 uT, e a dosagem de 1,08 mg/L removeu 85,2% da turbidez, com residual de 30,4 uT); já as dosagens de 1,08 e 1,62 mg/L (4,4 e 6,6 g/Kg SST) apresentaram remoções de turbidez semelhantes para toda a faixa de velocidades de flotação investigadas. Portanto conclui-se que não há vantagem em se utilizar uma dosagem de polímero de 1,62 mg/L (6,6 g/Kg SST), escolhendo-se a dosagem de 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST) para os ensaios onde seriam testados diferentes valores de A/S.

Analisando a FIGURA 5.25, vê-se que as porcentagens de remoção de cor, para as diferentes dosagens do polímero W 341, são compatíveis com as apresentadas na FIGURA 5.24, relativas à remoção de turbidez, porém apresentaram eficiências de remoção menores. Pela FIGURA 5.24 vê-se que a faixa de remoção de turbidez permaneceu entre 71,9% (DP = 0,54 mg/L e $V_{flot} = 25$ cm/min.) e 91,6% (DP = 1,08 mg/L e $V_{flot} = 5$ cm/min.), sendo que o pior resultado foi de 54,5% ($V_{flot} = 25$ cm/min.) para o ensaio realizado sem o uso de polímero; já na FIGURA 5.25, observa-se que o intervalo de remoção de cor se encontrou entre 45,0% (DP = 0,54 mg/L e $V_{flot} = 25$ cm/min.) e 72,2% (DP = 1,08 mg/L e $V_{flot} = 5$ cm/min.), sendo que o pior resultado foi de apenas 23,2% (25 cm/min.), correspondente ao ensaio realizado sem polímero.

Para velocidades de flotação menores ou iguais a 10 cm/min., as três dosagens apresentaram resultados muito semelhantes, como pode ser visto

na FIGURA 5.25. Porém, para as velocidades de flotação maiores ou iguais a 15 cm/min., os resultados da flotação utilizando a dosagem de polímero de 0,54 mg/L (2,2 g/Kg SST) se mostraram piores. Por exemplo, para $V_{flot} = 15$ cm/min., a dosagem de 0,54 mg/L forneceu remoção de cor de 59,9%, com residual de 332,5 uT, e a dosagem de 1,08 mg/L removeu 66,9% da turbidez, com residual de 274,7 uT; já as dosagens de 1,08 e 1,62 mg/L (4,4 e 6,6 g/Kg SST) apresentaram remoções de cor semelhantes para toda a faixa de velocidades de flotação investigadas (ver FIGURA 5.25). Portanto, vê-se que a dosagem de polímero de 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST) também se mostrou a mais adequada quando o parâmetro analisado foi a remoção de cor.

Quando se considera a remoção de sólidos suspensos (ver FIGURA 5.26 e TABELA 5.15), vê-se que a utilização de polímero favoreceu o processo de flotação, pois o ensaio sem a aplicação deste resultou numa remoção de SST de 81,6% (residual de 45,05 mg/L), enquanto que, com a aplicação da dosagem de polímero de 0,54 mg/L (2,2 g/Kg SST), obteve-se remoção de SST de 89,8% (residual de 25,06 mg/L).

Diferentemente do ocorrido na remoção de turbidez e cor aparente, onde a dosagem de polímero mais adequada foi a de 1,08 mg/L, não houve vantagem em se utilizar dosagem de polímero maior que 0,54 mg/L, considerando prioritária a remoção de sólidos suspensos.

As porcentagens de remoção de DQO, obtidas através desses ensaios de flotação, são mostradas na FIGURA 5.27 e na TABELA 5.15. Através delas, pode-se notar que a diferença das porcentagens de remoção de DQO para todas as dosagens testadas é pequena, sendo que os resultados fornecidos com a utilização de 0,54 e 1,08 mg/L de polímero W 341 já são bons, não havendo necessidade da aplicação da dosagem de 1,62 mg/L.

Como se pode ver na TABELA 5.15, até mesmo o ensaio realizado sem a aplicação de polímero forneceu uma porcentagem de remoção de DQO de 69,9%, o que pode ser considerado também um bom resultado, o que vem confirmar que um fornecimento de quantidade de ar por volta de 10 g ar/m³ afluente é capaz de promover uma boa flotação, de acordo com os resultados dos ensaios de flotação do item 4.7.2.

Então, como já foi dito, com base nos resultados dos ensaios da 1ª parte dessa primeira bateria de ensaios, a dosagem de polímero igual a 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST) foi escolhida para prosseguir o estudo da adequação da quantidade de ar a ser fornecida ao processo de flotação, muito embora a dosagem de 0,54 mg/L (2,2 g/Kg SST) também tenha fornecido resultados excelentes, muito parecidos com os obtidos com a aplicação de 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST) de polímero W 341.

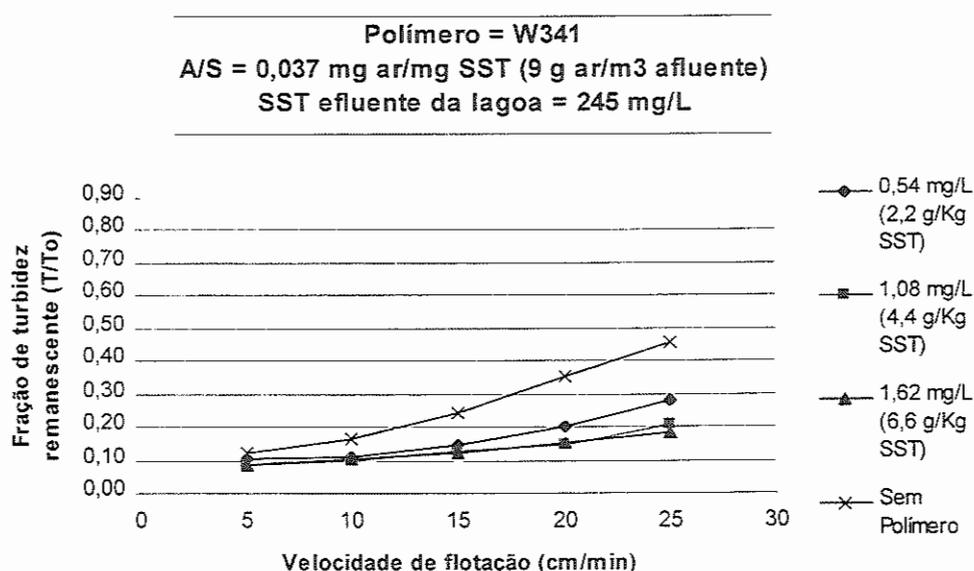


FIGURA 5.24 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.8.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; A/S = 0,037 mL ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), R = 9%. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

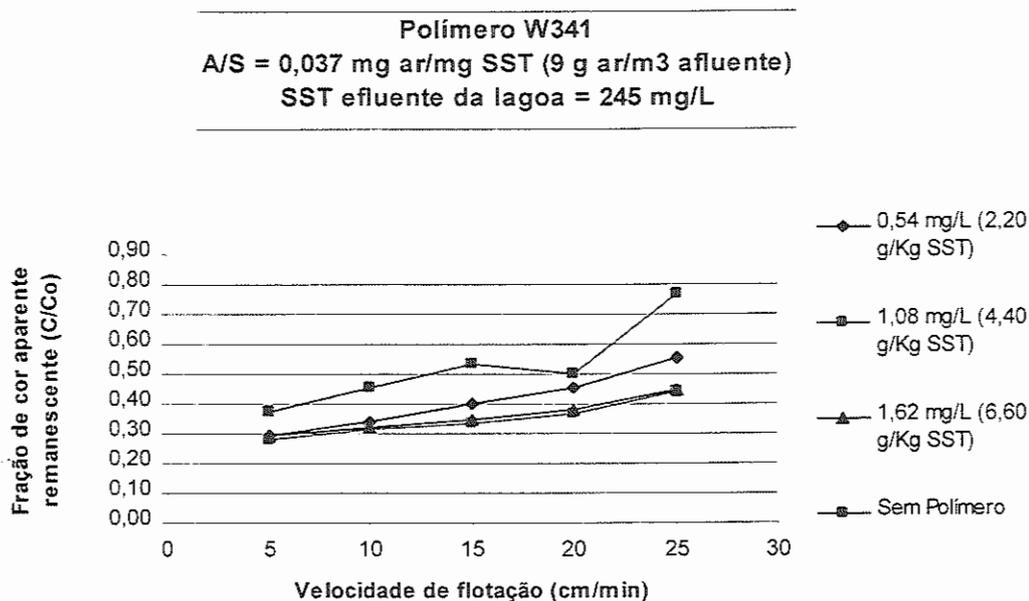


FIGURA 5.25 – Frações de cor aparente remanescente (C/C₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.8.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_f = 1 min.; G_f = 100 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), R = 9%. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

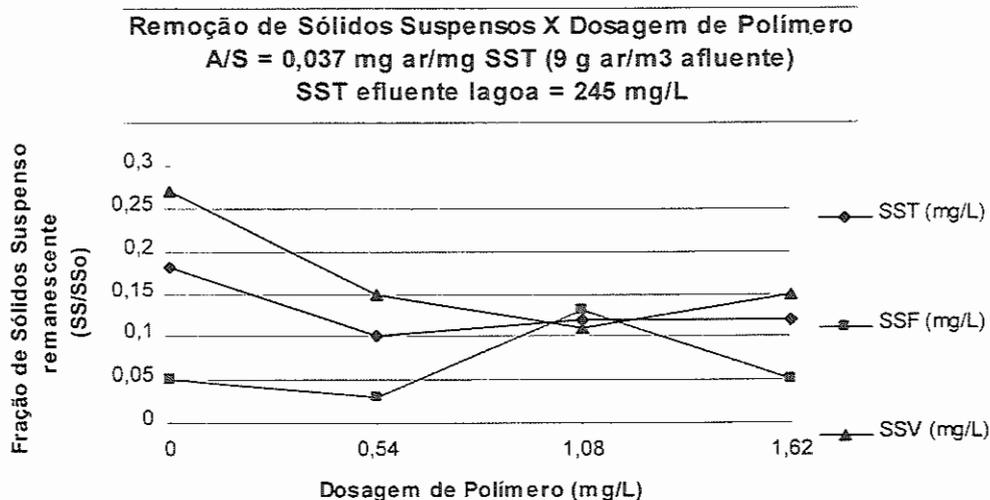


FIGURA 5.26 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.8.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_f = 1 min.; G_f = 100 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), R = 9%. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

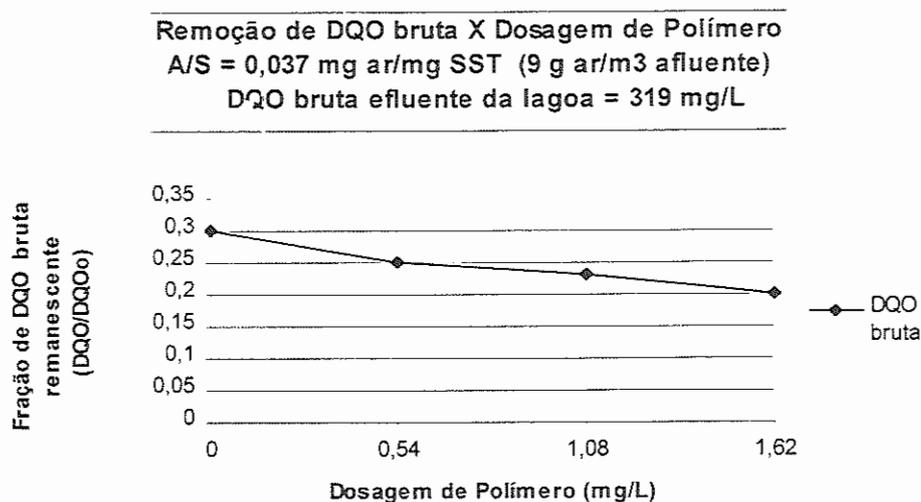


FIGURA 5.27 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.8.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1 \text{ min.}$; $G_f = 100 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}} = 450 \pm 10 \text{ kPa}$; $A/S = 0,037 \text{ mg ar/mg SST (9 g ar/m}^3 \text{ afluente)}$, $R = 9\%$. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

TABELA 5.14 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às dosagens do polímero W 341 testadas nos ensaios de flotação do item 4.8.1, utilizando o valor de A/S de $0,037 \text{ mg ar/mg SST (9 g ar/m}^3 \text{ afluente)}$, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.24 e 5.25).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 2 = 206 mg/L (ver TABELA 5.13).
 Cor aparente da amostra do efluente Tipo 2 = 830 mg/L (ver TABELA 5.13).

	Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)			
	0	0,54	1,08	1,62
Remoção de turbidez (%)	75,9 (49,59)	85,2 (30,41)	87,2 (26,38)	87,9 (24,85)
Remoção de cor aparente (%)	46,6 (443,6)	59,9 (332,5)	66,9 (274,7)	65,5 (286,7)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC .

TABELA 5.15 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às dosagens do polímero W 341 testadas nos ensaios de flotação do item 4.8.1, utilizando o valor de A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.26 e 5.27).

SST da amostra do efluente Tipo 2 = 245 mg/L (ver TABELA 5.13).
DQO bruta da amostra do efluente Tipo 2 = 319 mg/L (ver TABELA 5.13).

	Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)			
	0	0,54	1,08	1,62
Remoção de SST (%)	81,6 (45,05)	89,8 (25,06)	88,3 (28,60)	88,4 (28,5)
Remoção de DQO bruta (%)	69,9 (95,81)	74,9 (80,12)	76,7 (74,12)	80,3 (62,7)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

Quando se analisa as FIGURAS 5.28 e 5.29 e a TABELA 5.16, onde se tem os resultados de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes aos ensaios de flotação com aplicação da dosagem de polímero de 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST) e com a variação da razão ar/sólidos (A/S), vê-se que as porcentagens de remoção para A/S de 0,037 (9 g ar/m³ afluente), ou seja, R = 9% (faixa de remoção de 79,1 a 91,6% e 56,0 a 72,2%, respectivamente), são apenas um pouco melhores do que os apresentados pelo ensaio realizado com A/S de 0,03 (7 g ar/m³ afluente), ou seja, R = 7% (faixa de remoção de 73,4 a 91,1% e 49,6 a 70,7%, respectivamente).

Apesar disso, pode-se ver que os resultados de remoção de turbidez obtidos com 9 g ar/m³ afluente e 1,08 mg/L de polímero foram muito bons, sendo muito semelhantes aos fornecidos pelo ensaio do item 4.7.2, onde foi aplicada dosagem de polímero de 1,47 mg/L e 10 g ar/m³ afluente (porcentagens de remoção variando de 79,1 a 93,4%).

Quanto à remoção de sólidos suspensos, como pode ser visto na FIGURA 5.30 e na TABELA 5.17, houve apenas uma ligeira vantagem na utilização de 9 g ar/m³ afluente quando se considera a remoção de SST;

porém, quando se utilizou um A/S de 0,037 (9 g ar/m³ afluente), promoveu-se uma maior remoção de SSV (78,9% com 7 g ar/m³ afluente e 89,3% com 9 g ar/m³ afluente).

As porcentagens de remoção de DQO bruta, obtidas com 1,08 mg/L de polímero e A/S de 0,03 e 0,037 mg ar/mg SST (7 e 9 g ar/m³ afluente), pode ser vista na FIGURA 5.31 e TABELA 5.17. Observando-as, nota-se que não houve vantagem alguma na utilização de 9 g ar/m³ afluente, pois as porcentagens de remoção para as duas quantidades de ar foram praticamente idênticas.

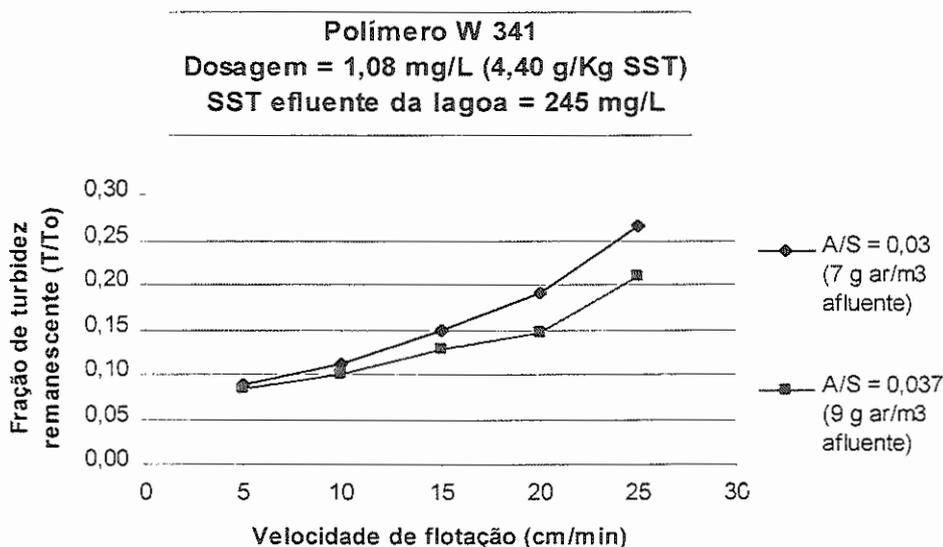


FIGURA 5.28 – Frações de turbidez remanescente (T/T₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.8.1) realizados com o equipamento de Flotateste e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_f = 1 min.; G_f = 100 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; Dosagem de Polímero W 341 = 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST). Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

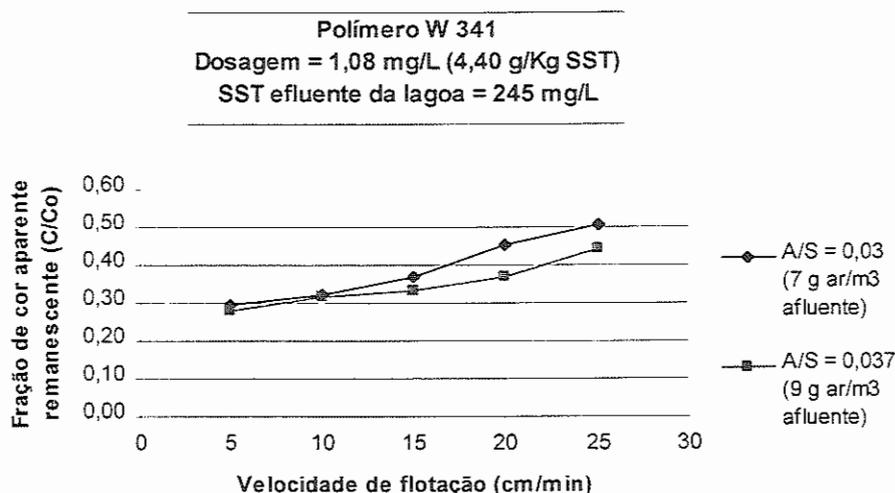


FIGURA 5.29 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.8.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; Dosagem de Polímero W 341 = 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST). Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

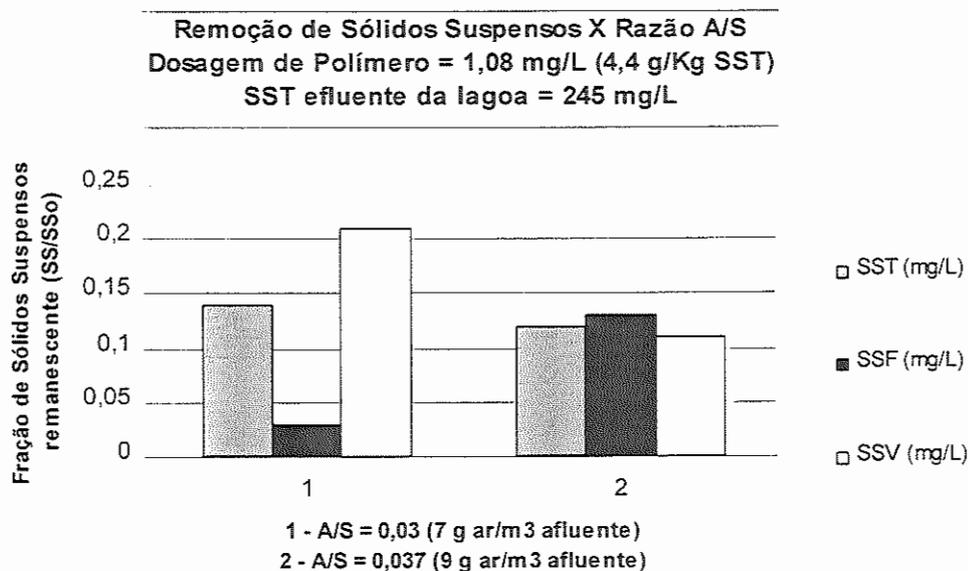


FIGURA 5.30 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.8.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; Dosagem de Polímero W 341 = 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST). Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

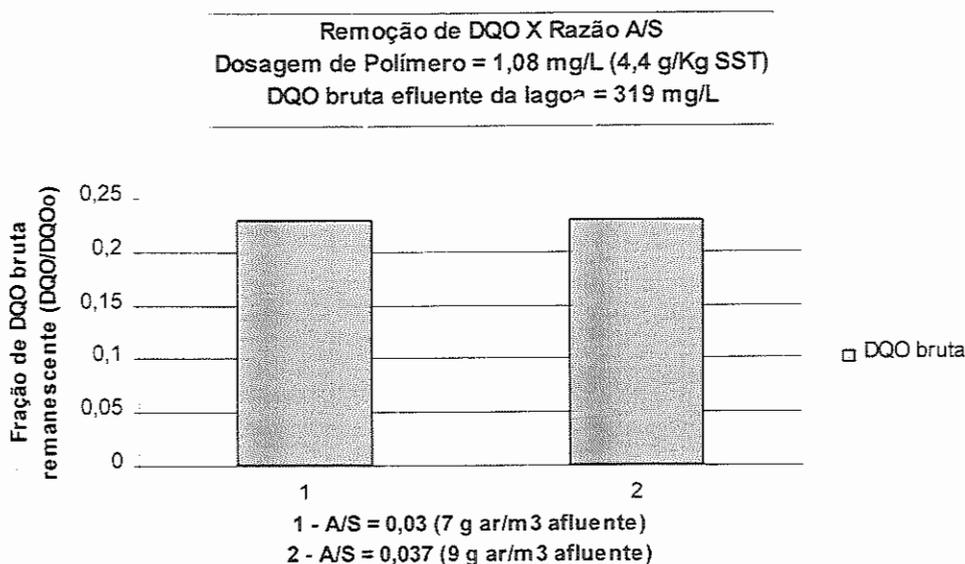


FIGURA 5.31 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, para diferentes valores de A/S.

2ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.8.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. Tf = 1 min.; Gf = 100 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; Dosagem de Polímero W 341 = 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST). Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

TABELA 5.16 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S testadas nos ensaios de flotação da 2ª parte do item 4.8.1, utilizando a dosagem do polímero W 341 de 1,08 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.28 e 5.29).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 1 = 206 mg/L (ver TABELA 5.13).
 Cor aparente da amostra do efluente Tipo 1 = 830 mg/L (ver TABELA 5.13).

Razão A/S (mg ar/mg SST)	Remoção de turbidez (%)	Remoção de cor aparente (%)
0,03 (7 g ar/m ³ afluente)	85,2 (30,52)	62,9 (307,66)
0,037 (9 g ar/m ³ afluente)	87,2 (26,38)	66,9 (274,68)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC.

TABELA 5.17 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S testadas nos ensaios de flotação da 2ª parte do item 4.8.1, utilizando a dosagem do polímero W 341 de 1,08 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.30 e 5.31).

SST da amostra do efluente Tipo 2 = 245 mg/L (ver TABELA 5.13).
DQO bruta da amostra do efluente Tipo 2 = 319 mg/L (ver TABELA 5.13).

Razão A/S (mg ar/mg SST)	Remoção de SST (%)	Remoção de DQO bruta (%)
0,03 (7 g ar/m ³ afluente)	85,8 (34,84)	77,3 (72,25)
0,037 (9 g ar/m ³ afluente)	88,3 (28,61)	76,7 (74,12)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

5.4.2 Ensaios de clarificação por flotação, do efluente Tipo 2, com a aplicação de cloreto férrico, variando a dosagem e a razão A/S

Na 1ª primeira parte dessa segunda bateria de ensaios foram testadas dosagens de cloreto férrico de 20,0; 40,0; 60,0 e 80,0 mg/L, utilizando uma razão A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente). Na 2ª parte foi utilizada a dosagem de 80 mg/L para testar as razões A/S de 0,03 e 0,037 (7 e 9 g ar/m³ afluente).

A FIGURA 5.32 e a TABELA 5.18 mostram as porcentagens de remoção de turbidez referentes à 1ª parte da segunda bateria de ensaios de flotação. Nela, observa-se que a remoção de turbidez apresentada pelas dosagens de cloreto férrico de 40, 60 e 80 mg/L se mostraram muito boas, sendo que todos os resultados ficaram acima de 78,6%, para toda a faixa de velocidades de flotação investigada.

Para as velocidades de flotação maiores ou iguais a 15 cm/min., a dosagem de 20 mg/L foi a que apresentou os piores resultados (remoção de 18,5%, com residual de 167,9 uT, a 95,5%, com residual de 9,3 uT), ficando abaixo inclusive do desempenho apresentado pelo ensaio onde não foi

utilizado cloreto férrico (remoção de 54,5%, com residual de 93,63 uT, a 88,0 %, com residual de 24,74 uT).

A dosagem de 80 mg/L foi, sem dúvida, a que apresentou os melhores resultados de remoção de turbidez (acima de 92,1% para todas as velocidades de flotação), mas é considerada uma dosagem muito alta, não havendo vantagem na sua utilização, já que foram obtidos resultados satisfatórios com apenas 40 mg/L de cloreto férrico (remoção de 78,6%, com residual de 44,04 uT, a 97,9%, com residual de 4,26 uT).

Quanto à vantagem em se utilizar cloreto férrico, vê-se que ela existe apenas se for utilizada dosagem maior que 20 mg/L, para a água residuária utilizada nesse trabalho e para quantidade de ar igual a 9 g ar/m³ afluente.

Através dos resultados mostrados na FIGURA 5.33 e TABELA 5.18, vê-se que os resultados de remoção de cor tiveram comportamento semelhante aos de remoção de turbidez, apresentando, porém, porcentagens de remoção menores. Desta vez, os resultados apresentados com a utilização das dosagens de 40, 60 e 80 mg/L de cloreto férrico foram parecidos até a velocidade de flotação de 15 cm/min. (74,3 a 90,4% para DCF = 40 mg/L; 84,2 a 92,3% para DCF = 60 mg/L e 90,8 a 93,3% para DCF = 80 mg/L); acima disto, apenas os resultados com 80 mg/L de cloreto ficaram acima de 79,6% de remoção, sendo que os resultados com 40 e 60 mg/L continuaram próximos, porém apresentando porcentagens de remoção menores.

Observando a FIGURA 5.34 e a TABELA 5.19, nota-se que as remoções de sólidos suspensos apresentadas pelas dosagens de cloreto férrico de 40, 60 e 80 mg/L foram excelentes, permanecendo todas acima de 96,3%. Vê-se também que o ensaio realizado sem a aplicação de cloreto férrico resultou numa remoção de SST ligeiramente maior (81,6%) do que a obtida no ensaio onde foi utilizada a dosagem de 20 mg/L (80,5%).

O desempenho do cloreto férrico quanto à remoção de DQO pode ser visto na FIGURA 5.35 e TABELA 5.19. Vê-se que as porcentagens de remoção aumentaram à medida em que foi aumentada a dosagem, sendo

que o processo de flotação por si só, sem a utilização de coagulante, já promoveu uma remoção de 69,9% (residual de 95,81 mg/L) da DQO bruta, com uma remoção máxima de 92,0% (residual de 25,40 mg/L) para uma dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L.

Nota-se que, para a remoção de DQO, o ensaio realizado com 20 mg/L de cloreto férrico se mostrou mais eficiente (75,7% de remoção) do que o ensaio realizado sem adição do produto químico (69,9% de remoção).

Mais uma vez pode-se concluir que o melhor resultado foi atingido com a dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L, porém deve-se salientear que, com a dosagem de 40 mg/L de cloreto férrico, as porcentagens de remoção de DQO e SST já se mostraram muito boas (80,8% e 96,3%, respectivamente).

Porém, como todos os ensaios eram realizados no mesmo dia, era preciso fazer a escolha da dosagem com a qual seriam executados os ensaios posteriores apenas comparando as leituras de turbidez. Portanto, a dosagem escolhida para o prosseguimento do trabalho foi a de 80 mg/L, sendo que 40 mg/L seria a melhor opção. Com base nessa constatação, decidiu-se testar novamente a dosagem de 40 mg/L em ensaios futuros (correspondentes ao item 4.9.2).

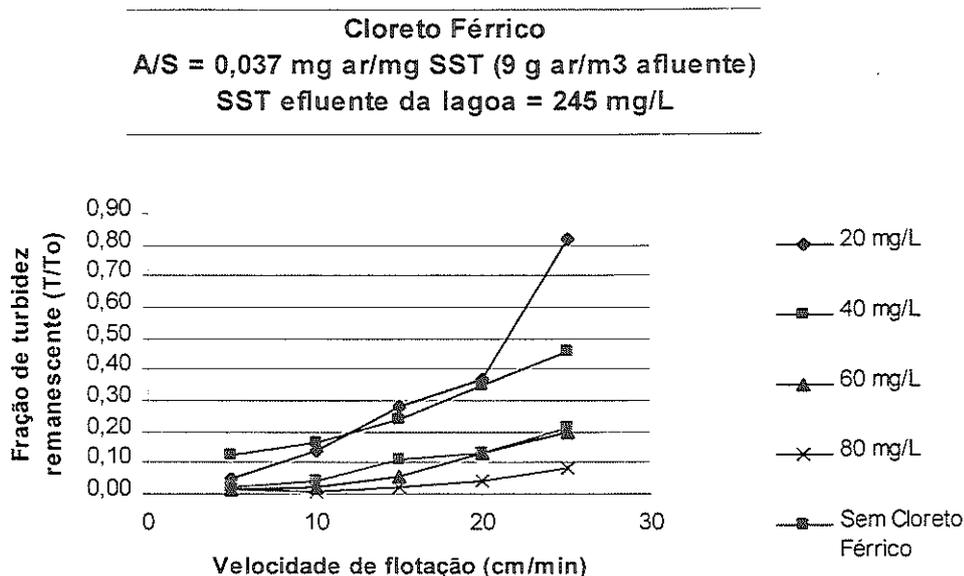


FIGURA 5.32 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 2ª bateria de ensaios (item 4.8.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 \text{ s}^{-1}$; $T_f = 15 \text{ min.}$; $G_f = 80 \text{ s}^{-1}$; $P_{sat} = 450 \pm 10 \text{ kPa}$; $A/S = 0,037 \text{ mg ar/mg SST (9 g ar/m}^3 \text{ afluente)}$, $R = 9\%$. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13

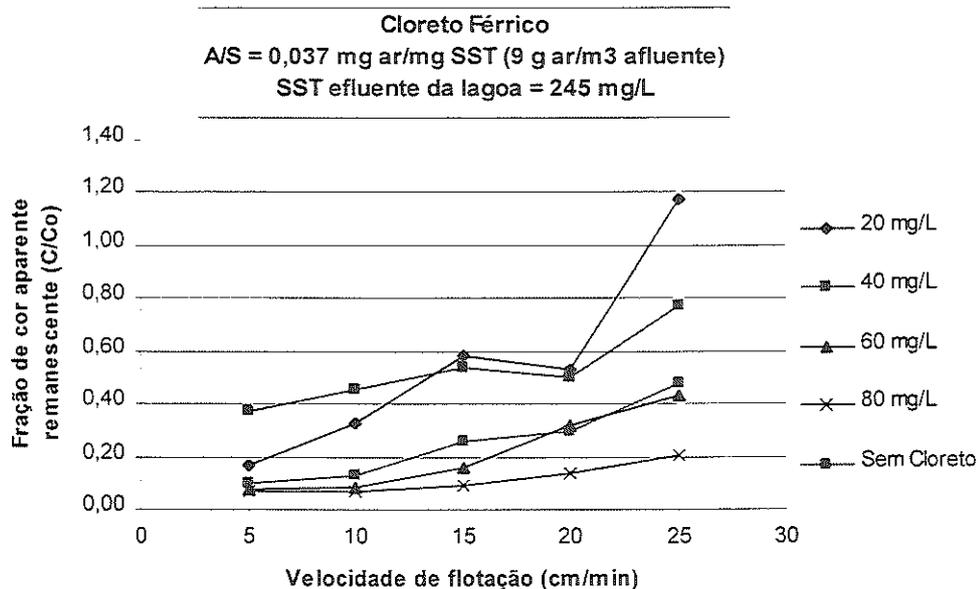


FIGURA 5.33 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 2ª bateria de ensaios (item 4.8.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 \text{ s}^{-1}$; $T_f = 15 \text{ min.}$; $G_f = 80 \text{ s}^{-1}$; $P_{sat} = 450 \pm 10 \text{ kPa}$; $A/S = 0,037 \text{ mg ar/mg SST (9 g ar/m}^3 \text{ afluente)}$, $R = 9\%$. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

Remoção de Sólidos Suspensos X Dosagem de Cloreto
A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente
SST efluente da lagoa = 245 mg/L

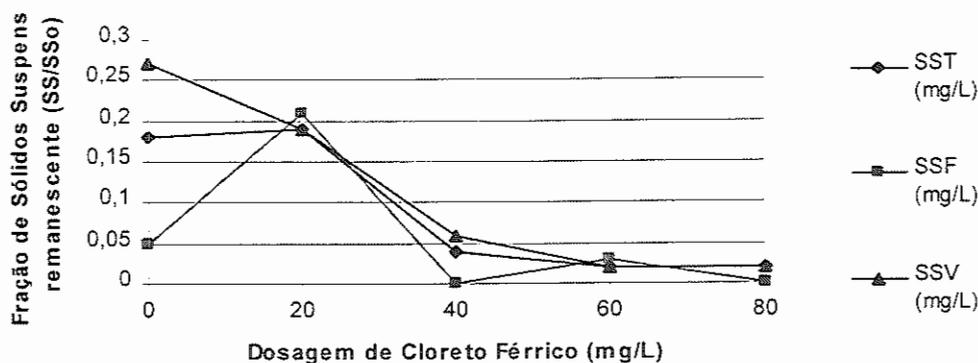


FIGURA 5.34 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 2ª bateria de ensaios (item 4.8.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 450 \pm 10 kPa$; $A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m^3 afluente)$, $R = 9\%$. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

Remoção de DQO bruta X Dosagem de Cloreto Férrico
A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente)
DQO bruta efluente da lagoa = 319 mg/L

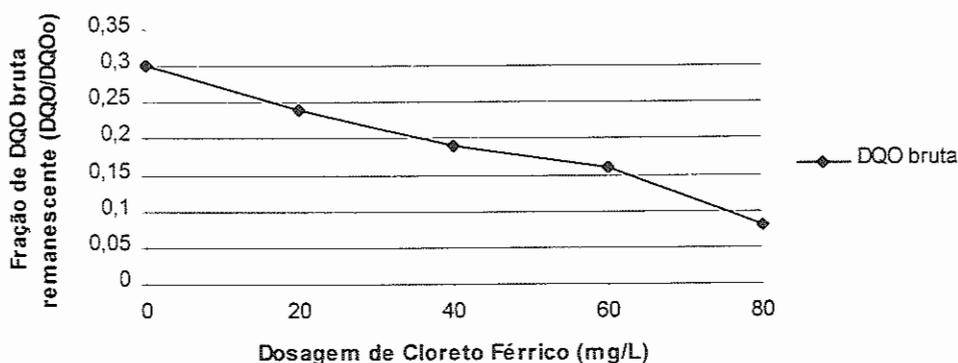


FIGURA 5.35 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 2ª bateria de ensaios (item 4.8.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 450 \pm 10 kPa$; $A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m^3 afluente)$, $R = 9\%$. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

TABELA 5.18 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às dosagens de cloreto férrico aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.2, utilizando o valor de A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluyente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.32 e 5.33).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 2 = 206 mg/L (ver TABELA 5.13).
Cor aparente da amostra do efluente Tipo 2 = 830 mg/L (ver TABELA 5.13).

	Dosagem de Cloreto Férrico (mg/L)				
	0	20	40	60	80
Remoção de turbidez (%)	75,9 (49,59)	72,0 (57,66)	89,0 (22,56)	94,7 (11,01)	98,1 (3,97)
Remoção de cor aparente (%)	46,6 (443,6)	41,8 (482,87)	74,3 (213,64)	84,2 (130,8)	90,2 (76,3)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC.

TABELA 5.19 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às dosagens de cloreto férrico aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.2, utilizando o valor de A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluyente), para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.34 e 5.35).

SST da amostra do efluente Tipo 2 = 245 mg/L (ver TABELA 5.13).
DQO bruta da amostra do efluente Tipo 2 = 319 mg/L (ver TABELA 5.13).

	Dosagem de Cloreto Férrico (mg/L)				
	0	20	40	60	80
Remoção de SST (%)	81,6 (45,05)	80,5 (47,69)	96,3 (9,08)	98,0 (4,84)	98,5 (3,72)
Remoção de DQO bruta (%)	69,9 (95,81)	75,7 (77,5)	80,8 (61,15)	84,4 (49,6)	92,0 (25,40)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

Os ensaios feitos com o polímero W 341 e com o cloreto férrico comparando as razões A/S de 0,03 e 0,037 mg ar/mg SST (7 e 9 g ar/m³ afluyente) tiveram o objetivo de determinar qual seria a quantidade de ar mais adequada a ser utilizada nos ensaios com a associação entre o coagulante (cloreto férrico) e o auxiliar de floculação/flotação (polímero).

Diferentemente dos resultados apresentados pelos ensaios onde se utilizou o polímero W 341, a FIGURA 5.36 e a TABELA 5.20, referentes às porcentagens de remoção de turbidez obtidas no ensaio com a aplicação de 80 mg/L de cloreto férrico, mostram resultados não muito diferentes para os dois valores de A/S até a velocidade de flotação de 15 cm/min. (81,9 a 98,3% para 7 g ar/m³ afluyente e 98,1 a 98,5% para 9 g ar/m³ afluyente); porém, os resultados fornecidos pela razão A/S de 0,03 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluyente), ou seja, R = 7%, pioraram extremamente para as velocidades de flotação acima de 20 cm/min. (24,9% com residual de 154,78 uT, para V_{flot} = 20 cm/min.). Portanto, a aplicação de apenas 7 g ar/m³ afluyente apresentou-se insuficiente para promover uma boa flotação.

No entanto, os resultados de remoção de turbidez para a dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L e A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluyente) - R = 9% foram excelentes (92,1 a 98,5%, para toda a faixa de velocidades de flotação investigada), mostrando que 2% a mais na razão de recirculação já foram suficientes para fornecer a quantidade de ar necessária para uma boa flotação.

Tal qual ocorreu nos ensaios com a aplicação do polímero W 341, também os resultados de remoção de cor aparente com o cloreto férrico corresponderam aos de turbidez, porém apresentando porcentagens de remoção mais baixas, principalmente para A/S de 0,03 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluyente) que, como pode ser visto na FIGURA 5.37, promoveu a remoção de cor apenas nas velocidades de flotação maiores ou iguais a 15 cm/min. Para A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluyente), os resultados de remoção foram menores que os alcançados para turbidez; porém, para todas as velocidades de flotação, se encontraram acima de 79,6%, o que pode ser considerado um bom resultado.

Quanto à remoção de sólidos suspensos (ver FIGURA 5.38 e TABELA 5.21), o ensaio onde foi utilizado o A/S de 0,037 mg ar./mg SST (9 g ar/m³ afluyente) apresentou resultados excelentes, removendo 98,5% (residual de 3,72 mg/L) de SST; já o ensaio onde foi utilizado o A/S de 0,03

mg ar/mg SST (7 g ar/m^3 afluente) apresentou remoção de SST de apenas 82,7% (residual de 42,38 mg/L). Esse pode ser considerado um valor baixo para a dosagem de 80 mg/L de cloreto férrico, o que é mais uma confirmação de que 7 g ar/m^3 afluente não foi uma quantidade de ar satisfatória para promover uma boa flotação para essa dosagem de cloreto férrico.

A FIGURA 5.39 também vem confirmar que 7 g ar/m^3 afluente não proporcionou bons resultados, pois a remoção de DQO bruta, para essa quantidade de ar, foi de 81,8% (residual de 58,0 mg/L), sendo que, com 9 g ar/m^3 afluente, houve uma remoção de DQO de 92,0% (residual de 25,4 mg/L). Portanto, para os ensaios a serem realizados com a associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, decidiu-se utilizar 9 g ar/m^3 afluente, devido à superioridade mostrada pelos seus resultados.

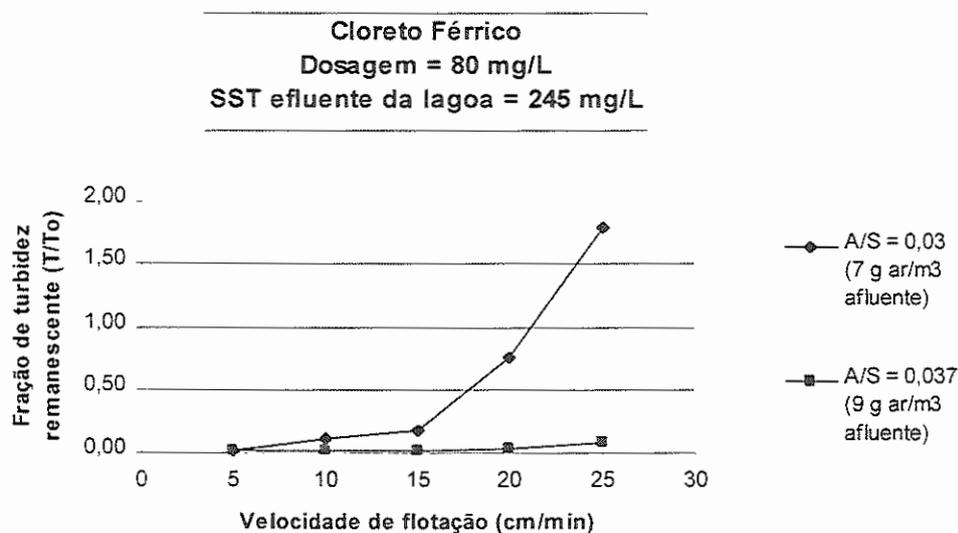


FIGURA 5.36 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S .

2ª parte da 2ª bateria de ensaios (item 4.8.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30\text{s}$; $G_{mr} = 800 \text{ s}^{-1}$; $T_f = 15 \text{ min.}$; $G_f = 80 \text{ s}^{-1}$; $P_{sat} = 450 \pm 10 \text{ kPa}$; Dosagem de cloreto férrico = 80 mg/L. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

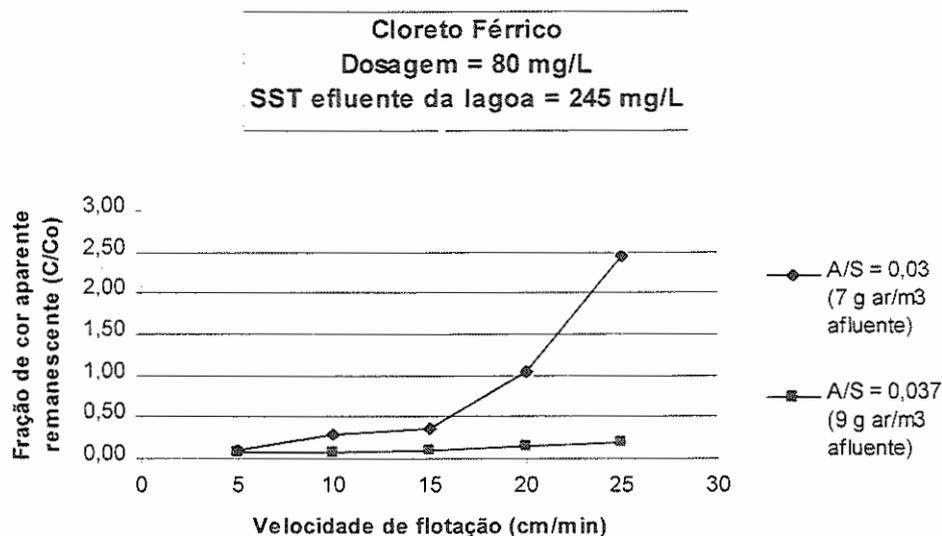


FIGURA 5.37 – Frações de cor aparente remanescente (C/Co) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 2ª bateria de ensaios (item 4.8.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 450 \pm 10 kPa$; Dosagem de cloreto férrico = 80 mg/L. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

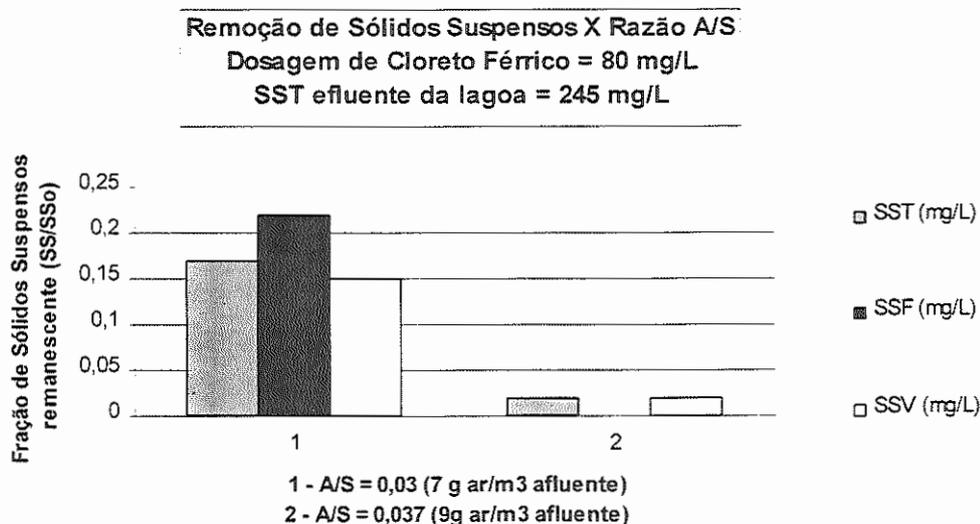


FIGURA 5.38 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 2ª bateria de ensaios (item 4.8.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 450 \pm 10 kPa$; Dosagem de cloreto férrico = 80 mg/L. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

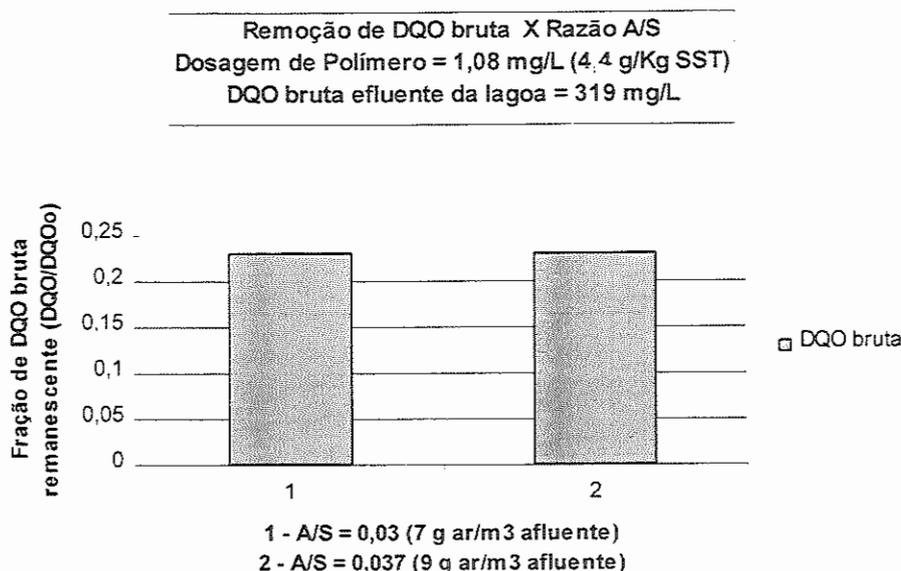


FIGURA 5.39 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO₀) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 2ª bateria de ensaios (item 4.8.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_{mr} = 30s; G_{mr} = 800 s⁻¹; T_f = 15 min.; G_f = 80 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; Dosagem de cloreto férrico = 80 mg/L. Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

TABELA 5.20 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.2, utilizando a dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.36 e 5.37).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 2 = 206 mg/L (ver TABELA 5.13).
 Cor aparente da amostra do efluente Tipo 2 = 830 mg/L (ver TABELA 5.13).

	Razão ar/sólidos (A/S), em mg ar/mg SST	
	0,03 (7 g ar/m ³ afluente)	0,037 (9 g ar/m ³ afluente)
Remoção de turbidez (%)	81,9 (37,39)	98,1 (3,98)
Remoção de cor aparente (%)	63,2 (305,52)	90,8 (76,3)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC.

TABELA 5.21 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.2, utilizando a dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L, para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.38 e 5.39).

SST da amostra do efluente Tipo 2 = 245 mg/L (ver TABELA 5.13).
DQO bruta da amostra do efluente Tipo 2 = 319 mg/L (ver TABELA 5.13).

	Razão ar/sólidos (A/S), em mg ar/mg SST	
	0,03 (7 g ar/m ³ afluente)	0,037 (9 g ar/m ³ afluente)
Remoção de SST (%)	82,7 (42,38)	98,5 (3,72)
Remoção de DQO bruta (%)	81,8 (58,0)	92,0 (25,4)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

5.4.3 Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 2, com a aplicação da associação entre o polímero W 341 e o cloreto férrico, variando a dosagem e a razão A/S

Nessa terceira bateria de ensaios de flotação foi utilizada uma associação entre o cloreto férrico (coagulante) e o polímero W 341 (auxiliar de floculação/flotação). Aplicou-se uma dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L, e foram testadas as seguintes dosagens do polímero W 341: 0,09; 0,18; 0,27; 0,36; 0,45 e 0,54 mg/L (0,37; 0,74; 1,11; 1,48; 2,22 e 2,96 g polímero/Kg SST). Os ensaios com essas dosagens foram feitos utilizando A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), escolhido através dos resultados dos ensaios referentes aos itens 5.4.1 e 5.4.2.

Observando a FIGURA 5.40 nota-se que, para velocidades de flotação menores ou iguais a 15 cm/min., o cloreto férrico (dosagem de 20 mg/L) associado a todas as dosagens de polímero testadas, com exceção de 0,09 mg/L (0,37 g/Kg SST), apresentou porcentagens de remoção de turbidez maiores que 88%, sendo que as dosagens que apresentaram os melhores resultados foram 0,18; 0,27; 0,36 e 0,54 mg/L (0,74; 1,11; 1,48 e

2,96 g/Kg SST). Porém, a partir da velocidade de flotação 15 cm/min., a associação do cloreto férrico (dosagem de 20 mg/L) com a dosagem de 0,45 mg/L (2,22 g/Kg SST) apresentou resultados piores (54,2 a 71,3% de remoção) do que os fornecidos pela dosagem de 0,09 mg/L (0,37g/Kg SST) (66,3 a 76,7% de remoção), chegando a se equiparar ao ensaio realizado sem o uso de coagulante (54,5 a 65,0% de remoção). Se houvesse ocorrido o mesmo para a dosagem de 0,54 mg/L (2,96 g/Kg SST), seria possível supor que tratam-se de dosagens muito altas, que poderiam ter causado a reestabilização das partículas; porém isso não ocorreu, pois esta apresentou resultados bons, semelhantes aos fornecidos pelas dosagens de polímero menores que 0,45 mg/L. Portanto, com base nos dados obtidos, não é possível explicação lógica para o comportamento anômalo da curva de flotação apresentada no ensaio com aplicação de 0,45 mg/L de polímero W 341 (associada à dosagem de 20 mg/L de cloreto férrico).

Nota-se que para 5 cm/min., todas as dosagens apresentaram porcentagens de remoção muito semelhantes, com exceção do ensaio realizado sem coagulante.

Levando-se em conta apenas a remoção de turbidez, a associação de 20 mg/L de cloreto férrico com a dosagem de 0,18 mg/L (0,74 g/Kg SST) de polímero foi considerada a mais adequada para a realização do ensaio de flotação empregando 9 g ar/m³ afluente, pois apresentou resultados muito semelhantes e até mesmo superiores a dosagens maiores que ela (remoção de 82,9 a 97,0% com dosagem de polímero (DP) de 0,18 mg/L; remoção de 79,8 a 97,5% com DP = 0,27 mg/L; remoção de 78,9 a 97,3% com DP = 0,36 mg/L; remoção de 54,2 a 96,4% com DP = 0,45 mg/L e remoção de 81,2 a 97,3% com DP = 0,54 mg/L).

Novamente os resultados de remoção de cor aparente acompanharam o comportamento apresentado na remoção de turbidez, porém apresentando porcentagens mais baixas de remoção, como pode ser visto pela FIGURA 5.41 e TABELA 5.22.

Também na remoção de cor a dosagem de polímero de 0,45 mg/L associada a 20 mg/L de cloreto férrico forneceu resultados não satisfatórios, como pode ser visto na FIGURA 5.41, ficando muito próximos aos valores apresentados pela associação do cloreto férrico à dosagem de polímero de 0,09 mg/L (remoção de cor de 33,7 a 85,8% para a dosagem de 0,09 mg/L e de 30,4 a 86,5% para a dosagem de 0,45 mg/L). Dessa vez, o ensaio realizado sem a utilização de coagulante forneceu resultados piores do que os apresentados por todos os outros ensaios (remoção de turbidez de 23,2 a 63,0%), até mesmo os que não tiveram um bom desempenho.

A associação de 20 mg/L de cloreto férrico com a dosagem de 0,18 mg/L (0,74 g/Kg SST) de polímero também foi considerada a mais adequada para a remoção de cor aparente, pois mais uma vez apresentou resultados muito semelhantes e até mesmo superiores a dosagens maiores que ela (remoção de 62,8 a 86,2% com dosagem de polímero de 0,18 mg/L; remoção de 55,5 a 86,9% com 0,27 mg/L; remoção de 55,5 a 86,1% com 0,36 mg/L; remoção de 30,4 a 86,5% com 0,45 mg/L e remoção de 59,9 a 87,5% com 0,54 mg/L).

Observando a FIGURA 5.42 e a TABELA 5.23, nota-se que os melhores resultados quanto à remoção de sólidos suspensos totais (SST) foram apresentados pela dosagem de 0,54 mg/L (remoção de SST de 95,8%). Porém os resultados apresentados pelas dosagens de 0,18; 0,36 e 0,45 mg/L (0,74; 1,48 e 2,22 g/Kg SST) também foram muito bons (remoções de SST de 91,1; 92,8 e 88,9%).

Os melhores resultados apresentados pelas associações de cloreto férrico com polímero W 341 quanto à remoção de DQO bruta, foram os relativos ao ensaio com aplicação das dosagens de 0,18 (85,8%), 0,27 (86,0%) e 0,36 (86,8%) mg/L (ver FIGURA 5.43 e TABELA 5.23).

Como pode ser visto nas FIGURAS 5.42 e 5.43 e na TABELA 5.23, a associação de 20 mg/L de cloreto férrico com a dosagem de polímero de 0,45 mg/L (2,22 g/Kg SST), apesar de ter resultado em porcentagens de remoção de turbidez e cor surpreendentemente ruins, para as maiores

velocidades de flotação, forneceu bons resultados de remoção de SST e DQO bruta, para velocidade de flotação de 10 cm/min.

Finalmente pode-se concluir que a associação de 20 mg/L de cloreto férrico com a dosagem de 0,18 mg/L (0,74 g/Kg SST) do polímero W 341 foi a mais adequada para a flotação nas condições adotadas (9 g ar/m³ afluente), pois apresentou ótimas remoções de todos os parâmetros analisados, apesar de tratar-se de uma das menores dosagens de polímero testadas nos ensaios do item 4.8.3.

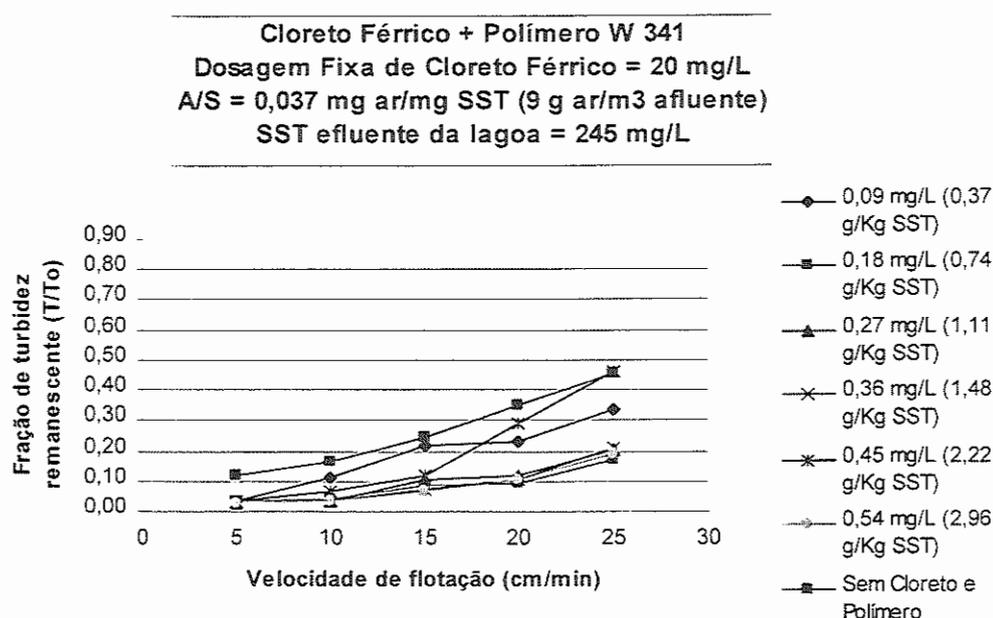


FIGURA 5.40 – Frações de turbidez remanescente (T/T₀) em função da velocidade de flotação, com uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico, para diferentes dosagens de polímero W 341.

3ª bateria de ensaios (item 4.8.3) realizados com o equipamento de Flotateste e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_{mr} = 30s; G_{mr} = 800 s⁻¹; T_f = 15 min.; G_f = 80 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; A/S = 0,037 mg ar/mg SST (R = 9%). Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

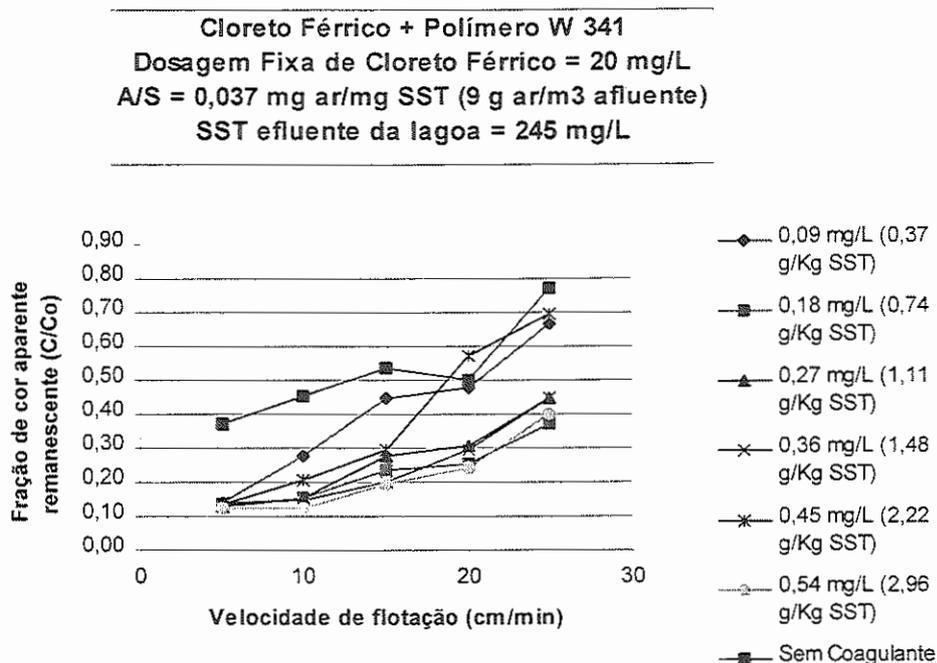


FIGURA 5.40 – Frações de cor aparente (C/C₀) em função da velocidade de flotação, com uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico, para diferentes dosagens de polímero W 341.

3ª bateria de ensaios (item 4.8.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_{mr} = 30s; G_{mr} = 800 s⁻¹; T_f = 15 min.; G_f = 80 s⁻¹; P_{sat} = 450 ± 10 kPa; A/S = 0,037 mg ar/mg SST (R = 9%). Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

TABELA 5.22 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às dosagens do polímero W 341 aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.3, utilizando a dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L e a razão A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.40 e 5.41).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 2 = 206 mg/L (ver TABELA 5.13).
 Cor aparente da amostra do efluente Tipo 2 = 830 mg/L (ver TABELA 5.13).

Dosagem de Cloreto Férrico	Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)	Remoção de turbidez (%)	Remoção de cor aparente (%)
20 mg/L	0	75,9 (49,59)	46,6 (443,63)
	0,09	78,5 (44,25)	55,3 (370,6)
	0,18	91,4 (17,66)	76,4 (196,2)
	0,27	89,2 (22,24)	72,2 (231,08)
	0,36	92,9 (14,72)	79,8 (167,86)
	0,45	88,0 (24,74)	70,7 (243,07)
	0,54	93,2 (13,95)	80,3 (163,5)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC.

Remoção de Sólidos Suspensos X Dosagem de Polímero
Dosagem Fixa de Cloreto Férrico = 20 mg/L
A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente)
SST efluente da lagoa = 245 mg/L

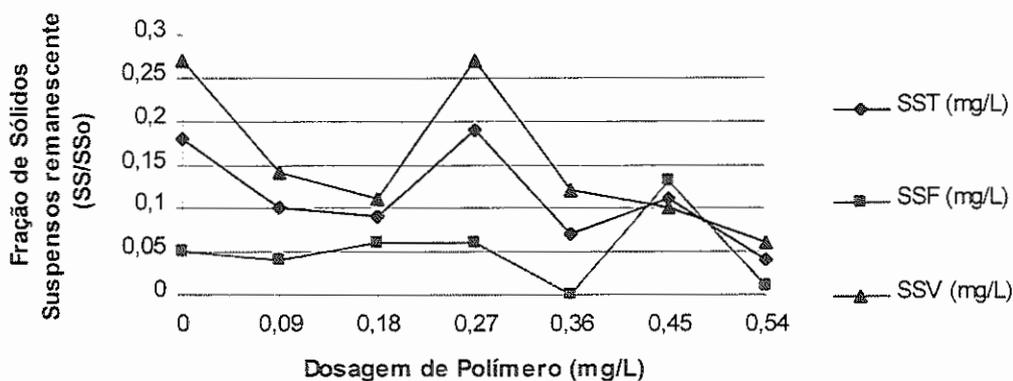


FIGURA 5.42 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS₀) em função da velocidade de flotação, com uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico, para diferentes dosagens de polímero W 341.

3ª bateria de ensaios (item 4.8.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 450 \pm 10 kPa$; $A/S = 0,037 mg ar/mg SST$ ($R = 9\%$). Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

Remoção de DQO bruta X Dosagem de Polímero
Dosagem Fixa de Cloreto Férrico = 20 mg/L
A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente)
DQO bruta efluente da lagoa = 319 mg/L

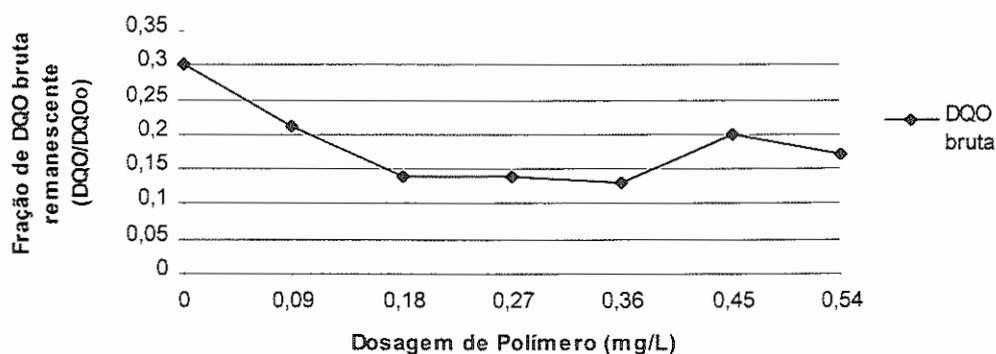


FIGURA 5.43 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO₀) em função da velocidade de flotação, com uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico, para diferentes dosagens de polímero W 341.

3ª bateria de ensaios (item 4.8.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 450 \pm 10 kPa$; $A/S = 0,037 mg ar/mg SST$ ($R = 9\%$). Características do efluente da lagoa (Tipo 2) – ver TABELA 5.13.

TABELA 5.23 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às dosagens do polímero W 341 aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.8.3, utilizando a dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L e a razão A/S de 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.42 e 5.43).

SST da amostra do efluente Tipo 2 = 245 mg/L (ver TABELA 5.13).
DQO bruta da amostra do efluente Tipo 2 = 319 mg/L (ver TABELA 5.13).

Dosagem de Cloreto Férrico	Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)	Remoção de SST (%)	Remoção DQO bruta (%)
20 mg/L	0	81,6 (47,69)	69,9 (95,81)
	0,09	89,9 (24,78)	78,6 (68,23)
	0,18	91,1 (21,8)	85,8 (45,24)
	0,27	80,9 (46,71)	86,0 (44,69)
	0,36	92,8 (17,71)	86,8 (42,07)
	0,45	88,9 (27,25)	80,5 (62,13)
	0,54	95,8 (10,38)	83,2 (53,52)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

5.4.4 Ensaios de clarificação por flotação com a aplicação do polímero W 341, de cloreto férrico e da associação entre eles, com apenas um par de valores de dosagem e A/S, para uma amostra mais concentrada da lagoa aerada (efluente Tipo 3)

Nessa quarta bateria de ensaios da terceira etapa do trabalho, foram feitos 3 ensaios de flotação, um com o polímero W 341, outro com o cloreto férrico e um terceiro com a associação entre eles.

Para o primeiro ensaio utilizou-se uma dosagem do polímero W 341 de 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST), semelhante à dosagem considerada mais adequada nos ensaios do item 5.4.1; para o ensaio realizado com o cloreto férrico, a dosagem utilizada foi de 80 mg/L, conforme os ensaios realizados no item 5.4.2; no terceiro ensaio, utilizou-se uma associação de 20 mg/L de cloreto férrico e 0,71 mg/L (1,17 g/kg SST) de polímero W 341. Para esse ensaio tencionava-se utilizar uma dosagem de polímero que estivesse dentro da faixa que apresentou os melhores resultados na bateria de

ensaios do item 5.4.3, ou seja, por volta de 0,18 a 0,36 mg/L (0,74 a 1,48 g/Kg SST) de polímero. Porém, dessa vez, devido à alta concentração de sólidos da suspensão (o efluente utilizado nesses ensaios foi o Tipo 3, com maior concentração de sólidos suspensos, apresentando turbidez de 407 uT e SST de 609 mg/L – ver TABELA 5.13), foi adotada a mesma dosagem de polímero da terceira bateria de ensaios, expressa em g polímero/Kg SST. Ou seja, a escolha da dosagem de polímero nessa quarta bateria de ensaios, não foi mais baseada na expressão “mg polímero/L de afluente”. Assim, a dosagem de 1,17 g/Kg SST permaneceu dentro da faixa que se queria investigar, ao contrário da dosagem em mg/L, que resultou num valor muito mais alto do que o desejado.

O valor de A/S utilizado em todos os ensaios foi de 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente) - R = 9%, devido aos bons resultados que essa quantidade de ar forneceu nos ensaios dos itens 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3.

A FIGURA 5.44 mostra que os desempenhos dos ensaios de flotação com a aplicação do polímero W 341, do cloreto férrico e da associação entre eles, quanto à remoção de turbidez, foram semelhantes até a velocidade de flotação de 20 cm/min. (faixa de remoção de 79,7 a 93,7 % com aplicação do polímero; 74,0 a 99,6% com aplicação do cloreto férrico e 73,5 a 98,5% com aplicação da associação), sendo que até 15 cm/min. o cloreto férrico apresentou resultados melhores e, acima de 20 cm/min., os melhores resultados foram atingidos com o uso do polímero.

Comparando as FIGURAS 5.24 (ensaios com efluente Tipo 2) e 5.44 (ensaios com efluente Tipo 3), vê-se que as remoções de turbidez obtidas com o polímero nos dois ensaios - nos quais se utilizou a mesma quantidade de ar e aproximadamente a mesma dosagem de polímero - foram bem semelhantes, independente do fato do efluente Tipo 3 possuir maior concentração de sólidos suspensos quando comparado ao efluente Tipo 2.

O que se pode concluir a partir do desempenho do polímero no ensaio representado pela FIGURA 5.44 e TABELA 5.24, é que a quantidade

de ar inserida no processo, empregando-se uma razão de recirculação de apenas 9% (em volume), foi suficiente para promover a flotação.

Devido à alta concentração de sólidos na suspensão neste caso, apesar de ter sido empregada a mesma quantidade de ar dos ensaios anteriores (9 g ar/m³ afluente), a razão A/S voltou a ser um parâmetro adequado para o monitoramento do processo, se encontrando na faixa recomendada por METCALF & EDDY (1991) (0,005 a 0,06 mg ar/mg SST).

Pode-se ver também na FIGURA 5.44 que o desempenho da flotação para as três situações (com aplicação de polímero, cloreto férrico e associação de cloreto férrico e polímero) foi muito semelhante até a velocidade de flotação de 20 cm/min., sendo que o ensaio com aplicação de polímero apresentou remoção de turbidez de 79,7 a 93,7%; com aplicação de cloreto férrico removeu-se de 74,0 a 99,6% e com o emprego da associação, obteve-se remoção de turbidez de 73,5 a 98,5%. Porém, o desempenho dos ensaios onde foi aplicado o cloreto férrico e a associação de cloreto férrico e polímero piorou muito para $V_{flot} = 25$ cm/min, com remoção de turbidez de apenas 26,1% para o cloreto férrico e 40,6% para a associação, sendo que o ensaio onde foi aplicado o polímero isoladamente apresentou remoção de 74,9%.

Comparando a porcentagem de remoção de turbidez para $V_{flot} = 25$ cm/min., obtida com a aplicação do cloreto férrico no ensaio realizado com o efluente Tipo 2 (item 5.4.2, ver FIGURA 5.36), vê-se que foi muito maior (remoção de 92,1%) do que a obtida no ensaio realizado com o efluente Tipo 3 (remoção de 26,1%), mesmo tendo sido utilizadas a mesma dosagem de cloreto férrico e a mesma quantidade de ar (9 g ar/m³ afluente).

Isso leva a crer que a quantidade de ar empregada no ensaio com efluente Tipo 3 deveria ser maior, possivelmente ultrapassando a faixa utilizada para flotação de águas de abastecimento (6 a 12 g ar/m³ afluente). Considerando novamente o A/S como um parâmetro de controle, vê-se que, dentro da faixa de A/S normalmente utilizados, uma razão ar/sólidos de 0,015 mg ar/mg SST pode ser considerada relativamente baixa, quando se

pretende operar com velocidades de flotação bastante elevadas (acima de 15 cm/min.).

Observando a FIGURA 5.45 e a TABELA 5.25, nota-se que as porcentagens de remoção de sólidos suspensos para os três ensaios foram muito boas, principalmente naquele onde foi aplicado o cloreto férrico isoladamente (remoção de SST de 95,5%) e no ensaio onde foi utilizada a associação entre cloreto férrico e polímero (remoção de SST de 95,2%).

Quanto à remoção de DQO bruta, mostrada pela FIGURA 5.46 e pela TABELA 5.25, os três ensaios apresentaram um bom desempenho, sendo que o cloreto férrico atingiu a maior porcentagem de remoção (98,6% com residual de 10,68 mg/L).

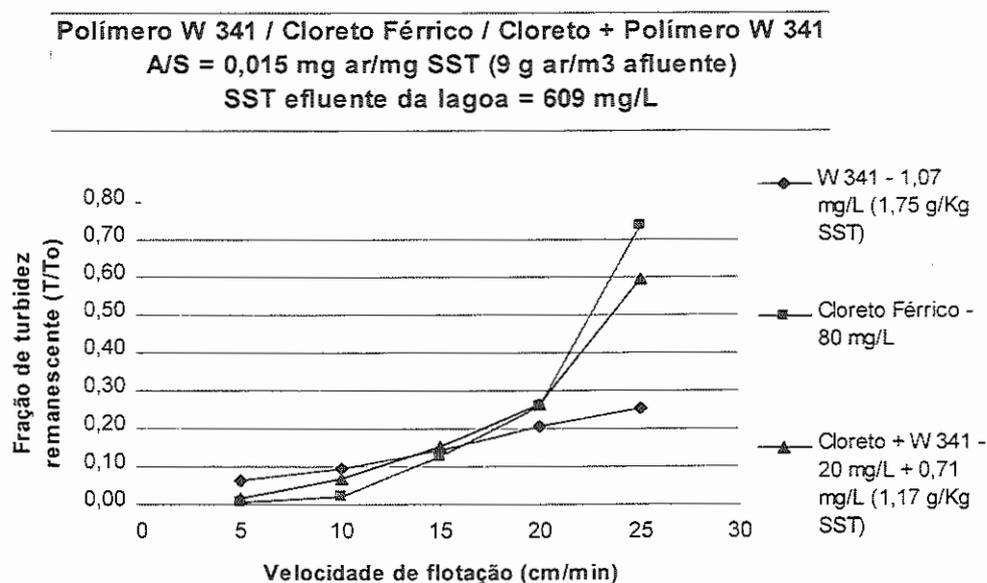


FIGURA 5.44 – Frações de turbidez remanescente (T/T₀) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) - 1º ensaio; uma dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L - 2º ensaio e uma dosagem de cloreto férrico de 20 mg/L + 0,71 mg/L (1,17 g/Kg SST) de polímero W 341 - 3º ensaio.

4ª bateria de ensaios (item 4.8.4) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE – Piracicamirim (Tipo 2) 1º ensaio: ; T_f = 1 min.; G_f = 100 s⁻¹; 2º e 3º ensaios: T_{mr} = 30s; G_{mr} = 800 s⁻¹; T_f = 15 min.; G_f = 80 s⁻¹; Parâmetros fixos para todos os ensaios: P_{sat} = 450 ± 10 kPa; A/S = 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), R = 9%. Características do efluente Tipo 3 – ver TABELA 5.13.

TABELA 5.24 – Porcentagens de remoção de turbidez, correspondentes os ensaios realizados com 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) de polímero W 341, com 80 mg/L de cloreto férrico e com a associação de 20 mg/L de cloreto férrico a 0,71 mg/L (1,07 g/Kg SST) de polímero W 341, utilizando a razão A/S de 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos da FIGURA 5.44).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 3 = 407 mg/L (ver TABELA 5.13).

	Remoção de turbidez (%)
Polímero W 341 (1,07 mg/L)	85,9 (57,44)
Cloreto férrico (80 mg/L)	87,1 (52,32)
Cloreto férrico + Polímero W 341 (20 mg/L + 0,71 mg/L)	84,8 (61,69)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez residual em uT.

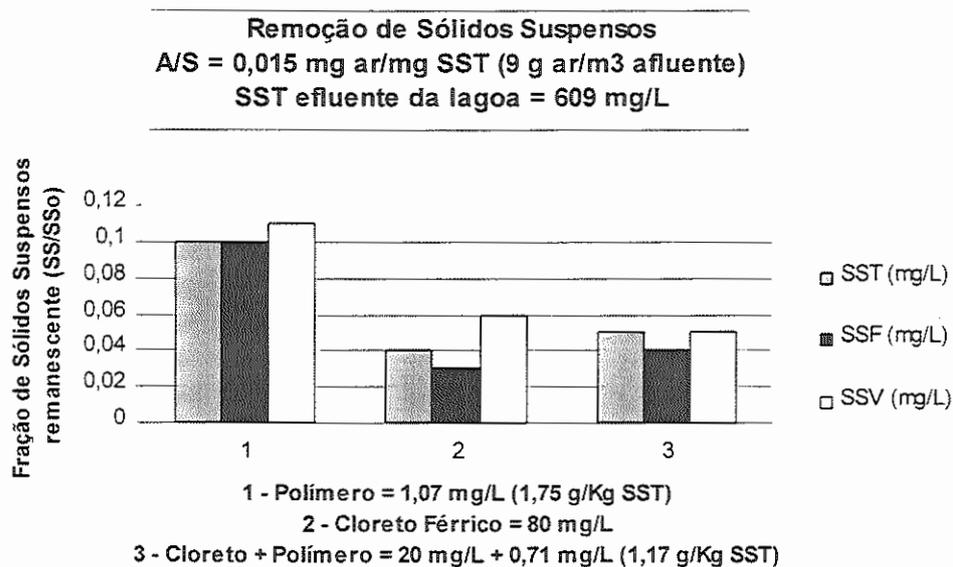


FIGURA 5.45 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) - 1º ensaio; uma dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L - 2º ensaio e uma dosagem de cloreto férrico de 20 mg/L + 0,71 mg/L (1,17 g/Kg SST) de polímero W 341 - 3º ensaio.

4ª bateria de ensaios (item 4.8.4) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE – Piracicamirim (Tipo 2). 1º ensaio: ; Tf = 1 min.; Gf = 100 s⁻¹; 2º e 3º ensaios: Tmr = 30s; Gmr = 800 s⁻¹; Tf = 15 min.; Gf = 80 s⁻¹; Parâmetros fixos para todos os ensaios: P_{sat} = 450 ± 10 kPa; A/S = 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), R = 9%. Características do efluente da lagoa Tipo 3 – ver TABELA 5.13.

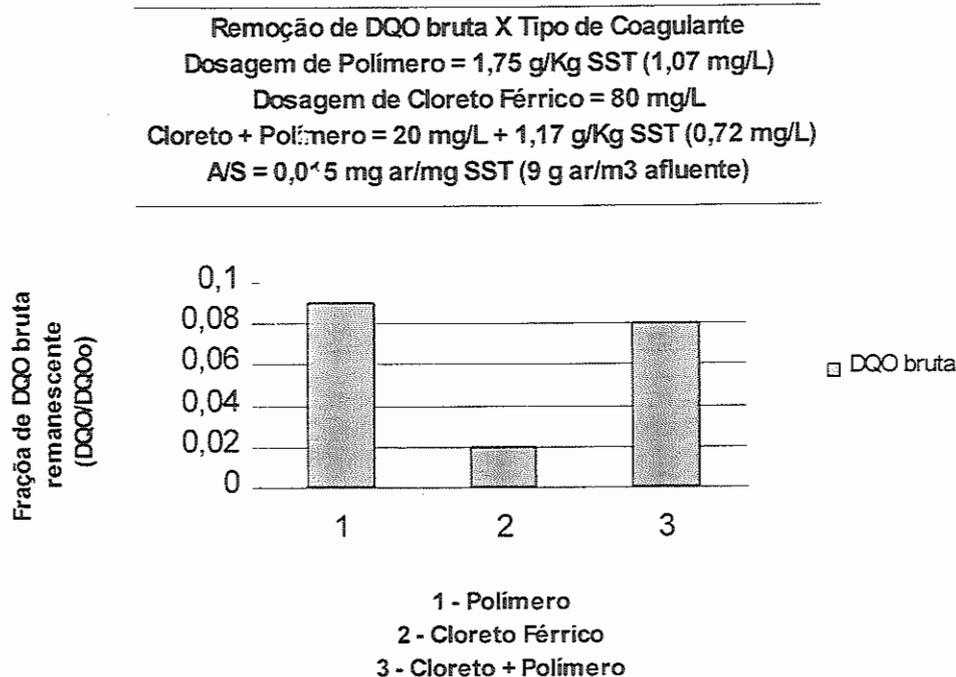


FIGURA 5.46 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO₀) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de polímero W 341 de 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) - 1º ensaio, uma dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L - 2º ensaio e uma dosagem de cloreto férrico de 20 mg/L + 0,71 mg/L (1,17 g/Kg SST) de polímero W 341 - 3º ensaio.

4ª bateria de ensaios (item 4.8.4) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. 1º ensaio: $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; 2º e 3º ensaios: $T_{mr} = 30$ s; $G_{mr} = 800$ s⁻¹; $T_f = 15$ min.; $G_f = 80$ s⁻¹; Parâmetros fixos para todos os ensaios: $P_{sat} = 450 \pm 10$ kPa; A/S = 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), R = 9%. Características do efluente da lagoa Tipo 3 – ver TABELA 5.13.

TABELA 5.25 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes os ensaios realizados com 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) de polímero W 341, com 80 mg/L de cloreto férrico e com a associação de 20 mg/L de cloreto férrico a 0,71 mg/L (1,07 g/Kg SST) de polímero W 341, utilizando a razão A/S de 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente), para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.45 e 5.46).

SST da amostra do efluente Tipo 3 = 609 mg/L (ver TABELA 5.13).
 DQO bruta da amostra do efluente Tipo 3 = 650 mg/L (ver TABELA 5.13).

	Remoção de SST (%)	Remoção de DQO bruta (%)
Polímero W 341 (1,07 mg/L)	89,8 (62,24)	90,9 (59,35)
Cloreto férrico (80 mg/L)	95,5 (27,25)	98,6 (10,68)
Cloreto férrico + Polímero W 341 (20 mg/L + 0,71 mg/L)	95,2 (29,58)	92,1 (51,67)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

Com amostras correspondentes aos ensaios do item 5.4.4 foram feitas determinações de NTK, N-NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- e fósforo total bruto e filtrado, além de turbidez, DQO bruta e sólidos suspensos totais, que já haviam sido previamente determinados e com esses resultados, foi calculada a eficiência do processo de flotação em relação ao efluente da lagoa aerada Tipo 3 (com base nos dados da TABELA 5.13), o qual foi utilizado como amostra a ser flotada. Esses resultados podem ser vistos na TABELA 5.26.

TABELA 5.26 – Eficiência do processo de flotação para os três ensaios correspondentes ao item 5.4.4, da terceira etapa do trabalho. Todas as porcentagens de remoção foram calculadas com base no efluente da lagoa aerada (Tipo 3). Turbidez = 407 uT; DQO bruta = 650 mg/L; SST = 609 mg/L; NTK = 79,96 mg/L; N-NH_4^+ = 31,71 mg/L; NO_3^- = 0,38 mg/L; NO_2^- = 0 mg/L; PO_4^{3+} am. bruta = 21,14 mg/L; PO_4^{3+} am. filtrada = 12,6 mg/L.

Parâmetro	Polímero W 341 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST) e A/S = 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente)	Cloreto Férrico 80 mg/L e A/S = 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente)	Cloreto Férrico + Polímero W 341 20 mg/L + 0,71 mg/L (1,17 g/Kg SST) e A/S = 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente)
Eficiência de Remoção (%) / Concentração Residual			
Turbidez (%/uT)	85,9 (57,44)	87,1 (52,32)	84,8 (61,69)
DQO bruta (%/mg/L)	90,9 (59,35)	98,6 (10,68)	92,1 (51,67)
SST (%/mg/L)	89,8 (62,24)	95,5 (27,25)	95,2 (29,58)
NTK (%/mg/L)	39,3 (48,60)	58,1 (33,50)	66,5 (26,80)
N-NH_4^+ (%/mg/L)	5,7 (29,90)	3,3 (30,70)	* (32,40)
NO_3^- (mg/L)	(0,13)	(0,05)	(0,13)
NO_2^- (mg/L)	-	-	-
PO_4^{3+} amostra bruta (%/mg/L)	26,3 (15,60)	92,3 (1,27)	62,2 (5,40)
PO_4^{3+} amostra filtrada (%/mg/L)	7,9 (11,60)	> 99,9 (0)	74,1 (2,76)

* Houve aumento do valor apresentado pela amostra da lagoa.

Obs.: 1) As porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente correspondem à amostra coletada em $V_{\text{flot}} = 15$ cm/min.;

2) As porcentagens de remoção de todos os outros parâmetros foram calculadas com base na amostra coletada em $V_{\text{flot}} = 10$ cm/min.;

Analisando os resultados apresentados pela TABELA 5.26, vê-se que a quantidade de ar investigada nesses ensaios ($A/S = 0,015$ mg ar/mg SST, 9 g ar/m³ afluente) foi satisfatória para o processo de flotação, para as dosagens utilizadas, quando se leva em conta a remoção de turbidez, DQO bruta e SST, pois as porcentagens de remoção desses parâmetros ficaram todas acima de 80%. Levando-se em conta apenas esses parâmetros, o melhor desempenho foi apresentado pelo ensaio onde se aplicou o cloreto férrico isoladamente (87,1% de remoção de turbidez, 98,6% de DQO e 95,5% de SST); porém este forneceu resultados apenas um pouco melhores do que os obtidos nos ensaios onde se utilizou o polímero W 341 isoladamente (85,9% de remoção de turbidez, 90,9% de DQO e 89,8% de SST) e a associação de cloreto férrico e polímero (84,8% de remoção de turbidez, 92,1% de DQO e 95,2% de SST).

Quando se analisa a remoção de NTK obtida por vários autores, vê-se que a flotação não costuma fornecer resultados muito bons. Como visto no item 3.5, MENNEL *et al.*, (1974), no tratamento por flotação de um efluente primário com a aplicação de cal, com a intenção de promover o "stripping" da amônia, obtiveram remoção de NTK de apenas 30 a 54%; KROFTA *et al.*, (1995), estudando o processo de flotação em escala piloto no tratamento de águas residuárias municipais, também removeram de 30 a 55% do NTK; CAMPOS *et al.*, (1996), em seus experimentos tratando o efluente de reator anaeróbico por flotação, promoveram a remoção de 49% do NTK; REALI *et al.*, (1998) alcançaram remoção de NTK de apenas 31%, também estudando a flotação de efluentes de reatores anaeróbios e, por fim, PENETRA *et al.*, (1998), para 20% (em volume) de recirculação, na flotação do efluente de um UASB, obteve apenas 24,3% de remoção de NTK. Comparando esses resultados aos obtidos nesses ensaios, observa-se que a associação do cloreto férrico com o polímero apresentou remoção de 66,5%, o que pode ser considerado um bom resultado.

Vê-se também, através dos resultados da TABELA 5.26, que a remoção de fosfato total não foi satisfatória no ensaio onde foi aplicada a

associação do cloreto férrico com o polímero (62,2% de remoção para amostra não filtrada e 74,1% para amostra filtrada), e apresentou resultados marginais no ensaio onde foi utilizado o polímero isoladamente (26,3% de remoção para amostra não filtrada e 7,9% para amostra filtrada) . Isso já era esperado, pois sabe-se que a precipitação do fosfato é mais efetiva com a utilização de sais metálicos. Apesar disso, nota-se que a remoção de fosfato apresentada pela associação de 20 mg/L de cloreto férrico a 0,71 mg/L de polímero W 341 não foi tão boa quanto a apresentada pelo ensaio onde se aplicou 80 mg/L de cloreto férrico, o que faz crer que 20 mg/L é uma dosagem muito baixa para propiciar a remoção do fosfato através da sua precipitação.

CAMPOS *et al.*, (1996), realizando o tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios, obtiveram uma remoção de fosfato total de 84% para a dosagem de cal hidratada de 50 mg/L associada à dosagem de 100 mg/L de cloreto férrico, com R = 20% (em volume). REALI *et al.*, (1998), estudando a influência da floculação na flotação de efluentes de reatores anaeróbios (UASB), com aplicação de dosagem de cloreto férrico igual a 65 mg/L, G_f de $80s^{-1}$ e T_f entre 15 e 25 min., obtiveram remoção de fosfato total igual a 96%. PENETRA *et al.*, (1998), estudando a influência da quantidade de ar na flotação de efluentes de reatores anaeróbios (UASB), para dosagem de cloreto férrico igual a 65 mg/L e R = 20% (em volume), obtiveram remoção de fosfato total de 95,4%. Comparando esses resultados aos apresentados na TABELA 5.26, confirma-se que é possível obter elevadas porcentagens de remoção de fosfato total quando se utiliza o cloreto férrico como coagulante.

5.5 Quarta etapa – Ensaio de clarificação por flotação com a aplicação do polímero W 341, de cloreto férrico e de uma associação entre eles, e investigação da dosagem e razão ar/sólidos (A/S)

O objetivo dessa quarta etapa foi testar novamente dosagens e razões ar/sólidos (A/S) para o polímero W 341, para o cloreto férrico e para a associação do cloreto férrico e polímero.

Como os ensaios realizados nas etapas anteriores mostraram que não havia correlação entre SST e turbidez e estavam sendo utilizadas dosagens de polímero e razões A/S diferentes das que se queria estudar, foi testada uma nova correlação, utilizando agora pares de valores de SST e turbidez obtidos a partir dos resultados dos ensaios de flotação referentes aos itens anteriores do presente trabalho.

A FIGURA 5.47 mostra a nova correlação entre turbidez e sólidos suspensos totais (SST). Como se pode ver, esta foi elaborada com poucos pares de valores, pois uma análise dos resultados obtidos nos ensaios dos itens anteriores mostrou que os valores de turbidez e sólidos suspensos também não apresentavam boa correlação.

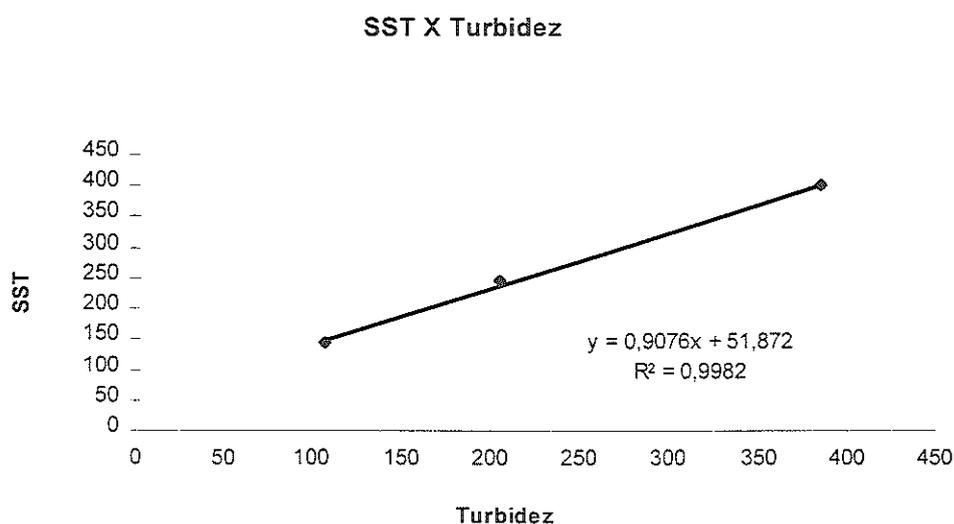


FIGURA 5.47 – Nova correlação entre turbidez e SST.

A quarta etapa do trabalho foi dividida em três baterias de ensaios, cujos resultados são apresentados nos itens 5.5.1, 5.5.2 e 5.5.3. A caracterização do efluente da lagoa aerada, utilizado nos ensaios de flotação correspondentes a esses itens, pode ser vista TABELA 5.27. Nesses ensaios também foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento público na câmara de saturação; assim, em todos os cálculos, foi considerada a diluição.

Para essa etapa do trabalho foi utilizada pressão de saturação de 400 kPa.

TABELA 5.27 – Caracterização das amostras do efluente concentrado da lagoa aerada utilizado nos ensaios de flotação correspondentes aos itens 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3.

	Efluente da lagoa Tipo 4 (15/12/99) (ensaios dos itens 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3)
T (°C)	25,3
PH	7,14
Turbidez (uT)	293
Cor Aparente (uC)	1705
DQO bruta (mg/L)	469
SST (mg/L)	382,5
SSF (mg/L)	145
SSV (mg/L)	237,5
P-PO ₄ ³⁺ amostra bruta (mg/L)	17,08
P-PO ₄ ³⁺ amostra filtrada (mg/L)	5,54
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	20,24
NTK (mg/L)	42,73
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0
Sulfato (mg/L)	34,0
Sulfeto (mg/L)	0,018

5.5.1 Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 4, com a aplicação do polímero W 341, variando a dosagem e a razão A/S

Na 1ª parte da primeira bateria de ensaios do item 5.5.1 testou-se o polímero W 341 para as dosagens de 0,32; 0,64 e 0,96 mg/L (0,83; 1,66 e 2,49 g polímero/Kg SST), utilizando razão ar/sólidos (A/S) de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente). Na 2ª parte, com a dosagem de 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST), que apresentou os melhores resultados na 1ª parte, foram feitos novos ensaios com os valores de A/S de 0,012; 0,017; 0,021 e 0,025 mg ar/mg SST (5, 7, 9 e 11 g ar/m³ afluente).

Resolveu-se testar a dosagem de polímero de 0,64 mg/L e outras duas dosagens, uma acima (DP = 0,96 mg/L) e outra abaixo desta (DP = 0,32 mg/L), devido aos resultados satisfatórios que uma dosagem muito semelhante a esta (0,54 mg/L) havia fornecido nos ensaios de flotação do item 5.4.1. Quanto à quantidade de ar, decidiu-se testar novamente 7 g ar/m³ afluente pela pequena diferença apresentada pelos resultados fornecidos por ela nos ensaios do item 5.4.1, quando comparada a 9 g ar/m³ afluente.

Nessa etapa foi utilizada outra amostra do efluente da lagoa aerada, com concentração de SST igual a 382,5 mg/L.

Observando a FIGURA 5.48 e a TABELA 5.28 nota-se que, até a velocidade de flotação de 15 cm/min., os ensaios realizados com 7 g ar/m³ afluente e aplicação das dosagens de polímero de 0,32 e 0,96 mg/L (0,83 e 2,49 g/Kg SST) apresentaram resultados muito semelhantes (80,3 a 87,7% de remoção com 0,32 mg/L e 83,3 a 91,4% com 0,96 mg/L). Mas isso não se manteve até o final do ensaio, já que os resultados para DP = 0,32 mg/L (0,83 g/Kg SST) pioraram a partir de 20 cm/min. (63,1 a 67,7% de remoção com 0,32 mg/L e 75,7 a 78,8% com 0,96 mg/L).

A dosagem de polímero de 0,64 mg/L (1,66 g/Kg SST), ao contrário do que se poderia esperar, apresentou resultados piores dos que os

atingidos com 0,32 mg/L (0,83 g/Kg SST) (a faixa de remoção com 0,64 mg/L de polímero foi de 46,7 a 86,8%, para todas as velocidades de flotação investigadas). Seria aconselhável realizar outros ensaios de flotação com um maior número de dosagens variando entre 0,32 e 0,96 mg/L, para determinar se a piora na eficiência observada no ensaio com aplicação de DP = 0,64 mg/L deveu-se ou não a um possível erro experimental. Comparando esses resultados aos obtidos no ensaio do item 5.4.1, com aplicação da dosagem de polímero de 0,54 mg/L, onde se obteve uma faixa de remoção de turbidez de 71,9 a 89,8%, porém com 9 g ar/m³ afluyente, vê-se que um pequeno aumento na quantidade de ar pode proporcionar melhora nos resultados, principalmente nas maiores velocidades de flotação.

Quanto à remoção de cor (ver FIGURA 5.49 e TABELA 5.28), nota-se que, para os ensaios do item 5.5.1, a diferença entre os resultados de remoção de cor não é tão grande quando comparados aos de remoção de turbidez, como ocorreu nas etapas anteriores do trabalho.

Vê-se na FIGURA 5.49 que a superioridade dos resultados atingidos nos ensaios de flotação com aplicação da dosagem de polímero de 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST) é mais clara (faixa de remoção de 68,8 a 85,4%), sendo que as dosagens de 0,32 e 0,64 mg/L (0,83 e 1,66 g/Kg SST) apresentaram resultados semelhantes até a velocidade de flotação de 20 cm/min. (remoção de cor de 61,7 a 81,8% para 0,32 mg/L e de 67,7 a 80,9% para 0,64 mg/L).

Quando se compara os resultados de remoção de cor fornecidos pelo ensaio com dosagem de polímero de 0,64 mg/L e 7% de recirculação (remoção de 41,0 a 80,9%) aos apresentados pela FIGURA 5.15 (dosagem de 0,564 mg/L do polímero W 341, com R = 40% em volume, ensaio do item 4.7.1), vê-se que não há necessidade de se utilizar uma recirculação de 40% pois, com ela, obteve-se remoção de cor na faixa de 66,0 a 78,6%.

Na FIGURA 5.50 e na TABELA 5.29 é mostrada a remoção de sólidos suspensos, obtida através do processo de flotação empregando o

polímero W341. Nota-se que a maior remoção de SST foi atingida com a dosagem de polímero de 0,32 mg/L (87,1%, com residual de 49,48 mg/L), sendo que, com 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST), o triplo da dosagem, foi obtido resultado bastante semelhante (remoção de SST de 86,4%, com residual de 52,16 mg/L).

A dosagem de polímero de 0,64 mg/L (1,66 g/Kg SST), da mesma forma que na remoção de turbidez, forneceu resultados piores que os das outras dosagens (67,1% de remoção de SST, com residual de 125,73 mg/L). Comparando a porcentagem de remoção de SST obtida nesse ensaio com a fornecida pelo ensaio do item 5.4.1 (remoção de SST de 89,8%, com residual de 25,06 mg/L), onde foi utilizada dosagem de polímero de 0,54 mg/L, com aplicação de 9 g ar/m³ afluente, vê-se que um pequeno aumento na quantidade de ar novamente produziu uma grande diferença nos resultados.

Quanto à remoção de DQO bruta, a dosagem de 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST) apresentou melhor resultado (84,1% de remoção, com residual de 74,69 mg/L); porém, não foi muito maior do que o resultado apresentado pela dosagem de 0,32 mg/L (0,83 g/Kg SST) (77,7% de remoção, com residual de 104,43 mg/L), como pode ser visto na FIGURA 5.51 e TABELA 5.29.

No ensaio de flotação realizado com 0,96 mg/L de polímero foram obtidos resultados muito semelhantes aos do ensaio do item 5.4.1 (ver TABELAS 5.16 e 5.17), realizado com 1,08 mg/L de polímero e a mesma quantidade de ar (7 g ar/m³ afluente, R = 7% em volume), ou seja, para V_{flot} = 15 cm/min. obteve-se remoção de turbidez de 85,2% para DP = 1,08 mg/L e 83,3% para DP = 0,96 mg/L; remoção de SST de 85,8% com DP = 1,08 mg/L e 86,4% com DP = 0,96 mg/L e remoção de DQO de 77,3% com DP = 1,08 mg/L e 84,1% com DP = 0,96 mg/L de polímero. A remoção de cor aparente nos ensaios do item 5.5.1 foi melhor pois, para V_{flot} = 15 cm/min., com DP = 0,96 mg/L removeu-se de 78,9%, sendo que com DP = 1,08 mg/L houve remoção de cor de apenas 62,9%.

Como não era possível obter resultados imediatos de sólidos suspensos e DQO para que fosse feita uma melhor escolha da dosagem de polímero a ser utilizada nos ensaios posteriores para teste da razão ar/sólidos, foi escolhida a dosagem de 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST), com base novamente nas leituras de turbidez. A dosagem de 0,32 mg/L (0,83 g/Kg SST) teria sido uma melhor escolha, pois também apresentou resultados muito bons.

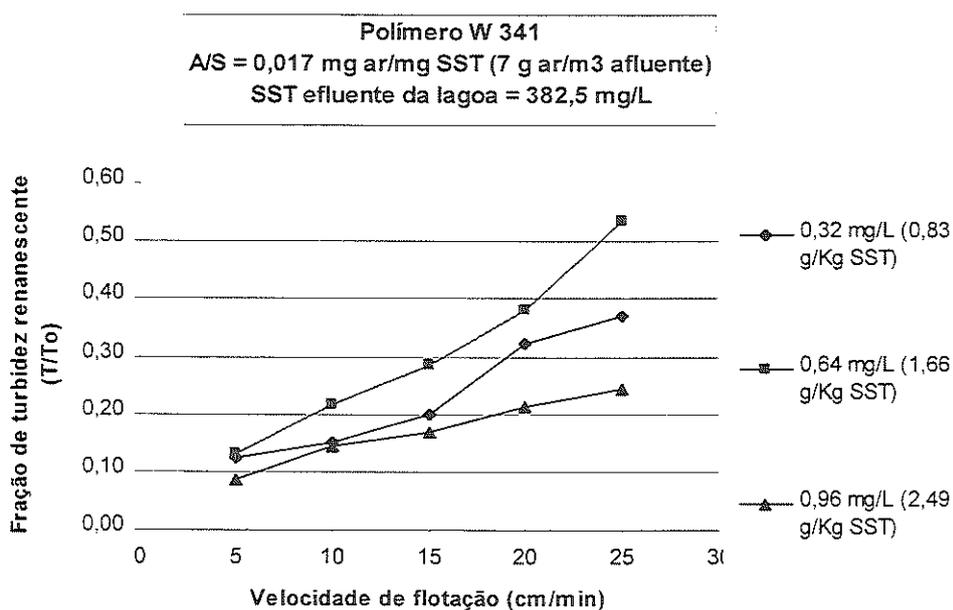


FIGURA 5.48 – Frações de turbidez remanescente (T/T₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.9.1) realizados com o equipamento de Flotateste e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_f = 1 min.; G_f = 100 s⁻¹; P_{sat} = 400 ± 10 kPa; A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente), R = 7%. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

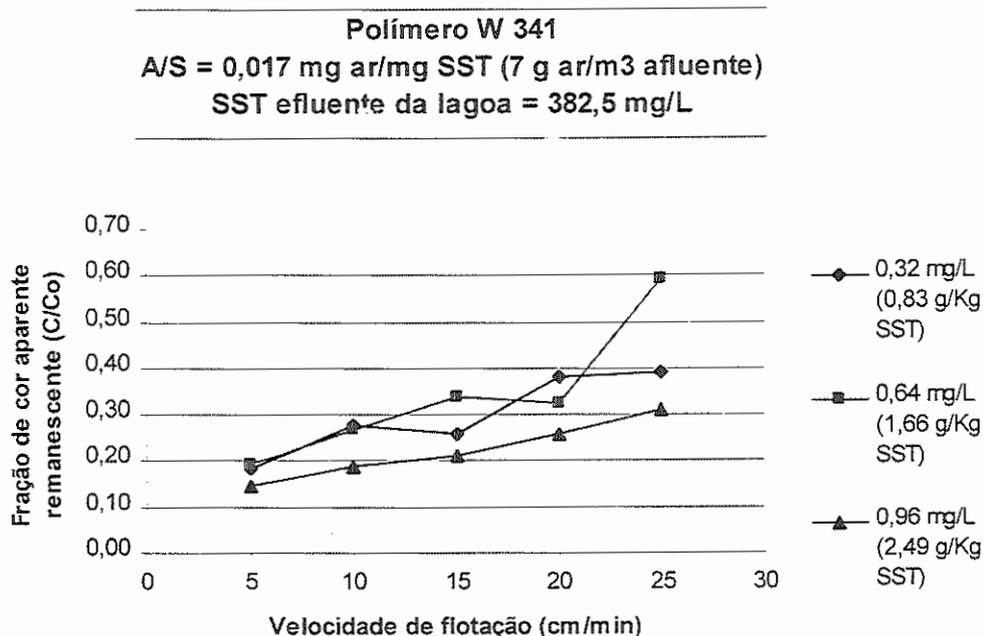


FIGURA 5.49 – Frações de cor aparente remanescente (C/C₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.9.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_f = 1 min.; G_f = 100 s⁻¹; P_{sat} = 400 ± 10 kPa; A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente), R = 7%. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

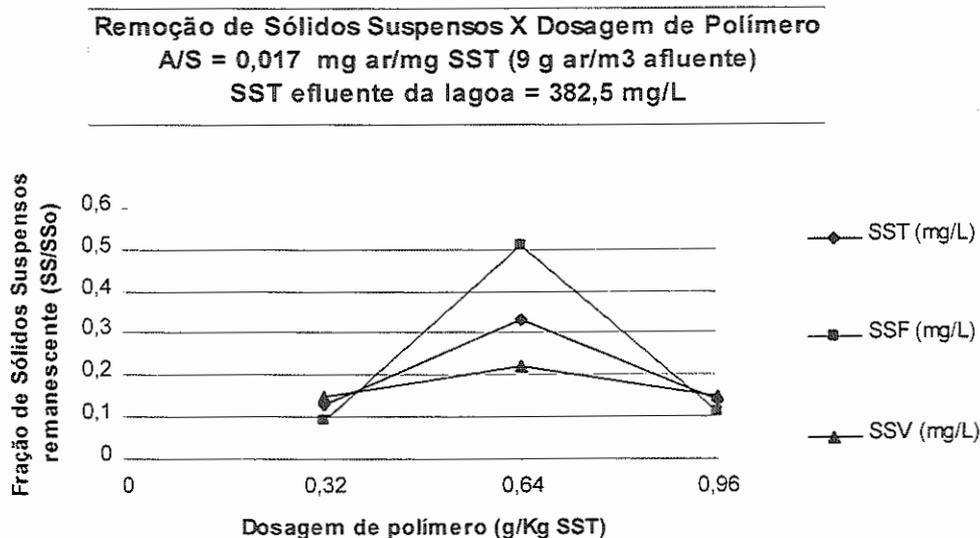


FIGURA 5.50 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.9.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_f = 1 min.; G_f = 100 s⁻¹; P_{sat} = 400 ± 10 kPa; A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente). R = 7%. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

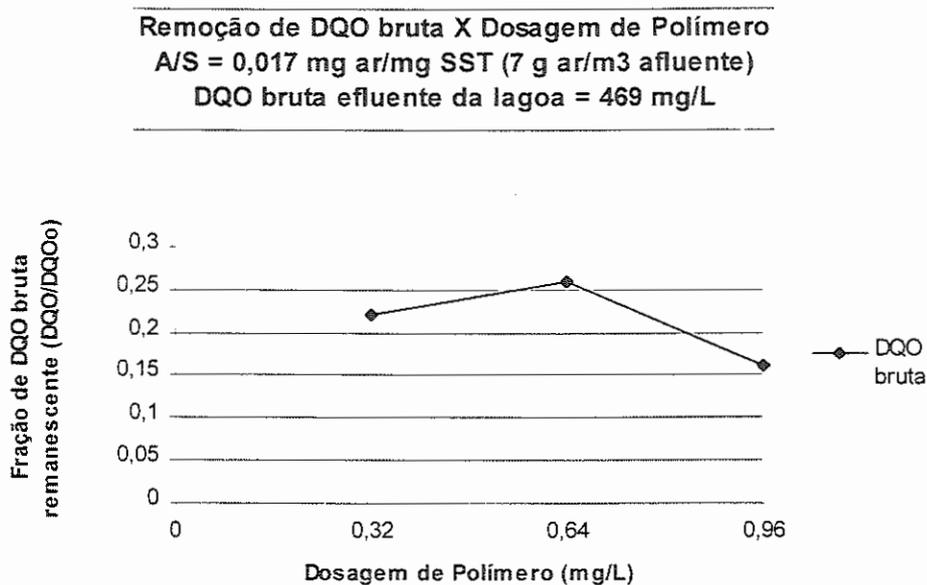


FIGURA 5.51 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO₀) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes dosagens.

1ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.9.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 400 \pm 10$ kPa; A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente), R = 7%. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

TABELA 5.28 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às dosagens do polímero W 341 aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.1, utilizando a razão A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.48 e 5.49).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 4 = 293 mg/L (ver TABELA 5.27).
 Cor aparente da amostra do efluente Tipo 4 = 1705 mg/L (ver TABELA 5.27).

	Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)		
	0,32	0,64	0,96
Remoção de turbidez (%)	80,3 (57,78)	71,4 (83,78)	83,3 (48,79)
Remoção de cor aparente (%)	74,0 (444,05)	66,1 (577,8)	78,9 (359,52)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC.

TABELA 5.29 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às dosagens do polímero W 341 aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.1, utilizando a razão A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente), para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.50 e 5.51).

SST da amostra do efluente Tipo 4 = 382,5 mg/L (ver TABELA 5.27).
DQO bruta da amostra do efluente Tipo 4 = 469 mg/L (ver TABELA 5.27).

	Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)		
	0,32	0,64	0,96
Remoção de SST (%)	87,1 (49,48)	67,1 (125,73)	86,4 (52,16)
Remoção de DQO bruta (%)	77,7 (104,73)	73,9 (122,62)	84,1 (74,69)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

Quando se analisa a influência da razão ar/sólidos (A/S) na remoção de turbidez, para a dosagem de polímero de 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST), através da FIGURA 5.52 e TABELA 5.30, vê-se que, para toda a faixa de velocidades de flotação investigada, os resultados apresentados pelas razões A/S de 0,021 e 0,025 mg ar/mg SST (9 e 11 g ar/m³ afluente) foram muito bons e não muito diferentes (83,3 a 93,5% para A/S de 0,021 e 86,3 a 94,4% para A/S de 0,025 mg ar/mg SST).

Assim como nos ensaios do item 5.3.2, comprovou-se que 5 e 7 g ar/m³ afluente foram insuficientes para promover flotação eficiente, fornecendo resultados inferiores aos obtidos com as outras razões A/S (remoção de 71,6 a 89,5% e 80,0 a 92,6% para 5 e 7 g ar/m³ afluente, respectivamente).

Quando se analisa a remoção de cor aparente, mostrada pela FIGURA 5.53 e TABELA 5.30, vê-se que as porcentagens obtidas nos ensaios onde foram aplicados A/S de 0,017, 0,021 e 0,025 mg ar/mg SST, ou seja, 7, 9 e 11 g ar/m³ afluente, também foram muito semelhantes e, nesse caso, não tão menores que os resultados de remoção de turbidez (80,5 a 87,5% de remoção com A/S de 0,017; 77,0 a 88,5% com A/S de 0,021 e 79,5 a 88,3% com A/S de 0,025 mg ar/mg SST). O A/S de 0,012 mg

ar/mg SST (5 g ar/m³ afluente) novamente forneceu porcentagens de remoção bem abaixo das obtidas nos ensaios onde foram utilizados os outros valores de A/S.

A remoção de sólidos suspensos, também para os valores de A/S de 0,017; 0,021 e 0,025 mg ar/mg SST (7, 9 e 11 g ar/m³ afluente), foi excelente, com remoção de SST de 94,0% (residual de 24,08 mg/L) para 7 g ar/m³ afluente, 95,0% (residual de 19,25 mg/L) para 9 g ar/m³ afluente e 96,0% (residual de 13,84 mg/L) para 11 g ar/m³ afluente (ver FIGURA 5.54 e TABELA 5.31).

Pode-se ver pela TABELA 5.31, que a remoção de SST fornecida pelo ensaio com aplicação de 7 g ar/m³ afluente (94,0% de remoção) foi maior do que obtida na 1ª parte dessa bateria de ensaios, cujo resultado está mostrado na TABELA 5.29 (86,4% de remoção), para a mesma dosagem de polímero e a mesma quantidade de ar.

Na FIGURA 5.55 e TABELA 5.31, onde são mostradas as porcentagens de remoção de DQO, vê-se que os maiores valores foram alcançados com A/S de 0,021 e 0,025 mg ar/mg SST (9 e 11 g ar/m³ afluente), sendo que o valor mais baixo (71,9%) foi obtido com A/S de 0,017 (7 g ar/m³ afluente). Nota-se que o A/S de 0,012 mg ar/mg SST (5 g ar/m³ afluente) não apresentou resultado muito pior do que os obtidos com as outras razões A/S (78,0%), como havia ocorrido para os outros parâmetros.

Através da análise dos resultados, concluiu-se que o processo de flotação realizado com 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST) de polímero e A/S de 0,021 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente) apresentou resultados muito semelhantes aos realizados com A/S de 0,025 mg ar/mg SST (11 g ar/m³ afluente), não havendo necessidade da utilização de uma razão de recirculação maior. Então, desse ensaio foram coletadas amostras para determinação da série do nitrogênio (NTK, N-NH₄⁺, NO₂⁻ e NO₃⁻), de fosfato total, sulfeto e sulfato, e com esses valores pôde-se determinar a eficiência do processo de flotação (em relação à saída da lagoa aerada, cuja caracterização pode ser vista na TABELA 5.27).

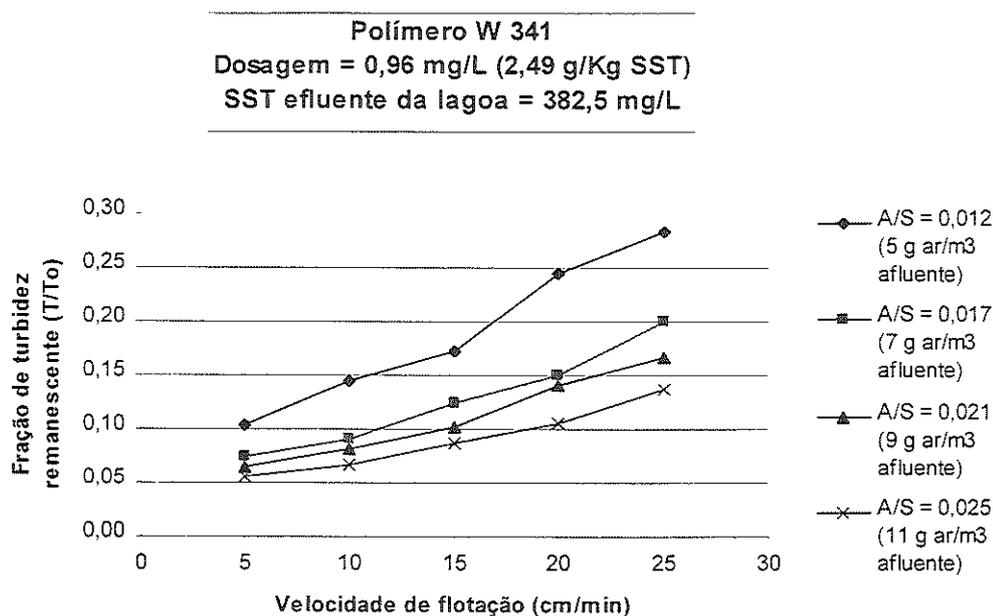


FIGURA 5.52 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.9.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1 \text{ min.}$; $G_f = 100 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}} = 400 \pm 10 \text{ kPa}$; Dosagem de polímero = 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST). Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

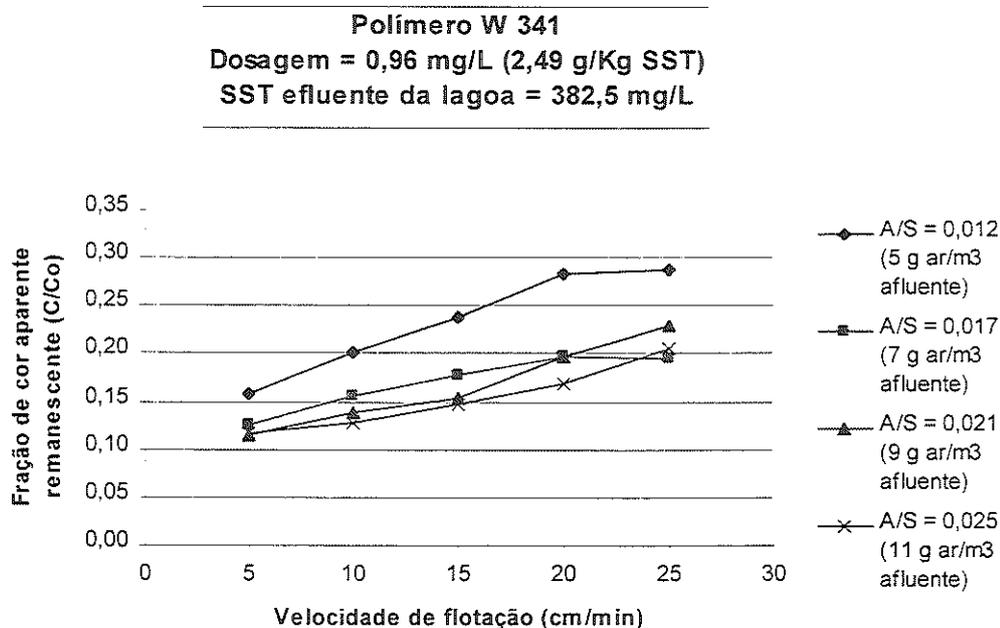


FIGURA 5.53 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.9.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1 \text{ min.}$; $G_f = 100 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}} = 400 \pm 10 \text{ kPa}$; Dosagem de polímero = 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST). Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

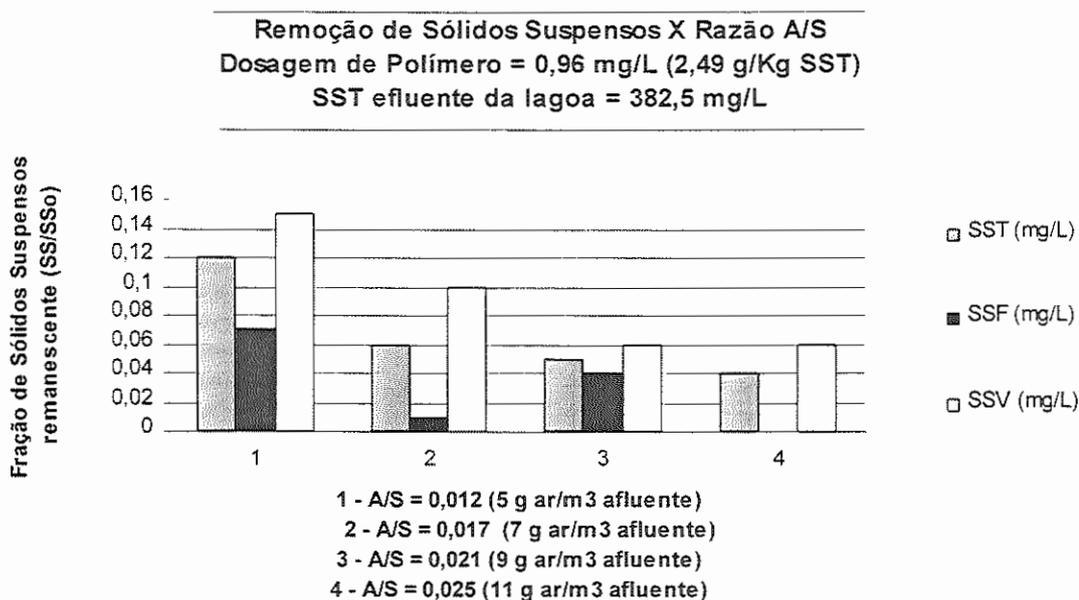


FIGURA 5.54 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.9.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 400 \pm 10$ kPa; Dosagem de polímero = 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST). Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

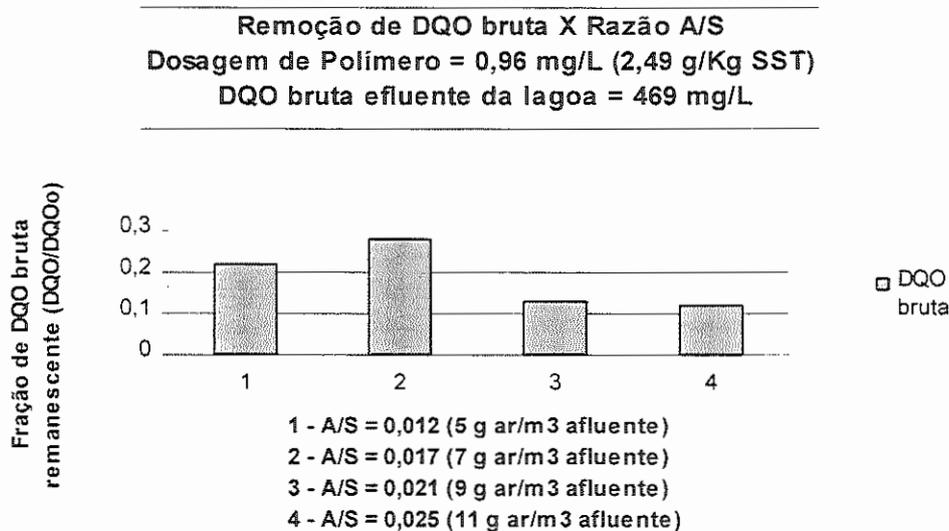


FIGURA 5.55 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO0) em função da velocidade de flotação, para o polímero W 341, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª parte da 1ª bateria de ensaios (item 4.9.1) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_f = 1$ min.; $G_f = 100$ s⁻¹; $P_{sat} = 400 \pm 10$ kPa; Dosagem de polímero = 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST). Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

TABELA 5.30 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.1, utilizando a dosagem do polímero W 341 de 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.52 e 5.53).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 4 = 293 mg/L (ver TABELA 5.27).

Cor aparente da amostra do efluente Tipo 4 = 1705 mg/L (ver TABELA 5.27).

	Razão A/S (mg ar/mg SST)			
	0,012 (5 g ar/m ³ afluente)	0,017 (7 g ar/m ³ afluente)	0,021 (9 g ar/m ³ afluente)	0,025 (11 g ar/m ³ afluente)
Remoção de turbidez (%)	82,8 (50,48)	87,7 (36,17)	90,0 (29,67)	91,3 (25,45)
Remoção de cor aparente (%)	76,2 (405,53)	82,4 (300,67)	84,6 (261,89)	85,2 (252,01)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC.

TABELA 5.31 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.1, utilizando a dosagem do polímero W 341 de 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST), para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.54 e 5.55).

SST da amostra do efluente Tipo 4 = 382,5 mg/L (ver TABELA 5.27).

DQO bruta da amostra do efluente Tipo 4 = 469 mg/L (ver TABELA 5.27).

	Razão A/S (mg ar/mg SST)			
	0,012 (5 g ar/m ³ afluente)	0,017 (7 g ar/m ³ afluente)	0,021 (9 g ar/m ³ afluente)	0,025 (11 g ar/m ³ afluente)
Remoção de SST (%)	88,0 (46,08)	94,0 (24,08)	95,0 (19,25)	96,0 (13,84)
Remoção de DQO bruta (%)	78,0 (103,33)	71,9 (131,82)	87,3 (59,44)	87,9 (56,88)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

5.5.2 Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 4, com a aplicação de cloreto férrico, variando a razão A/S

Na segunda bateria de ensaios dessa quarta etapa do trabalho, para uma dosagem de 40 mg/L de cloreto férrico, foram testadas as razões A/S de 0,012; 0,017; 0,025 e 0,033 mg ar/mg SST (5, 7, 11 e 14 g ar/m³ afluente). Decidiu-se por fazer novos ensaios com o cloreto férrico pois, no item 5.4.2, utilizou-se a dosagem de 80 mg/L para o teste das razões A/S, sendo que a dosagem de 40 mg/L havia fornecido resultados plenamente satisfatórios.

A FIGURA 5.56 e a TABELA 5.32 mostram que a dosagem de cloreto férrico de 80 mg/L, utilizada para o teste da razão A/S nos ensaios de flotação do item 5.4.2, não era realmente necessária, pois foi possível obter melhores resultados utilizando uma dosagem menor de cloreto férrico, por meio do aumento do fornecimento de ar no processo de flotação. As porcentagens de remoção de turbidez obtidas com dosagem de cloreto férrico de 40 mg/L e razões A/S de 0,025 e 0,033 mg ar/mg SST (11 e 14 g ar/m³ afluente) foram excelentes, numa faixa de 92,6 a 99,1% para A/S de 0,025 e 94,5 a 99,0% para A/S de 0,033, para toda a faixa de velocidades de flotação investigada.

Novamente vê-se que a utilização de 5 e 7 g ar/m³ afluente não foram suficientes para promover uma boa flotação, pois os resultados obtidos com esses valores de A/S foram muito piores que os obtidos nos demais ensaios, principalmente para as maiores velocidades de flotação (23,1 a 94,2% de remoção para A/S de 0,012 e 44,1 a 99,1% para A/S de 0,017).

A faixa de remoção de cor foi muito semelhante à de remoção de turbidez. Vê-se pelos resultados mostrados na FIGURA 5.57 e na TABELA 5.32, que os ensaios realizados com 40 mg/L de cloreto férrico e as razões A/S de 0,025 e 0,033 mg ar/mg SST (11 e 14 g ar/m³ afluente) promoveram

as maiores remoções de cor dentre os ensaios realizados nos itens anteriores do presente trabalho (remoção de cor de 89,0 a 97,2% com A/S de 0,025 e de 91,3 a 97,2% para A/S de 0,033, para toda a faixa de velocidades de flotação estudada). Novamente os resultados apresentados pela razão A/S de 0,017 (7 g ar/m³ afluente) foram semelhantes aos apresentados pelas outras razões ar/sólidos até 15 cm/min. (91,0 a 97,1% de remoção), piorando para as velocidades de flotação maiores.

A remoção de sólidos suspensos, vista na FIGURA 5.58 e TABELA 5.33, foi excelente para os valores de A/S de 0,017, 0,025 e 0,033 mg ar/mg SST (7, 11 e 14 g ar/m³ afluente), com porcentagens de remoção de SST acima de 98,0%. Uma possível explicação para esses resultados é que, com a aplicação dessa dosagem de cloreto férrico não muito alta, obteve-se boa eficiência da flotação, com uma quantidade de ar não muito grande (7 g ar/m³ afluente).

Pela FIGURA 5.59 e TABELA 5.33, vê-se que os resultados de remoção de DQO bruta também foram muito bons para A/S de 0,017, 0,025 e 0,033 mg ar/mg SST (7, 11 e 14 g ar/m³ afluente), com porcentagens de remoção acima de 89,0%. Como para os outros parâmetros, o ensaio realizado com A/S de 0,012 mg ar/mg SST (5 g ar/m³ afluente) não teve um bom desempenho quanto à remoção de DQO.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios do 5.5.2, foram coletadas amostras do ensaio realizado com 40 mg/L de cloreto férrico e A/S de 0,025 mg ar/mg SST (11 g ar/m³ afluente), para determinação da série do nitrogênio, de fosfato total, sulfeto e sulfato, e com esses valores pôde-se determinar a eficiência do processo de flotação (em relação à saída da lagoa aerada).

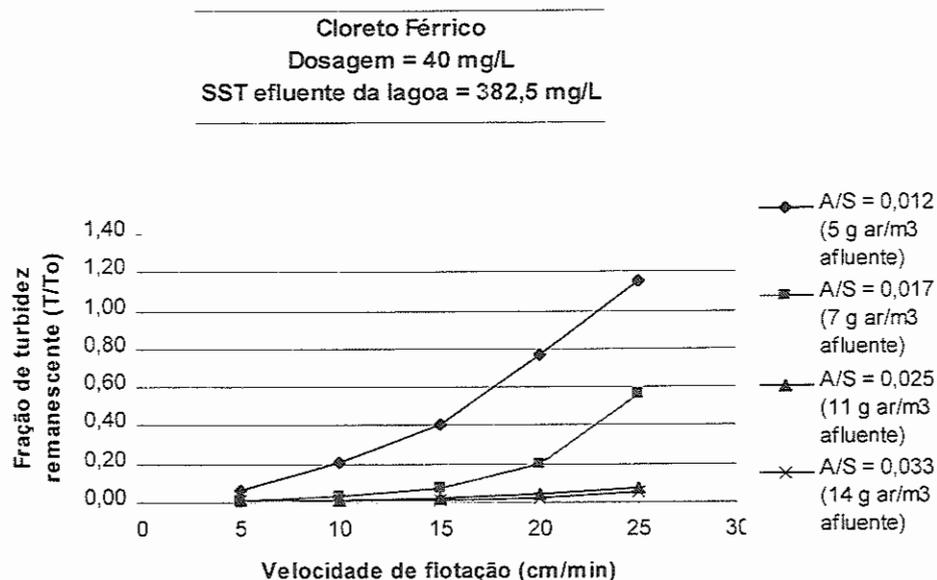


FIGURA 5.56 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S .

2ª bateria de ensaios (item 4.9.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 400 \pm 10 kPa$; Dosagem de cloreto férrico = 40 mg/L. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

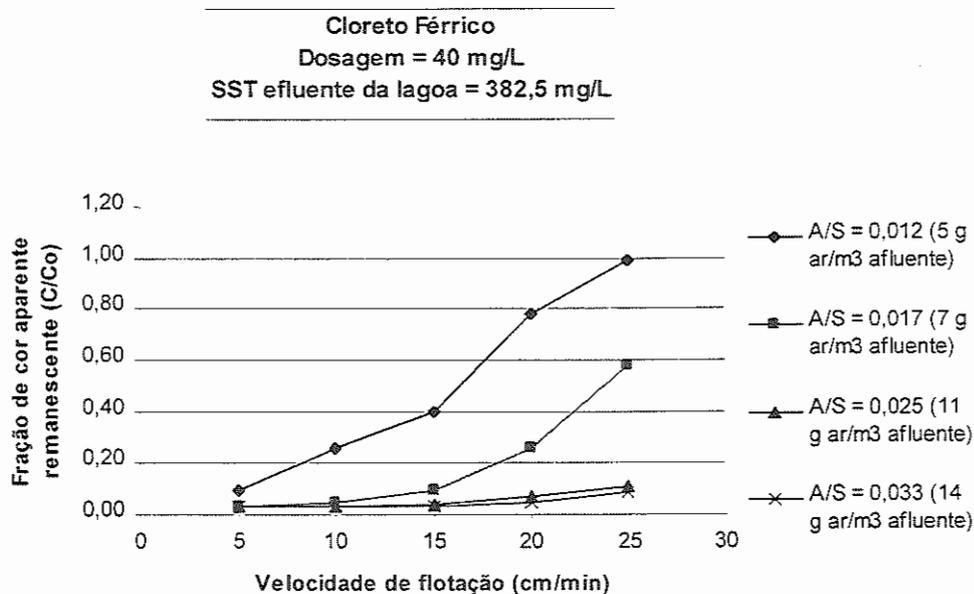


FIGURA 5.57 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S .

2ª bateria de ensaios (item 4.9.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 400 \pm 10 kPa$; Dosagem de cloreto férrico = 40 mg/L. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

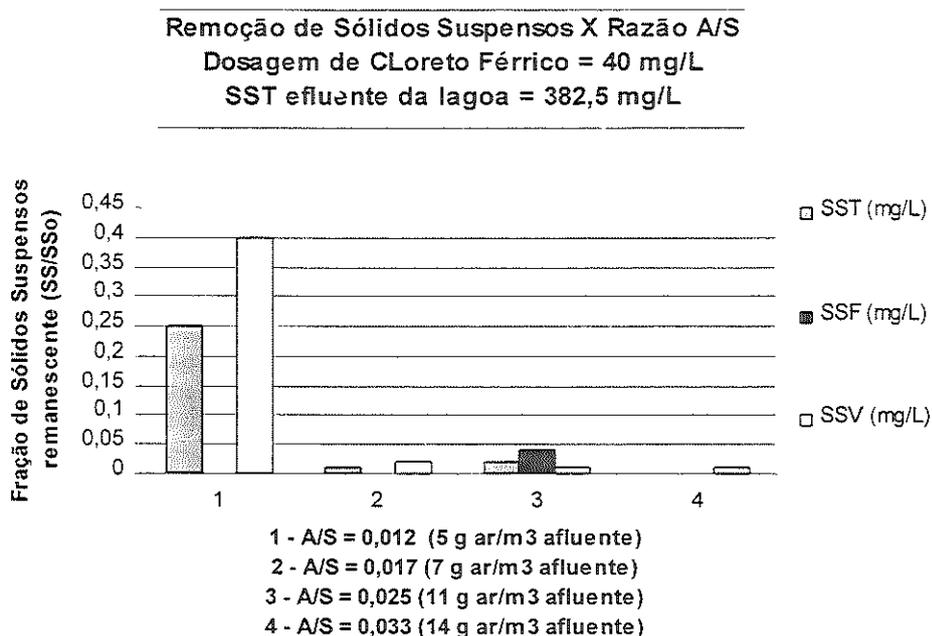


FIGURA 5.58 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS₀) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª bateria de ensaios (item 4.9.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15$ min.; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 400 \pm 10$ kPa; Dosagem de cloreto férrico = 40 mg/L. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

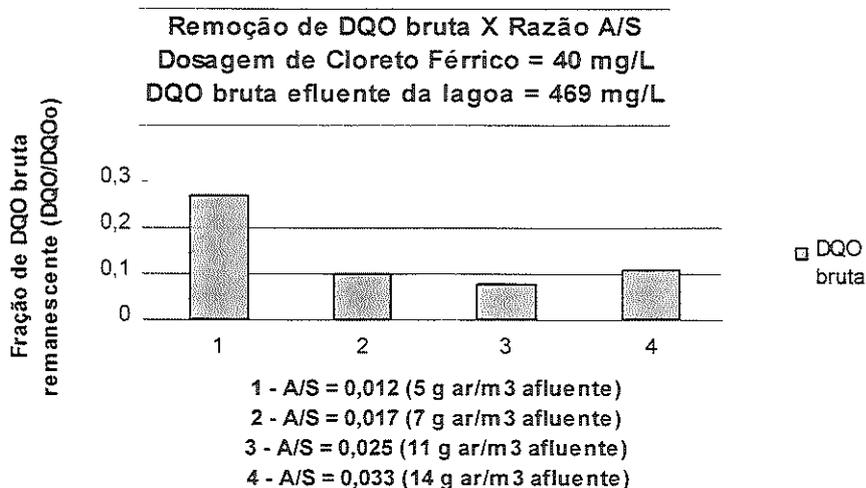


FIGURA 5.59 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO₀) em função da velocidade de flotação, para o cloreto férrico, utilizando diferentes valores de A/S.

2ª bateria de ensaios (item 4.9.2) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15$ min.; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 400 \pm 10$ kPa; Dosagem de cloreto férrico = 40 mg/L. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

TABELA 5.32 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.2, utilizando a dosagem de cloreto férrico de 40 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.56 e 5.57).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 4 = 293 mg/L (ver TABELA 5.27).
Cor aparente da amostra do efluente Tipo 4 = 1705 mg/L (ver TABELA 5.27).

	Razão A/S (mg ar/mg SST)			
	0,012 (5 g ar/m3 afluente)	0,017 (7 g ar/m3 afluente)	0,025 (11 g ar/m3 afluente)	0,033 (14 g ar/m3 afluente)
Remoção de turbidez (%)	59,4 (119,03)	92,6 (21,83)	98,1 (5,58)	98,6 (4,05)
Remoção de cor aparente (%)	60,5 (674,13)	91,0 (153,01)	95,8 (71,93)	96,6 (58,14)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC.

TABELA 5.33– Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.2, utilizando a dosagem de cloreto férrico de 40 mg/L, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.58 e 5.59).

SST da amostra do efluente Tipo 4 = 382,5 mg/L (ver TABELA 5.27).
DQO bruta da amostra do efluente Tipo 4 = 469 mg/L (ver TABELA 5.27).

	Razão A/S (mg ar/mg SST)			
	0,012 (5 g ar/m3 afluente)	0,017 (7 g ar/m3 afluente)	0,025 (11 g ar/m3 afluente)	0,033 (14 g ar/m3 afluente)
Remoção de SST (%)	75,0 (96,12)	99,0 (4,01)	98,0 (6,92)	>99,9 (1,42)
Remoção de DQO bruta (%)	72,8 (127,87)	90,1 (46,55)	91,7 (38,73)	89,0 (51,41)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

5.5.3 Ensaio de clarificação por flotação, do efluente Tipo 4, com a aplicação da associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, variando a dosagem

Na terceira bateria da quarta etapa do trabalho foram feitos ensaios de flotação com uma associação entre o cloreto férrico (coagulante) e o polímero W 341 (auxiliar de floculação/flotação).

Na 1ª parte dessa terceira bateria de ensaios de flotação, para uma dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L, foram aplicadas as dosagens de polímero de 0,13; 0,26 e 0,39 mg/L (0,33; 0,66 e 0,99 g/Kg SST). Na 2ª parte, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L, foi utilizada uma dosagem de polímero de 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST). Os ensaios da 1ª e 2ª partes foram realizados com um valor de A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente). Na 3ª parte, com a associação de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero, foram testados os valores de A/S de 0,012; 0,017 e 0,025 mg ar/mg SST (5, 7 e 11 g ar/m³ afluente).

Pelos resultados apresentados na FIGURA 5.60 e na TABELA 5.34, vê-se que as maiores porcentagens de remoção de turbidez foram atingidas com 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/kg SST) de polímero W 341 (91,5 a 98,9% de remoção, para toda a faixa de velocidades de flotação estudada), sendo que a associação de DCF = 20 mg/L com DP = 0,13 e 0,26 mg/L (0,33 e 0,66 g/Kg SST) também apresentaram resultados muito bons (86,1 a 97,3% de remoção para DP = 0,13 mg/L e 87,3 a 98,4% para DP = 0,26 mg/L).

Apesar de ter fornecido resultados de remoção de turbidez piores do que os obtidos nos ensaios realizados com dosagens menores que ela, a aplicação da associação de DCF = 20 mg/L com DP = 0,39 mg/L e 7 g ar/m³ afluente apresentou faixa de remoção de turbidez de 74,7 a 98,3%, sendo que o ensaio do item 5.4.3, realizado com DCF = 20 mg/L e DP = 0,36 mg/L de polímero e 9 g ar/m³ afluente, apresentou porcentagens de

remoção de turbidez muito semelhantes (78,9 a 97,3%). Como pôde ser observado em outros ensaios, a remoção de turbidez foi favorecida com o aumento da quantidade de ar (ver FIGURAS 5.28, 5.36, 5.52, 5.56 e 5.64), um fato notado especialmente quando o coagulante utilizado foi o cloreto férrico (ver FIGURAS 5.36 e 5.56).

A FIGURA 5.61 e a TABELA 5.34 mostram que as porcentagens de remoção de cor aparente também foram muito boas para as três associações de cloreto férrico com o polímero W 341 que apresentaram boas porcentagens de remoção de turbidez (remoção de cor de 81,4 a 94,2% para DCF = 20 mg/L + DP = 0,13 mg/L; remoção de 83,2 a 95,6% para DCF = 20 mg/L + DP = 0,26 mg/L e remoção de 87,4 a 96,9% para DCF = 30 mg/L + DP = 0,21 mg/L). O desempenho do ensaio realizado com DCF = 20 mg/L e DP = 0,39 mg/L (0,99 g/Kg SST), quanto à remoção de cor, também foi pior do que o apresentado pelos outros ensaios (remoção de 68,8 a 95,9%).

Observando a FIGURA 5.62 e a TABELA 5.35, vê-se que as mesmas associações de dosagens de cloreto férrico com polímero W 341 que promoveram boas porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, tiveram um desempenho excelente quanto à remoção de sólidos suspensos, sendo que as três combinações resultaram em remoção de SST de 98,0%. Dessa vez o resultado apresentado pela associação de DCF = 20 mg/L com DP = 0,39 mg/L (0,99 g/Kg SST) também foi muito bom, fornecendo remoção de SST de 91,0%.

Nota-se que, quando a dosagem de coagulante se aproxima do valor adequado, obtêm-se uma boa remoção de sólidos suspensos mesmo utilizando uma baixa quantidade de ar, ou seja, nesses ensaios obteve-se remoção de 98,0% de SST com apenas 7 g ar/m³ afluente, que anteriormente havia sido considerada insatisfatória quando utilizada nos ensaios do item 5.3.2.

A FIGURA 5.63 e a TABELA 5.35 mostram que as porcentagens de remoção de DQO bruta foram maiores que 86,0%, para todas as

combinações de dosagens de cloreto férrico e polímero, sendo que novamente a dosagem de cloreto férrico somada à dosagem de polímero de 0,39 mg/L (0,99 g/Kg SST) apresentou o pior resultado de remoção de DQO.

Novamente com base nas leituras de turbidez escolheu-se a associação de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero W 341 para a realização subsequente de ensaios de flotação com diferentes valores de A/S. Deve-se salientar que a combinação de 20 mg/L de cloreto férrico com 0,13 mg/L (0,33 g/Kg SST) de polímero também apresentou bons resultados, próximos aos anteriormente descritos, sendo que, nesse caso, ter-se-ia alguma economia na dosagem de ambos os produtos químicos.

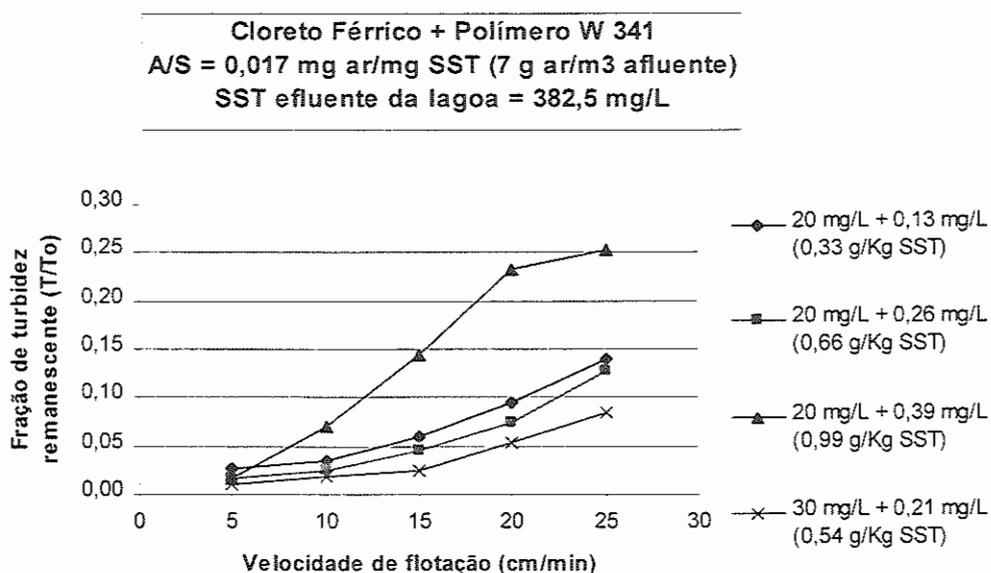


FIGURA 5.60 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico e diferentes dosagens de polímero e para uma dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero.

1ª e 2ª partes da 3ª bateria de ensaios (item 4.9.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 400 \pm 10 kPa$; $A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m^3 afluente)$, $R = 7\%$. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

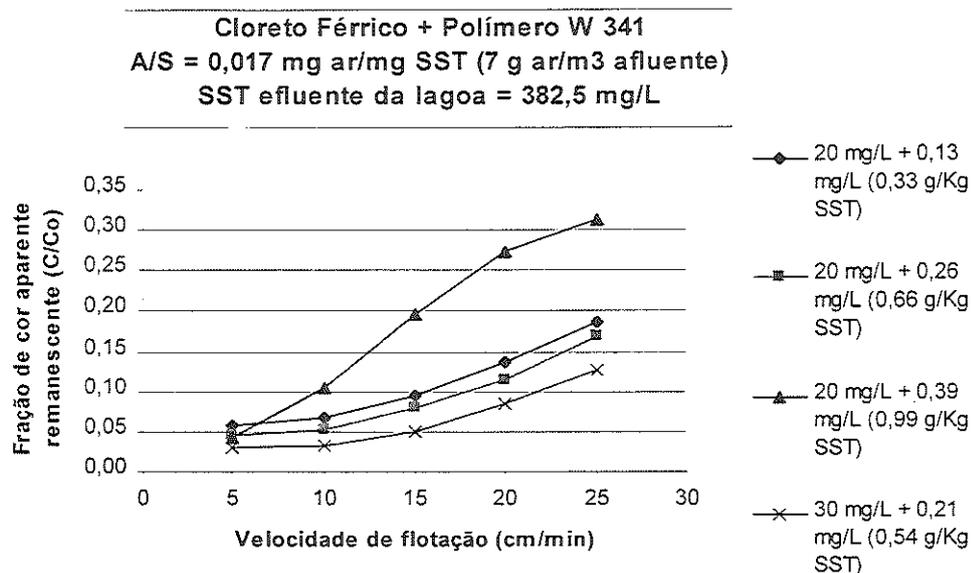


FIGURA 5.61 – Frações de cor aparente remanescente (C/C₀) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico e diferentes dosagens de polímero e para uma dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero.

1ª e 2ª partes da 3ª bateria de ensaios (item 4.9.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_{mr} = 30s; G_{mr} = 800 s⁻¹; T_f = 15 min.; G_f = 80 s⁻¹; P_{sat} = 400 ± 10 kPa; A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente). R = 7%. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

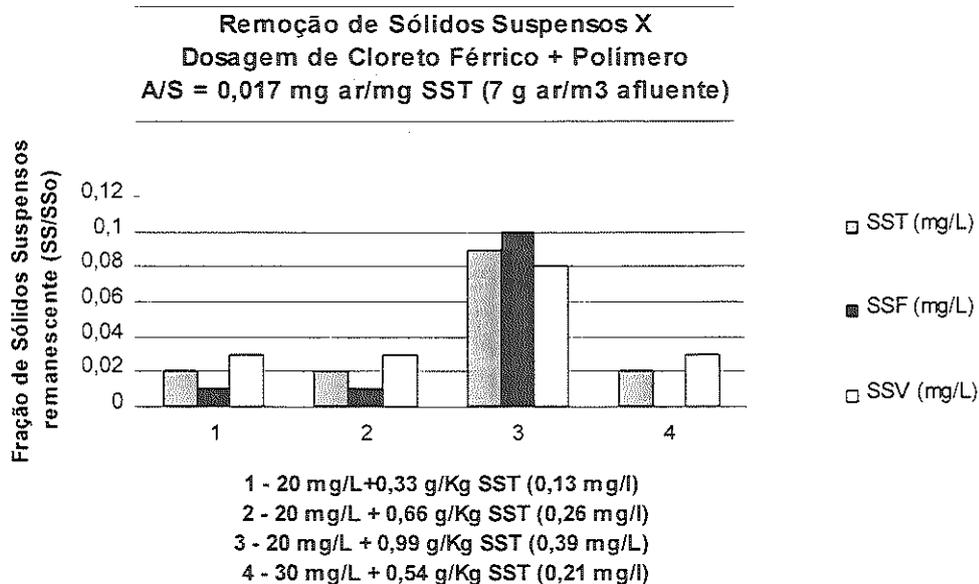


FIGURA 5.62 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS₀) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico e diferentes dosagens de polímero e para uma dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero.

1ª e 2ª partes da 3ª bateria de ensaios (item 4.9.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_{mr} = 30s; G_{mr} = 800 s⁻¹; T_f = 15 min.; G_f = 80 s⁻¹; P_{sat} = 400 ± 10 kPa; A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente). R = 7%. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

Remoção de DQO bruta X Dosagem de Cloreto Férrico + Polímero
A/S = 0,017 mL ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente)
DQO bruta efluente da lagoa = 469 mg/L

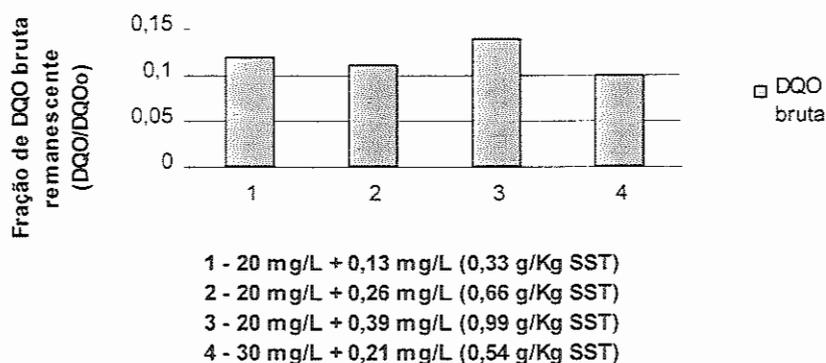


FIGURA 5.63 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO₀) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem fixa de 20 mg/L de cloreto férrico e diferentes dosagens de polímero e para uma dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero.

1ª e 2ª partes da 3ª bateria de ensaios (item 4.9.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_{mr} = 30s; G_{mr} = 800 s⁻¹; T_f = 15 min.; G_f = 80 s⁻¹; P_{sat} = 400 ± 10 kPa; A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente), R = 7%. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

TABELA 5.34 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes à associação de 20 mg/L de cloreto férrico a diferentes dosagens do polímero W 341, e à associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,54 mg/L de polímero W 341, utilizando A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente) aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.3, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.60 e 5.61).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 4 = 293 mg/L (ver TABELA 5.27).
 Cor aparente da amostra do efluente Tipo 4 = 1705 mg/L (ver TABELA 5.27).

Dosagem de Polímero (mg/L)	0,13	0,26	0,39	0,21
Dosagem de Cloreto Férrico (mg/L)	20	20	20	30
Remoção de turbidez (%)	94,1 (17,33)	95,4 (13,38)	85,6 (42,27)	97,4 (7,49)
Remoção de cor aparente (%)	90,6 (160,5)	92,0 (135,89)	80,5 (332,77)	95,0 (84,53)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC.

TABELA 5.35 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes à associação de 20 mg/L de cloreto férrico a diferentes dosagens do polímero W 341, e à associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,54 mg/L de polímero W 341, utilizando A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente) aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.3, para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.62 e 5.63).

SST da amostra do efluente Tipo 4 = 382,5 mg/L (ver TABELA 5.27).
DQO bruta da amostra do efluente Tipo 4 = 469 mg/L (ver TABELA 5.27).

Dosagem de Polímero (mg/L)	0,13	0,26	0,39	0,21
Dosagem de Cloreto Férrico (mg/L)	20	20	20	30
Remoção de SST (%)	98,0 (9,36)	98,0 (9,36)	91,0 (34,78)	98,0 (8,03)
Remoção de DQO bruta (%)	87,8 (57,35)	89,5 (49,43)	86,0 (65,81)	89,7 (48,26)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

A FIGURA 5.64 mostra que a remoção de turbidez para a associação de 30 mg/L de cloreto férrico e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero foi excelente para os três valores de A/S testados, pois com A/S de 0,012 mg ar/mg SST (5 g ar/m³ afluente), ou seja, apenas 5% de recirculação (em volume), para a velocidade de flotação de 25 cm/min., obteve-se 89,9% de remoção de turbidez (faixa de remoção de 89,9 a 99,0%).

O ensaio de flotação realizado com A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente), que já havia sido realizado na 1ª parte dessa bateria de ensaios, foi repetido e forneceu resultados ainda melhores, com remoções de turbidez de 96,3 a 98,9%, porcentagens muito semelhantes às fornecidas pelo ensaio onde se utilizou 11 g ar/m³ afluente (94,5 a 99,1%).

As porcentagens de remoção de cor aparente, mostradas na FIGURA 5.65 e TABELA 5.36, foram muito semelhantes às remoções de turbidez, com resultados também bastante bons. Os valores de A/S de 0,017 e 0,025 mg ar/mg SST (7 e 11 g ar/m³ afluente) promoveram remoção de cor de 93,6

a 97,2% e 91,8 a 97,1%, para toda a faixa de velocidades de flotação. Mesmo o ensaio onde foi aplicado o valor de A/S de 0,012 mg ar/mg SST (5 g ar/m³ afluyente), que apresentou o pior desempenho, apresentou uma faixa de remoção de cor de 86,7 a 96,9%, com resultados muito semelhantes aos das outras quantidades de ar para velocidades de flotação menores ou iguais a 15 cm/min.

Com isso pode-se concluir que essa associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero W 341 pode ter proporcionado a formação de flocos com características favoráveis à flotação, permitindo que o processo fosse eficiente até mesmo com pequena quantidade de ar (7 g ar/m³ afluyente).

Da mesma forma que para os outros parâmetros, vê-se pela FIGURA 5.66 e TABELA 5.37, que as porcentagens de remoção de sólidos suspensos para essa associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero e para os três valores de razão A/S testados foram ótimas, com valores de remoção de SST acima de 97%, sendo que o melhor desempenho foi atingido pelo A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluyente), apresentando remoção de SST de 99,0%.

Vê-se pela FIGURA 5.67 e TABELA 5.37, que as porcentagens de remoção de DQO bruta, também para os três valores de A/S testados, foram muito boas, apresentando resultados acima de 88,0%, sendo que o melhor resultado (remoção de 93,1%) foi atingido mais uma vez pelo ensaio onde foi aplicado o valor de A/S de 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluyente).

A partir dos resultados desses ensaios, concluiu-se que o melhor valor de A/S, dentre os valores investigados, para o processo de flotação com a aplicação da associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero W 341 foi 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluyente).

Conforme comentado no item Materiais e Métodos, do ensaio realizado com 30 mg/L de cloreto férrico associado a 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero W 341 e A/S igual a 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³

afluente), bem como dos ensaios correspondentes os itens 5.5.1 e 5.5.2 que apresentaram os melhores resultados, foram coletadas amostras com o intuito de determinar os parâmetros necessários para determinação da eficiência do processo de flotação (em relação à saída da lagoa), cujos resultados encontram-se na TABELA 5.38.

Os parâmetros utilizados para o cálculo da eficiência do processo de flotação em relação ao efluente da lagoa aerada (com base nos dados da TABELA 5.27) foram NTK, $N-NH_4^+$, NO_3^- , NO_2^- , fosfato total da amostra bruta e filtrada, sulfeto e sulfato, além de turbidez, cor aparente, DQO bruta e sólidos suspensos totais, que já haviam sido previamente determinados. Esses resultados podem ser vistos na TABELA 5.38.

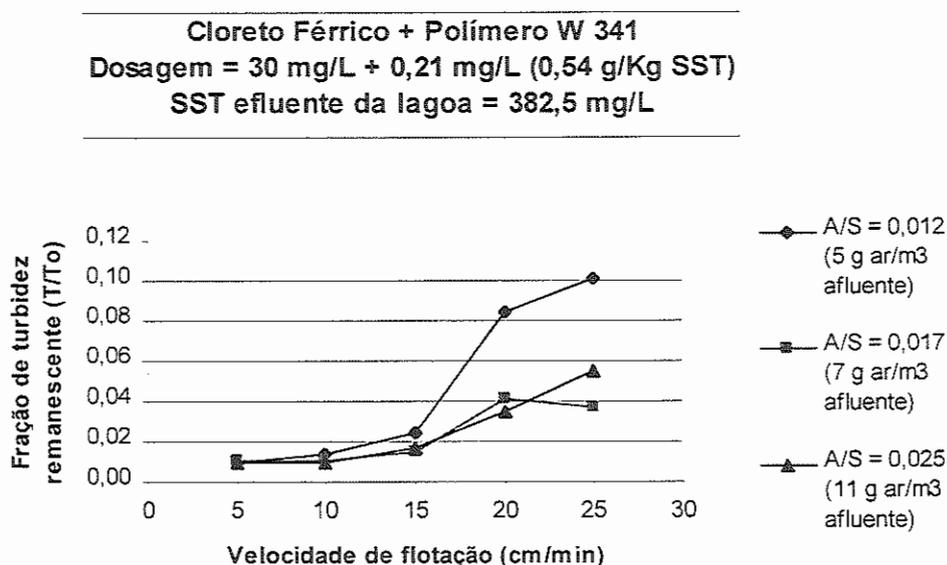


FIGURA 5.64 – Frações de turbidez remanescente (T/T_0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero, utilizando diferentes valores de A/S.

3ª parte da 3ª bateria de ensaios (item 4.9.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 400 \pm 10 kPa$. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

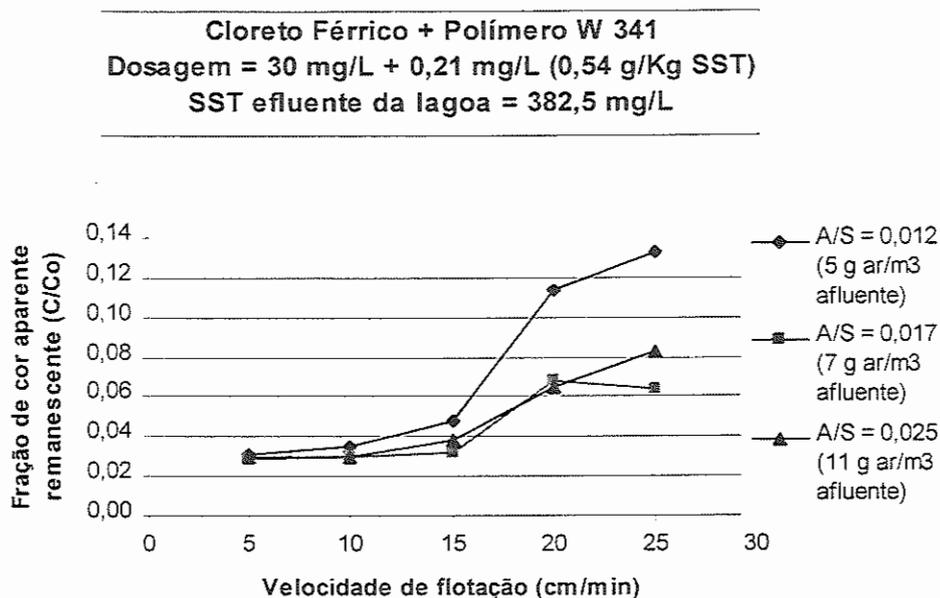


FIGURA 5.65 – Frações de cor aparente remanescente (C/C_0) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero, utilizando diferentes valores de A/S.

3ª parte da 3ª bateria de ensaios (item 4.9.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. $T_{mr} = 30s$; $G_{mr} = 800 s^{-1}$; $T_f = 15 min.$; $G_f = 80 s^{-1}$; $P_{sat} = 400 \pm 10 kPa$. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

TABELA 5.36 – Porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.3, utilizando uma associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,54 mg/L de polímero W 341, para a velocidade de flotação de 15 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.64 e 5.65).

Turbidez da amostra do efluente Tipo 4 = 293 mg/L (ver TABELA 5.27).
 Cor aparente da amostra do efluente Tipo 4 = 1705 mg/L (ver TABELA 5.27).

	Razão A/S (mg ar/mg SST)		
	0,012 (5 g ar/m ³ afluente)	0,017 (7 g ar/m ³ afluente)	0,025 (11 g ar/m ³ afluente)
Remoção de turbidez (%)	97,5 (7,20)	98,5 (4,26)	98,4 (4,79)
Remoção de cor aparente (%)	95,2 (81,11)	96,9 (53,5)	96,2 (65,29)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde à turbidez e cor aparente residuais em uT e uC.

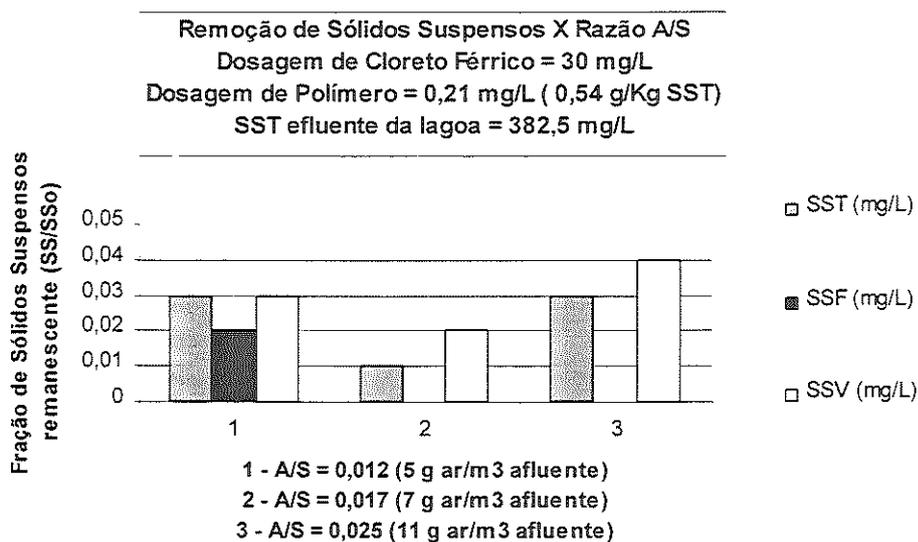


FIGURA 5.66 – Frações de sólidos suspensos remanescente (SS/SS₀) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero, utilizando diferentes valores de A/S.

3ª parte da 3ª bateria de ensaios (item 4.9.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_{mr} = 30s; G_{mr} = 800 s⁻¹; T_f = 15 min.; G_f = 80 s⁻¹; P_{sat} = 400 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

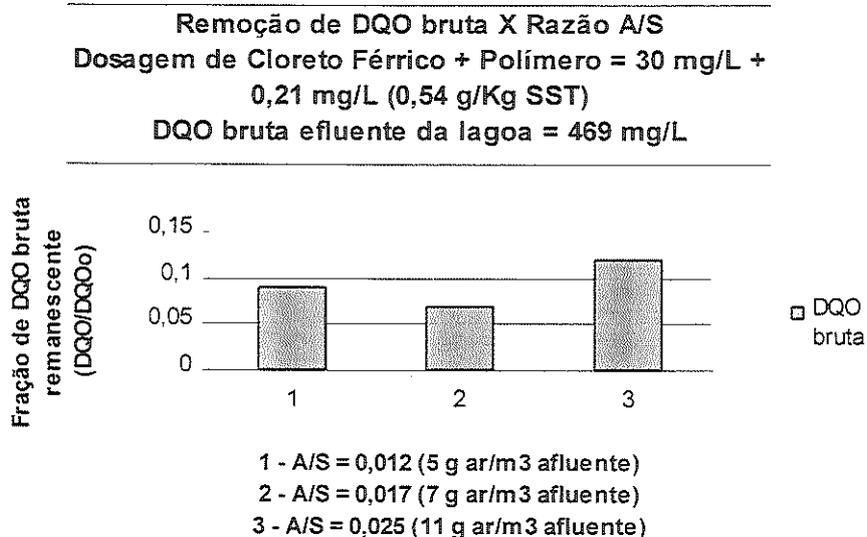


FIGURA 5.67 – Frações de DQO remanescente (DQO/DQO₀) em função da velocidade de flotação, para uma dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L e 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) de polímero, utilizando diferentes valores de A/S.

3ª parte da 3ª bateria de ensaios (item 4.9.3) realizados com o equipamento de Flotatest e efluente concentrado da lagoa aerada da ETE - Piracicamirim. T_{mr} = 30s; G_{mr} = 800 s⁻¹; T_f = 15 min.; G_f = 80 s⁻¹; P_{sat} = 400 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa (Tipo 4) – ver TABELA 5.27.

TABELA 5.37 – Porcentagens de remoção de SST e DQO bruta, correspondentes às razões A/S aplicadas nos ensaios de flotação do item 4.9.3, utilizando uma associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,54 mg/L de polímero W 341, para a velocidade de flotação de 10 cm/min. (obtidos das FIGURAS 5.66 e 5.67).

SST da amostra do efluente Tipo 4 = 382,5 mg/L (ver TABELA 5.27).
DQO bruta da amostra do efluente Tipo 4 = 469 mg/L (ver TABELA 5.27).

	Razão A/S (mg ar/mg SST)		
	0,012 (5 g ar/m ³ afluente)	0,017 (7 g ar/m ³ afluente)	0,025 (11 g ar/m ³ afluente)
Remoção de SST (%)	97,0 (10,53)	99,0 (4,01)	97,0 (9,69)
Remoção de DQO bruta (%)	91,0 (42,24)	93,1 (32,21)	88,0 (56,44)

Obs.: O valor entre parênteses corresponde ao SST e DQO bruta residuais em mg/L.

Analisando os resultados apresentados na TABELA 5.38, nota-se que os melhores resultados de remoção de turbidez, cor aparente, DQO e SST foram apresentados pelo ensaio onde se aplicou a dosagem de cloreto férrico (DCF) igual a 30 mg/L associada à dosagem de polímero (DP) de 0,21 mg/L e com quantidade de ar igual a 7 g ar/m³ afluente (remoção de 98,5% de turbidez, 96,9% de cor aparente, 93,1% de DQO e 99,0% de SST). Os resultados obtidos no ensaio com a aplicação do cloreto férrico isoladamente, na dosagem de 40 mg/L e com quantidade de ar igual a 11 g ar/m³ afluente, também foram excelentes e muito próximos aos fornecidos pela associação (remoção de 98,1% de turbidez, 95,8% de cor aparente, 91,7% de DQO e 98,0% de SST).

O ensaio realizado com a associação de DCF = 20 mg/L e DP = 0,13 mg/L, com quantidade de ar igual a 7 g ar/m³ afluente, também apresentou bons resultados de remoção desses parâmetros (remoção de 94,1% de turbidez, 90,6% de cor aparente, 87,8% de DQO e 98,0% de SST), considerando as baixas dosagens utilizadas, tanto de cloreto férrico quanto de polímero, bem como a baixa quantidade de ar empregada nesse ensaio.

Quanto aos ensaios realizados com a aplicação do polímero isoladamente, vê-se que apresentaram bons resultados, porém inferiores aos demais ensaios, principalmente aquele onde se empregou DP = 0,32 mg/L e 7 g ar/m³ afluyente (remoção de 80,3% de turbidez, 74,0% de cor aparente, 77,7% de DQO e 87,1% de SST).

Assim como para os ensaios correspondentes à TABELA 5.26, observa-se através dos resultados de remoção de nitrogênio, mostrados na TABELA 5.38, que não foi possível obter remoções consideráveis de NTK através da flotação, tanto para o polímero W 341 (remoção de 43,5%, residual de 24,16 mg/L) e o cloreto férrico (remoção de 42,6%, residual de 24,53 mg/L) utilizados isoladamente, como para a associação entre eles (remoção de 44,9%, residual de 23,54 mg/L).

Como era de se esperar, vê-se também pela TABELA 5.38 que a remoção de sulfato foi muito baixa, em todas as situações estudadas. Já os resultados de remoção de sulfeto foram muito bons nos ensaios correspondentes à aplicação do cloreto férrico e à associação entre este e o polímero (ambos promoveram remoção de 83,3%, com residual de 0,003 mg/L), indicando que provavelmente houve reação do ferro com parte considerável do sulfeto presente na amostra.

Quanto à remoção de fosfato total, vê-se que a utilização do polímero isoladamente não forneceu bons resultados (remoção de 52,2%, residual de 8,16 mg/L), como já era esperado. Já os resultados obtidos quando se utilizou o cloreto férrico isoladamente (remoção de 99,0%, residual de 0,18 mg/L) e a associação entre o cloreto férrico e o polímero (remoção de 95,3%, residual de 0,81 mg/L) foram excelentes, sendo que a associação quase alcançou a remoção completa do fosfato dissolvido, indicando ação eficaz dos sais de ferro na precipitação e remoção por flotação do fosfato total.

Analisando os resultados de geração de massa de lodo através da flotação, vê-se que houve correlação entre a maioria das porcentagens de remoção de sólidos suspensos e a massa de lodo gerada no processo de

flotação, com exceção do ensaio realizado com a aplicação de cloreto férrico isoladamente. Esse ensaio, apesar de ter fornecido uma porcentagem remoção de SST igual à obtida no ensaio com aplicação de DCF = 20 mg/L e DP = 0,13 mg/L (remoção de SST de 98%), produziu massa de lodo (152,2 mg lodo/L esgoto flotado) muito menor que a obtida no ensaio realizado com a associação (267,6 mg lodo/L esgoto flotado), o que pode ter sido causado por alguma falha experimental.

Quanto aos ensaios onde se aplicou o polímero W 341 isoladamente, vê-se que houve correlação entre os resultados de remoção de SST e a massa de lodo gerada no processo de flotação (o ensaio com DP = 0,96 mg/L forneceu remoção de SST igual a 86,4%, menor que a obtida com DP = 0,32 mg/L, no ensaio onde foi aplicado 7 g ar/m³ afluente).

Vê-se também pelos resultados da TABELA 5.38 que os ensaios realizados com a associação entre o cloreto férrico e o polímero forneceram os maiores resultados de produção de massa de lodo. Apesar da formação dessa grande quantidade de lodo não ser considerada vantajosa, deve ser analisada a questão custo-benefício, pois esses ensaios correspondem também às maiores remoções de SST e DQO.

TABELA 5.38 – Eficiência do processo de flotação para as melhores dosagens e valores de A/S determinados através dos ensaios realizados na quarta etapa do trabalho. Todas as porcentagens de remoção foram calculadas com base nos dados da lagoa aerada, Turbidez = 293 uT; Cor Aparente = 1705 uC; DQO bruta = 469 mg/L; SST = 382,5 mg/L; NTK = 42,73 mg/L; N-NH₄⁺ = 20,24 mg/L; NO₃⁻ = 0 mg/L; NO₂⁻ = 0 mg/L; P-PO₄³⁺ amostra bruta = 17,08 mg/L; P-PO₄³⁺ amostra filtrada = 5,54 mg/L; Sulfato = 34,0 mg/L e Sulfeto = 0,018 mg/L.

Eficiência de Remoção / Concentração Residual	Polímero W 341 0,32 mg/L (0,83 g/Kg SST) e A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m ³ afluente)	Polímero W 341 0,96 mg/L (2,49 g/Kg SST) e A/S = 0,021 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente)	Cloreto Férrico 40 mg/L e A/S = 0,025 mg ar/mg SST (11 g ar/m ³ afluente)	Cloreto Férrico + Polímero W 341 2 mg/L + 0,13 mg/L (0,33 g/Kg SST) e A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m ³ afluente)	Cloreto Férrico + Polímero W 341 30 mg/L + 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST) e A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m ³ afluente)	Flotação sem a aplicação de produto químico, com A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m ³ afluente)***
Turbidez (%/uT)	80,3 (57,78)	90,0 (29,67)	98,1 (5,58)	94,1 (17,33)	98,5 (4,26)	75,9 (49,59)
Cor aparente (%/uC)	74,0 (444,05)	84,6 (261,9)	95,8 (71,93)	90,6 (160,5)	96,9 (53,5)	46,6 (443,6)
DQO bruta (%/mg/L)	77,7 (104,73)	87,3 (59,44)	91,7 (38,73)	87,8 (57,35)	93,1 (32,31)	69,9 (95,81)
SST (%/mg/L)	87,1 (49,48)	95,0 (19,25)	98,0 (6,92)	98,0 (9,36)	99,0 (4,01)	81,6 (45,05)
Massa de lodo * Mg lodo/L esgoto flotado*	197,5	149,4	152,2	267,6	274,0	-
NTK (%/mg/L)	-	43,5 (24,16)	42,6 (24,53)	-	44,9 (23,54)	-
N-NH ₄ ⁺ (%/mg/L)	-	1,0 (20,03)	1,8 (19,87)	-	* (21,13)	-
NO ₃ ⁻ (%/mg/L)	-	ND	ND	-	ND	-
NO ₂ ⁻ (%/mg/L)	-	ND	ND	-	ND	-
Sulfato (%/mg/L)	-	2,9 (33,0)	20,6 (27,0)	-	2,9 (33,0)	-
Sulfeto (%/mg/L)	-	16,7 (0,015)	83,3 (0,003)	-	83,3 (0,003)	-
P-PO ₄ ³⁺ amostra bruta (%/mg/L)	-	52,2 (8,16)	99,0 (0,18)	-	95,3 (0,81)	-
P-PO ₄ ³⁺ amostra filtrada (%/mg/L)	-	* (5,86)	97,8 (0,12)	-	> 99,9 (0)	-

* Houve aumento do valor apresentado pela amostra da lagoa.

** Massa de lodo (mg lodo/L de esgoto flotado) gerada no processo de flotação, calculada através do procedimento descrito no item 4.5.2.

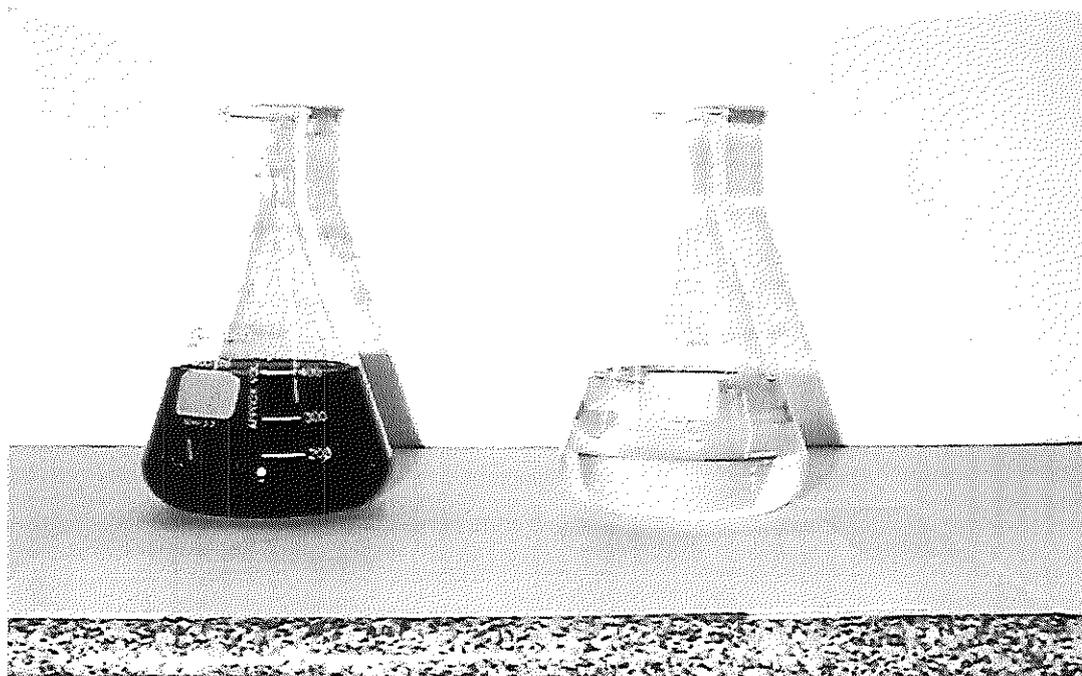
*** Nesse ensaio o SST da amostra do efluente da lagoa aerada foi de 245 mg/L; para os demais ensaios, o SST foi de 382,5 mg/L.

Obs.: 1) As porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente correspondem à amostra coletada em $V_{flot} = 15$ cm/min.;

2) As porcentagens de remoção de todos os outros parâmetros foram calculadas com base na amostra coletada em $V_{flot} = 10$ cm/min.;

3) ND = não detectado. Inclusive a amostra da lagoa aerada, afluente à flotação, apresentou valores de nitrito e nitrato não detectáveis.

Observando a FOTOGRAFIA 5.1, pode-se notar o contraste entre o efluente Tipo 4 e a amostra efluente ao processo de flotação, correspondente ao ensaio onde foi aplicada a dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico associada a 0,21 mg/L de polímero W 341, com a utilização de 7 g ar/m³ afluente.



FOTOGRAFIA 5.1 – Fotografia mostrando as amostras afluente e efluente ao processo de flotação, correspondentes ao ensaio onde foi aplicada a associação de 30 mg/L de cloreto férrico a 0,21 mg/L de polímero W 341, com 7 g ar/m³ afluente.

TABELA 5.39 – Resultados das determinações médias de DQO amostra bruta e SST, bem como leituras de pH, fornecidos pelos responsáveis pela operação da ETE – Piracicamirim. Os dados se referem às médias dos meses de outubro, novembro e dezembro de 1999, durante os quais foi realizado o presente trabalho.

	Entrada do UASB	Entrada da lagoa aerada	Saída da lagoa aerada	Saída dos decantadores
	Sólidos Suspensos Totais (SST), em mg/L			
Outubro	289	131	148	49
Novembro	282	143	105	39
Dezembro	214	115	129	34
	Demanda Química de Oxigênio (DQO), em mg/L			
Outubro	743	283	232	99
Novembro	723	314	183	96
Dezembro	571	237	194	91
	pH			
Outubro	6,9	6,9	7,0	7,1
Novembro	6,8	6,9	7,1	7,2
Dezembro	6,8	6,9	7,1	7,1

Analisando os resultados de remoção de SST, DQO, turbidez e cor, mostrados na TABELA 5.40, vê-se que o ensaio onde foi aplicado 80 mg/L de cloreto férrico isoladamente e quantidade de ar na flotação igual a 9 g ar/m³ afluente, apresentou melhores resultados quando comparado ao ensaio onde foi utilizada DCF = 40 mg/L e a mesma quantidade de ar (9 g ar/m³ afluente). Porém, quando se leva em conta a remoção de SST, nota-se que o ensaio realizado com aplicação de DCF = 40 mg/L apresentou resultado bem semelhante ao atingido com DCF = 80 mg/L (96,3% de remoção com DCF = 40 mg/L e 98,5% com DCF = 80 mg/L).

Porém, observando-se os resultados do ensaio realizado com DCF = 40 mg/L e 11 g ar/m³ afluente, nota-se que são bem semelhantes ou até melhores do que os fornecidos pelo ensaio com DCF = 80 mg/L e 9 g ar/m³ afluente. Inclusive as porcentagens de remoção de fosfato total, para as

primeiras condições citadas, tanto da amostra bruta (92,3%) quanto da filtrada (>99,9%), foram excelentes.

Portanto, quando se utilizou apenas cloreto férrico como coagulante e, levando-se em conta as condições do presente trabalho, ou seja, ensaios em escala de laboratório, com a utilização do Flotatest e alimentação por batelada, observa-se que as duas condições citadas (aplicação de DCF = 40 mg/L e 11 g ar/m³ afluente ou DCF = 80 mg/L e 9 g ar/m³ afluente) proporcionaram excelentes resultados na flotação. O critério de escolha entre a utilização de DCF = 40 mg/L e 11 g ar/m³ afluente ou DCF = 80 mg/L e 9 g ar/m³ afluente depende de qual parâmetro seja mais vantajoso economizar, dosagem de produto químico e minimização do lodo gerada ou energia utilizada para o fornecimento de ar.

Analisando os resultados fornecidos pelos ensaios onde foi aplicado o polímero W 341 isoladamente, vê-se que tanto para suspensões com alta concentração de SST como para suspensões diluídas, a utilização de uma dosagem próxima a 1,07 mg/L e fornecimento de ar igual a 9 g ar/m³ afluente pode fornecer resultados muito bons de remoção de SST, DQO, turbidez e cor. Pode-se salientar ainda que os resultados obtidos com dosagem muito próxima (DP = 0,96 mg/L) e a mesma quantidade de ar, foram ainda melhores considerando os parâmetros já citados, além de fornecer maior porcentagem de remoção de fosfato total (52,2% com DP = 0,96 mg/L e 26,3% com DP = 1,07 mg/L). Porém, com a aplicação do cloreto férrico isoladamente e da associação deste com o polímero, foram obtidos valores muito maiores de remoção de fosfato total (99,0% com DCF = 40 mg/L e 11 g ar/m³ afluente e 95,3% com DCF = 30 mg/L, DP = 0,21 mg/L e 7 g ar/m³ afluente), pois já foi dito que o polímero utilizado isoladamente não é eficiente na remoção desse parâmetro.

Para a associação do cloreto férrico com o polímero W 341, observa-se pela TABELA 5.40, que o ensaio realizado com a combinação de DCF = 20 mg/L, DP = 0,13 mg/L e 9 g ar/m³ afluente forneceu ótimos resultados na remoção de SST, DQO, turbidez e cor, tão bons quanto os fornecidos pela



associação de DCF = 30 mg/L, DP = 0,21 mg/L e 7 g ar/m³ afluente e maiores do que os obtidos em dois outros ensaios realizados com a associação, com aplicação de 9 g ar/m³ afluente, DCF = 20 mg/L e DP = 0,18 e 0,36 mg/L.

Apesar de ter sido utilizada uma quantidade ligeiramente maior de ar no ensaio realizado com DCF = 20 mg/L e DP = 0,71 mg/L (com a aplicação de 9 g ar/m³ afluente) e o quíntuplo da dosagem de polímero, para efluente da lagoa aerada possuindo SST igual a 609 mg/L, o ensaio onde foram aplicados DCF = 20 mg/L, DP = 0,13 mg/L e 7 g ar/m³ afluente, para efluente da lagoa aerada possuindo SST igual a 382,5 mg/L apresentou resultados de remoção de SST e turbidez maiores, e remoção de DQO apenas ligeiramente menor.

Quanto ao fosfato total, nota-se que o ensaio realizado com DCF = 20 mg/L, DP = 0,71 mg/L e 9 g ar/m³ afluente forneceu porcentagens de remoção desse parâmetro (remoção de 62,2% para amostra bruta e de 74,1% para amostra filtrada) bem menores que os obtidos no ensaio com aplicação de DCF = 30 mg/L, DP = 0,21 mg/L e 7 g ar/m³ afluente (remoção de 95,3% para amostra bruta e >99,9% para amostra filtrada).

Também pode ser observado na TABELA 5.40 que, para suspensões diluídas (SST < 600 mg/L), o parâmetro mais adequado para controle da flotação foi a quantidade de ar fornecida ao processo, expressa em g ar/m³ de afluente, sendo que o parâmetro A/S apresentou-se mais adequado nas situações em que a concentração de SST da amostra afluente era maior que 600 mg/L. Por exemplo: para os ensaios realizados com efluente da lagoa aerada contendo SST igual a 138,5 mg/L, vê-se que os valores de A/S foram todos muito elevados, bem acima da faixa recomendada por METCALF & EDDY (1991) de 0,005 a 0,06 mg ar/mg SST. Porém, as quantidades de ar fornecidas ao processo foram compatíveis e até baixas, quando comparadas à faixa recomendada para o tratamento de águas de abastecimento (6 a 12 g ar/m³ afluente) e à faixa de 16,6 a 19 g ar/m³ afluente utilizada por PENETRA *et al.*, (1998), com os quais foram obtidos

os melhores resultados na flotação de efluentes de reatores anaeróbios (UASB), com SST na faixa de 41 a 102 mg/L.

Entretanto, vê-se que nos ensaios realizados com efluente da lagoa aerada contendo SST igual a 609 mg/L, a razão A/S voltou ser um parâmetro adequado para o controle do processo, pois a quantidade de ar fornecida (9 g ar/m³ afluente) foi semelhante à utilizada nos demais ensaios de flotação onde a concentração de SST no efluente da lagoa era menor, sendo que A/S resultou num baixo valor (0,015 mg ar/mg SST), contido na faixa mencionada anteriormente.

TABELA 5.40 – Eficiências de remoção de SST, DQO amostra bruta, Turbidez e Cor Aparente, para os ensaios, referentes aos itens 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3, 4.8.4, 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3, com as condições (dosagem de polímero W 341, cloreto férrico e associação de cloreto férrico e polímero W 341 e razão A/S) que propiciaram os melhores resultados.

Concentração de SST no efluente da lagoa aerada (mg/L)	pH	Valores de A/S que resultaram em maiores eficiências de flotação	Quantidade de ar (g ar/m ³ afluente)	Dosagem de produto químico ** (mg/L)	Porcentagem de remoção de SST (mg/L)	Porcentagem de remoção de DQO (mg/L)	Porcentagem de remoção de Turbidez (mg/L)	Porcentagem de remoção de Cor Aparente (mg/L)	Porcentagem de remoção de P-PO ₄ ³⁺ amostra bruta (mg/L)	Porcentagem de remoção de P-PO ₄ ³⁺ amostra filtrada (mg/L)
245	7,09	0,037	9	0	81,6 (45,05)	69,9 (95,81)	75,9 (49,59)	46,6 (443,6)	-	-
245	7,09	0,037	9	DP = 0,54	89,8 (25,06)	74,9 (80,12)	85,2 (30,41)	59,9 (332,5)	-	-
245	7,09	0,037	9	DP = 1,08	88,3 (28,60)	76,7 (74,12)	87,2 (26,38)	66,9 (274,7)	-	-
245	7,09	0,087	9	DCF = 40	96,3 (9,08)	80,8 (61,15)	89,0 (22,56)	74,3 (213,64)	-	-
245	7,09	0,037	9	DCF = 80	98,5 (3,72)	92,0 (25,4)	98,1 (3,97)	90,2 (76,3)	-	-
245	7,09	0,037	9	DCF = 20 + DP = 0,18	91,1 (21,8)	85,8 (45,24)	91,4 (17,66)	76,4 (196,2)	-	-
245	7,09	0,087	9	DCF = 20 + DP = 0,36	92,8 (17,71)	86,8 (42,07)	92,9 (14,72)	79,8 (167,86)	-	-
609	7,09	0,015	9	DP = 1,07	89,8 (62,24)	90,9 (59,35)	85,9 (57,44)	-	26,3 (15,6)	7,9 (11,6)
609	7,09	0,015	9	DCF = 80	95,5 (27,25)	98,6 (10,68)	87,1 (52,32)	-	92,3 (1,27)	>99,9 (0)
609	7,09	0,015	9	DCF = 20 + DP = 0,71	95,2 (29,58)	92,1 (51,67)	84,8 (61,69)	-	62,2 (5,4)	74,1 (2,76)
382,5	7,14	0,017	7	DP = 0,32	87,1 (49,48)	77,7 (104,7)	80,3 (57,78)	74,0 (444,05)	-	-
382,5	7,14	0,017	7	DP = 0,96	86,4 (52,16)	84,1 (74,69)	83,3 (48,79)	78,9 (359,52)	-	-
382,5	7,14	0,021	9	DP = 0,96	95,0 (19,25)	87,3 (59,44)	90,0 (29,67)	84,6 (261,89)	52,2 (8,16)	*
382,5	7,14	0,025	11	DCF = 40	98,0 (6,92)	91,7 (38,73)	98,1 (5,58)	95,8 (71,93)	99,0 (0,18)	97,8 (0,12)
382,5	7,14	0,017	7	DCF = 20 + DP = 0,13	98,0 (9,36)	87,8 (57,35)	94,1 (17,33)	90,6 (160,5)	-	-
382,5	7,14	0,017	7	DCF = 30 + DP = 0,21	99,0 (4,01)	93,1 (32,21)	98,5 (4,26)	96,9 (53,5)	95,3 (0,81)	>99,9 (0)

- Não foi realizada a determinação.

* Houve aumento do fosfato dissolvido.

** DCF = Dosagem de Cloreto Férrico (mg/L); DP = Dosagem de Polímero (mg/L)

A título de especulação, foi construída a TABELA 5.41, onde são apresentados os valores estimados das eficiências de remoção de DQO, calculadas com base nas informações fornecidas pelos responsáveis pela operação da ETE – Piracicamirim (ver TABELA 5.39). Tais estimativas devem ser analisadas levando-se em conta novamente as condições do presente trabalho, ou seja, ensaios feitos em escala de laboratório, com utilização do Flotatest e alimentação por batelada.

Sendo assim, pela tabela vê-se que os ensaios onde foram utilizadas DP = 0,735 mg/L com quantidade de ar igual a 10 g ar/m³ afluente e DP = 0,54; 0,96 e 1,08 mg/L com 9 g ar/m³ afluente, forneceram ótimas porcentagens de remoção de DQO, todas bem próximas a 90%. Já a porcentagem de remoção de DQO obtida com DP = 0,96 mg/L e quantidade de ar igual a 7 g ar/m³ afluente (86,9%) foi um pouco menor que a fornecida pelo ensaio realizado com a mesma dosagem de polímero e 9 g ar/m³ afluente (89,6%).

A menor porcentagem de remoção foi obtida quando se utilizou DP = 0,32 mg/L com quantidade de ar igual a 7 g ar/m³ afluente (81,7%) e os melhores resultados foram alcançados nos ensaios onde foram utilizados DP = 1,47 mg/L e 12 g ar/m³ afluente e DP = 1,07 mg/L e A/S = 0,015 mg ar/mg SST.

Analisando agora os resultados obtidos nos ensaios onde se utilizou o cloreto férrico isoladamente (tanto para o afluente com SST igual a 245 mg/L quanto para o afluente com SST igual a 609 mg/L) vê-se que as maiores porcentagens de remoção foram obtidas com DCF = 80 mg/L, tanto para 9 g ar/m³ afluente quanto para A/S = 0,015 mg ar/mg SST, sendo ambas maiores que 96%. Já os ensaios realizados com aplicação de DCF = 40 mg/L forneceram resultados semelhantes ou até melhores que os obtidos com o polímero, numa faixa de 92% (91,5% e 93,2 % para DCF = 40 mg/L com 9 e 11 g ar/m³ afluente, respectivamente).

Quando se analisa a remoção de DQO obtida nos ensaios com o emprego da associação do cloreto férrico com o polímero W 341, nota-se

que a aplicação de DCF = 20 mg/L, DP = 0,18 e 0,36 mg/L e quantidade de ar igual a 9 g ar/m³ afluyente, bem como de DCF = 30 mg/L, DP = 0,21 mg/L e 7 g ar/m³ afluyente e DCF = 20 mg/L, DP = 0,71 mg/L e A/S = 0,015 mg ar/mg SST, forneceram ótimas porcentagens de remoção de DQO, todas maiores que 93%. O ensaio realizado com DCF = 20 mg/L, DP = 0,13 mg/L e 7 g ar/m³ afluyente forneceu 90% de remoção de DQO, também um ótimo resultado.

TABELA 5.41 – Estimativas das eficiências globais de remoção de DQO do sistema de tratamento sequencial "UASB + lagoa aerada + flotação", calculadas a partir dos valores de DQO da amostra bruta da entrada da ETE - Piracicamirim (entrada dos UASB)^{****}, correspondentes aos ensaios de flotação que forneceram os melhores resultados (correspondentes aos itens 4.7.2, 4.8.1, 4.8.2, 4.8.3, 4.8.4, 4.9.1, 4.9.2 e 4.9.3 do presente trabalho) e comparação com eficiência apresentada pelo decantador secundário, atualmente em funcionamento na ETE.

^{****} com base nos dados fornecidos pelos responsáveis pela operação da ETE – Piracicamirim (ver TABELA 5.39)

Dosagem de produto químico	pH	Valores de A/S que resultaram em maiores eficiências de flotação	Quantidade de ar (g ar/m ³ afluente)	Porcentagem de remoção de DQO (%/mg/L)
DP = 0,735	7,32	0,072	10	89,2 (80,2)*
DP = 0,735	7,32	0,087	12	90,9 (67,5)*
DP = 1,47	7,32	0,087	12	91,3 (64,6)*
DP = 0,54	7,09	0,037	9	88,9 (80,12)**
DP = 1,08	7,09	0,037	9	89,7 (74,12)**
DCF = 40	7,09	0,087	9	91,5 (61,15)**
DCF = 80	7,09	0,037	9	96,5 (25,4)**
DCF = 20 + DP = 0,18	7,09	0,037	9	93,7 (45,24)**
DCF = 20 + DP = 0,36	7,09	0,087	9	94,2 (42,07)**
DP = 1,07	7,09	0,015	9	91,8 (59,35)**
DCF = 80	7,09	0,015	9	96,2 (10,68)**
DCF = 20 + DP = 0,71	7,09	0,015	9	92,9 (51,67)**
DP = 0,32	7,14	0,017	7	81,7 (104,73)***
DP = 0,96	7,14	0,017	7	86,9 (74,69)***
DP = 0,96	7,14	0,021	9	89,6 (59,44)***
DCF = 40	7,14	0,025	11	93,2 (38,73)***
DCF = 20 + DP = 0,13	7,14	0,017	7	90,0 (57,35)***
DCF = 30 + DP = 0,21	7,14	0,017	7	94,4 (32,21)***

DCF = Dosagem de Cloreto Férrico (mg/L); DP = Dosagem de Polímero (mg/L).

*Dados da entrada dos UASB referentes ao mês de outubro ⇒ SST = 289,0 mg/L e DQO amostra bruta = 743,0 mg/L;

** Dados da entrada dos UASB referentes ao mês de novembro ⇒ SST = 282,0 mg/L e DQO amostra bruta = 723,0 mg/L;

*** Dados da entrada dos UASB referentes ao mês de dezembro ⇒ SST = 214,0 mg/L e DQO amostra bruta = 571,0 mg/L;

6 Conclusões e Recomendações

Apesar das limitações concernentes a ensaios realizados em regime de batelada e de não haver correlação direta entre as velocidades de flotação obtidas nesses tipos de ensaio com as taxas de aplicação superficial de unidades de flotação em escala real, os resultados da presente pesquisa nos permitem inferir o efeito de diferentes taxas de aplicação superficial na performance de unidades de flotação com escoamento contínuo.

Com base nos resultados obtidos durante a realização do presente trabalho, discutidos no capítulo anterior, no qual foi utilizado efluente da lagoa aerada da ETE – Piracicamirim (Piracicaba – SP), é possível concluir que:

- Nos ensaios de flotação realizados com instalação em escala de laboratório (Flotatest), alimentada efluente produzido no sistema de reator anaeróbio (UASB) seguido de lagoa aerada, com concentração de SST igual a 245 mg/L, em que foi fornecida quantidade de ar para a flotação igual a 9 g ar/m³ afluente, apresentou bons resultados de remoção de SST e DQO, mesmo sem o emprego de produtos químicos, ou seja, foram obtidas remoções de 81,6% (residual de 45,05 mg/L) de SST, 69,9% de DQO (residual de 95,81 mg/L), 75,9% de turbidez (residual de 49,59 uT) e 46,6% de cor aparente (residual de 443,6 uC). A aplicação de pequenas dosagens de polímero catiônico W 341 (faixa de 0,32 a 1,08 mg/L) e de quantidade de ar na faixa de 7 a 9 g ar/m³ afluente, para $Gf = 100 \text{ s}^{-1}$ e $Tf = 1 \text{ min}$. e SST do efluente da lagoa aerada na faixa de 245 a 609 mg/L, proporcionou melhora significativa no desempenho da flotação, tanto no que diz respeito à remoção de SST (faixa de 86,4 a 95,0%, residual de 52,16 a 19,25 mg/L), quanto à

remoção de DQO (faixa de 74,9 a 90,9%, residual de 80,12 a 59,35 mg/L), com pequena remoção de fosfato total (faixa de 26,3 a 52,2%, com residual de 15,6 a 8,16 mg/L).

- Nos ensaios de flotação realizados com o Flotateste, com a aplicação do cloreto férrico isoladamente, para dosagens na faixa de 40 a 80 mg/L, em que foi fornecida quantidade de ar para a flotação na faixa de 9 a 11 g ar/m³ afluente, para $G_{mr} = 800 \text{ s}^{-1}$, $T_{mr} = 30\text{s.}$, $G_f = 80 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 15 \text{ min.}$ e SST do efluente da lagoa aerada na faixa de 245 a 609 mg/L, obteve-se significativa melhora nas remoções de SST, DQO, turbidez e cor aparente. As faixas de remoção obtidas para esses parâmetros foram: remoção de SST de 95,5 a 98,5% (residual de 27,25 a 3,72 mg/L), remoção de DQO de 80,8 a 98,6% (residual de 61,15 a 10,68 mg/L), remoção de turbidez de 87,1 a 98,1% (residual de 52,32 a 3,97 uT) e remoção de cor aparente de 74,3 a 95,8% (residual de 213,64 a 71,93 uC). Além disso, observou-se melhora significativa na remoção de fosfato total (P-PO_4^{3+}), com resultados na faixa de 92,3 a 99,0% (residual de 1,27 a 0,18 mg/L) para a amostra não filtrada.
- Nos ensaios de flotação realizados com o Flotateste, com a aplicação da associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, as melhores condições foram obtidas para a dosagem de 20 mg/L de cloreto férrico associada a 0,13 mg/L de polímero e para a dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico associada a 0,21 mg/L de polímero, com o fornecimento de quantidade de ar para a flotação igual a 7 g ar/m³ afluente, para $G_{mr} = 800 \text{ s}^{-1}$, $T_{mr} = 30\text{s.}$, $G_f = 80 \text{ s}^{-1}$ e $T_f = 15 \text{ min.}$ e SST do efluente da lagoa igual a 382,5 mg/L. No 1º caso, foram obtidas porcentagens de remoção de 98,0% (residual de 9,36 mg/L) de SST, 87,8% (residual de 57,35 mg/L) de DQO, 94,1% (residual de 17,33 uT) de turbidez e 90,6% (residual de 160,5 uC) de cor aparente. No 2º caso, foram obtidas porcentagens de remoção de 99,0% (residual de 4,01 mg/L) de SST,

93,1% (residual de 32,31 mg/L) de DQO, 98,5% (residual de 4,26 uT) e 96,9% (residual de 53,5 uC) de cor aparente, além de promover a remoção de 95,3% de fosfato total (residual de 0,81 mg/L), referente à amostra não filtrada.

- Nos ensaios de clarificação por flotação realizados no presente trabalho verificou-se que, quando a concentração de SST da amostra afluente à flotação era maior que 600 mg/L, o parâmetro de controle mais adequado, relacionado à quantidade de ar dissolvido aplicada ao processo de flotação, foi a razão ar/sólidos (A/S), enquanto que, nas condições em que se tinha amostras de afluente mais diluídas em termos de SST, o parâmetro mais adequado foi a quantidade de ar expressa em g ar/m³ afluente. Para amostras com concentração de SST menores que 600 mg/L, os valores mais adequados de concentração de ar fornecidos ao processo de flotação permaneceram numa faixa de 7 a 11 g ar/m³ afluente, tanto nos ensaios sem aplicação de produto químico, quanto nos ensaios com aplicação dos diferentes produtos químicos investigados. Com relação às amostras com maior concentração de SST, os valores mais adequados de razão ar/sólidos (A/S) foram maiores que 0,015 (em massa).
- Recomenda-se, para o tipo proposto de tratamento de esgoto sanitário, que sejam realizados estudos relacionando a eficiência da flotação ao Índice Volumétrico de Lodo (IVL).

Esse trabalho é pioneiro no que diz respeito à utilização da flotação por ar dissolvido para a clarificação de efluente gerado em sistema de tratamento constituído de reator anaeróbio (UASB) seguido de reator aeróbio (lagoa aerada).

7. Referências Bibliográficas

ARNOLD, S. R.; GRUBB, T. P. & HARVEY, P. J. (1995). Recent Applications of Dissolved Air Flotation Pilot Studies and Full Scale Design. *Wat. Sci. & Tech.*, v.31, n. 3-4, pp. 327-40.

AWWA – APHA & WPCF (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater. A.E. GREENBERG; L. S. CLEESCERI & L. G. ANDREW; 18^a ed., New York, USA.

BRATBY, J. R. (1982). Treatment of Raw Wastewater Overflows by Dissolved-Air Flotation. *Journal WPCF*, v.54, n. 12, pp. 1558-65.

BRATBY, J. R. & MARAIS, G.v.R. (1976). A Guide for the Design of Dissolved-Air (Pressure) Flotation Systems for Activated Sludge Processes. *Water S.A.*, v.2, n. 2, pp. 87-100.

BRATBY, J. R. & AMBROSE, W. A. (1995). Design and Control of Flotation Thickeners. *Wat. Sci. & Tech.*, v.31, n. 3-4, pp. 247-61.

CAMPOS, J. R. (1989). *Remoção de DQO e de Nitrogênio em um Sistema de Três Reatores Biológicos de Filme Fixo em Série*. Tese (Livre-docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAMPOS, J. R.; REALI, M. A. P.; DOMBROSKI, S. A. G.; MARCHETTO, M. & LIMA, M. R. A. (1996). Tratamento Físico-Químico por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios. *XXV Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitária y Ambiental – AIDIS 96*, Novembro de 1996, México.

COLLINS, A. G.; CLARKSON, W. W. & VRONA, M. (1988). Fixed-Film Biological Nitrification of a Strong Industrial Waste. *Journal WPCF*, v.60, n. 4, pp. 499-504.

DROSTE, R. L. (1997). Theory and practice of water and wastewater treatment. USA, John Wiley & Sons, Inc.

EDZWALD, J. K.; WALSH, J. P.; KAMINSKI, G. S. & DUNN, H. J. (1992). Flocculation and Air Requirements for Dissolved Air Flotation. *Journal AWWA*, pp. 92-100.

EDZWALD, J. K. (1993). Algae, Bubbles, Coagulants, and Dissolved Air Flotation. *Wat. Sci. & Tech.*, v.27, n. 10, pp. 67-81.

EDZWALD, J. K. (1995). Principles and Applications of Dissolved Air Flotation. *Wat. Sci. & Tech.*, v.31, n. 3-4, pp. 1-23.

ESTEVEZ, F. A. (1988). *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro, ed. Interciência Ltda. Cap. 13 e 14, p. 197-236: Nitrogênio e Fósforo.

FORESTI, E. (1996). "Parâmetros Determinantes no Projeto de Unidades de Tratamento Biológico". Texto da Disciplina Processos e Operações em Tratamento de Resíduos – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GOCHIN, R. J. & SOLARI, J. (1983). The Role of Hydrophobicity in Dissolved Air Flotation. *Water Res.*, v.17, n. 6, pp. 651-57.

GREGORY, J. (1976). The Effect of Cationic Polymers on the Colloidal Stability of Latex Particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.55, n. 1, pp. 35-44.

GREGORY, J. (1993). The Role of Colloid Interactions in Solid-Liquid Separation. *Wat. Sci. & Tech.*, v.27, n. 10, pp. 1-17.

HO, C. C. & TAN, Y. K. (1989). Comparison of Chemical Flocculation and Dissolved Air Flotation of Anaerobically Treated Palm Oil Mill Effluent. *Water Research*, v.23, n. 4, pp. 395-400.

HYDE, R. A.; MILLER, D. G.; PACKHAM, R. F. & RICHARDS, W. N. (1977). Water Clarification by Flotation. *Journal AWWA*, v.69, pp. 369-74.

JOHNSON, E. N. & AMIRTHARAJAH, A. (1983). Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants. *Journal AWWA*, pp. 232-39.

KIEFHABER, K. P.; NEIS, U. & WEBER, J. (1982). Flotation as the Final Treatment Step in Wastewater Treatment and its Influence on the Oxygen Balance of Receiving Waters. *Wat. Sci. & Tech.*, v.14, pp. 1519-20.

KITCHENER, J. A. (1972). Principles of Action of Polymeric Flocculants. *Br. Polym. J.*, v.4, pp. 217-29.

KLUTE, R.; LANGER, S. & PFEIFER, R. (1995). Optimization of Coagulation Processes Prior to DAF. *Wat. Sci. & Tech.*, v.31, n. 3-4, pp. 59-62.

KROFTA, M.; MISKOVIC, D & BURGESS, D. (1995). Primary-Secondary Flotation of Three Municipal Wastewaters: Pilot-Scale Study. *Wat. Sci. & Tech.*, v.31, n. 3-4, pp. 295-98.

LU, S. (1991). Hydrophobic Interaction in Flocculation and Flotation 3. Role of Hydrophobic Interaction in Particle-Bubble Attachment. *Colloids and Surfaces*, v.57, pp. 73-81.

MALLEY, J. P. & EDZWALD, J. K. (1991)a. Concepts for Dissolved-Air Flotation Treatment of Drinking Waters. *J. Water SRT - Aqua*, v.40, n. 1, pp. 7-17.

MALLEY, J. P. & EDZWALD, J. K. (1991)b. Laboratory Comparison of DAF with Conventional Treatment. *Journal AWWA*, pp. 56-61.

MENNELL, M; MERRILL, D. T. & JORDEN, R. M. (1974). Treatment of Primary Effluent by Lime Precipitation and Dissolved Air Flotation. *Journal WPCF*, v.46, n. 11, pp. 2471-85.

METCALF & EDDY (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. McGraw-Hill, 3rd edition, 1334p.

NESBITT, J. B. (1969). Phosphorus Removal – The State of the Art. *Journal WPCF*, v.41, n. 5, pp. 701-13.

ØDEGAARD, H. (1979). Chemical Flocc Formation in Wastewater Treatment – An Introduction. *Prog. Wat. Tech.*, Supl. 1, pp. 103-110, Pergamon Press.

ØDEGAARD, H. (1995). Optimization of Flocculation/Flotation in Chemical Wastewater Treatment. *Wat. Sci. & Tech.*, v.31, n. 3-4, pp. 73-82.

PASSIG, F.; VILLELA, L. & FERREIRA, O. P. (1998). ETE–Piracicamirim – Nova Concepção de Sistema de Tratamento de Esgotos Sanitários – Partida, Operação e Monitoramento de Desempenho. *20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 10 a 14 de maio de 1999, Rio de Janeiro. Anais Digitais, Rio de Janeiro: ABES, 1999 – p. 567-574.

PENETRA, R. G. (1998). *Pós-Tratamento Físico-Químico por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo (UASB)*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PENETRA, R. G.; REALI, M. A. P. & CAMPOS, J. R. (1998). Influência da Quantidade de Ar Fornecida no Pós-Tratamento por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios UASB. *20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 10 a 14 de maio de 1999, Rio de Janeiro. Anais Digitais, Rio de Janeiro: ABES, 1999 – p. 192-199.

PENETRA, R. G.; REALI, M. A. P.; FORESTI, E. & CAMPOS, J. R. (1999). Post-Treatment of Effluents from Anaerobic Reactor Treating Domestic Sewage by Dissolved-Air Flotation. *Wat. Sci. & Tech.*, v.40, n. 8, pp. 137-43.

POUET, M. F. & GRASMICK, A. (1995). Urban Wastewater Treatment by Electrocoagulation and Flotation. *Wat. Sci. & Tech.*, v.31, n. 3-4, pp. 275-83.

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

REALI, M. A. P.; PENETRA, R. G. & CAMPOS, J. R. (1998). Influência da Flocculação na Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios (UASB). *XXVI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIDIS 98*, Novembro de 1998, Lima, Peru.

RÖSKE, I. & SCHÖNBORN, C. (1994). Interactions Between Chemical and Advanced Biological Phosphorus Elimination. *Wat. Res.*, v.28, n. 5, pp. 1103-09.

SARTORI, L. (1998). *Influência do Uso de Polímeros Sintéticos no Desempenho da Flotação por Ar Dissolvido Aplicada no Tratamento de Água para Abastecimento*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SCHOFIELD, T.; PERKINS, R. & SIMMS, J. S. (1991). Frankley Water-Treatment Works Redevelopment: Pilot-Scale Studies. *J.IWEM*, v.5, pp. 370-80.

SUTMAN, F. J. (1996). An Evaluation of DAF Clarification Laboratory Test Methods. *Tappi Journal*, v.79, n. 7, pp. 135-48.

VIITASAARI, M.; JOKELA, P. & HEINÄNEN, J. (1995). Dissolved Air Flotation in the Treatment of Industrial Wastewaters with a Special Emphasis on Forest and Foodstuff Industries. *Wat. Sci. & Tech.*, v.31, n. 3-4, pp. 299-313.

XIE, W.; KONDO, M. & NAITO, Y. (1994). Study on Phosphorus Removal Using a New Coagulation System. *Wat. Sci. & Tech.*, v.30, n. 6, pp. 257-62.

ZABEL, T. (1985). The Advantages of Dissolved-Air Flotation for Water Treatment. *Journal AWWA*, pp. 42-46.

APÊNDICE

TABELA 1 – Resultados obtidos nas duas baterias de ensaios preliminares de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotateste), para escolha de 4 polímeros dentre 21 testados (item 4.6), em função do tipo de polímero. **Dosagem de polímero: 4,0 mg/L**; velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 600 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 60 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 20 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa; fração de recirculação (R) = 20% (em volume). Características do efluente do RALEX para 1ª bateria de ensaios: Turbidez = 95,3 uT; DQO bruta = 261 mg/L; DQO filtrada = 60 mg/L; pH = 6,59; Temperatura = 22,0 ± 1 °C. Características do efluente do RALEX para 2ª bateria de ensaios: Turbidez = 62,3 uT; DQO bruta = 132,3 mg/L; DQO filtrada = 31,8 mg/L; pH = 6,62; Temperatura = 24,2 ± 1 °C.

Tipo de Polímero	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100								
1ª BATERIA DE ENSAIOS – 10 POLÍMEROS TESTADOS										
W301	41,04	56,9	39,24	58,8	37,68	60,5	35,4	62,9	34,08	64,2
W302	42,60	55,3	40,56	57,4	37,20	61,0	34,44	63,9	32,52	65,9
W303	46,92	50,8	41,28	56,7	40,32	57,7	36,84	61,3	33,0	65,4
W320	47,28	50,4	44,28	53,5	41,04	56,9	37,08	61,1	32,4	66,0
W341	23,64	75,2	21,60	77,3	20,28	78,7	18,48	80,6	17,64	81,5
W360	24,36	74,4	23,88	74,9	21,96	77,0	21,72	77,2	20,88	78,1
W360C	21,48	77,4	20,64	78,3	19,2	79,9	19,2	79,9	16,5	79,2
W3076	34,8	63,5	31,68	66,8	30,48	68,0	28,8	69,8	30,36	68,1
W3081	26,16	72,5	24,84	73,9	22,92	75,9	21,36	77,6	21,36	77,6
G9049	27,48	71,2	17,88	81,2	15,36	83,9	15,84	83,4	15,36	83,9
2ª BATERIA DE ENSAIOS – 12 POLÍMEROS TESTADOS										
G991	46,92	24,7	44,64	28,4	39,72	36,3	37,44	39,9	33,24	46,7
G992	14,04	77,5	14,04	77,5	13,8	77,9	14,04	77,5	14,04	77,5
G997	46,68	25,1	47,28	24,1	41,28	33,8	38,52	38,2	34,56	44,6
G998	44,28	29,0	40,32	35,3	38,52	38,2	37,92	39,2	35,52	43,0
G999	43,92	29,5	39,84	36,1	38,52	38,2	36,48	41,5	33,72	45,9
G3055	43,8	29,7	42,24	32,2	40,68	34,7	36,96	40,7	32,76	47,7
G9046	14,88	76,1	12,36	80,2	12,24	80,4	12,6	79,8	13,08	79,0
G9047	14,16	77,3	14,88	76,1	13,08	79,0	14,16	77,3	14,64	76,5
G9048	15,0	75,9	14,76	76,3	14,04	77,5	13,56	78,2	13,68	78,1
G9049	34,08	45,3	30,12	51,7	31,08	50,1	32,52	47,8	27,24	56,3
G9050	45,24	27,4	45,96	26,3	40,8	34,5	39,0	37,4	35,04	43,8
G9052	43,44	30,3	44,64	28,4	40,08	35,7	36,96	40,7	35,76	42,6

TABELA 2 – Resultados obtidos nas duas baterias de ensaios preliminares de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotateste), para escolha de 4 polímeros dentre 21 testados (item 4.6), em função do tipo de polímero. **Dosagem de polímero: 4,0 mg/L**; velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 600 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 60 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 20 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa; fração de recirculação (R) = 20% (em volume). Características do efluente do RALEX para 1ª bateria de ensaios: Turbidez = 95,3 uT; DQO bruta = 261 mg/L; DQO filtrada = 60 mg/L; pH = 6,59; Temperatura = 22,0 ± 1 °C. Características do efluente do RALEX para 2ª bateria de ensaios: Turbidez = 62,3 uT; DQO bruta = 132,3 mg/L; DQO filtrada = 31,8 mg/L; pH = 6,62; Temperatura = 24,2 ± 1 °C.

Tipo de Polímero	DQO bruta Remanescente (mg/L)	$(1 - \text{DQO}/\text{DQO0}) \cdot 100$	Tipo de Polímero	DQO filtrada Remanescente (mg/L)	$(1 - \text{DQO}/\text{DQO0}) \cdot 100$
W301	120,0	54,0	W301	55,2	8,0
W302	112,8	56,8	W302	52,8	12,0
W303	116,4	55,4	W303	46,8	22,0
W320	120,0	54,0	W320	69,6	-
W341	82,8	68,3	W341	51,6	14,0
W360	86,4	66,9	W360	49,2	18,0
W360C	82,8	68,3	W360C	48,0	20,0
W3076	102,0	60,9	W3076	46,8	22,0
W3081	88,8	66,0	W3081	44,4	26,0
G9049	64,8	72,3	G9049	31,2	48,0
Tipo de Polímero	DQO bruta Remanescente (mg/L)	$(1 - \text{DQO}/\text{DQO0}) \cdot 100$	Tipo de Polímero	DQO filtrada Remanescente (mg/L)	$(1 - \text{DQO}/\text{DQO0}) \cdot 100$
G991	95,64	27,7	G991	42,96	-
G992	39,36	70,3	G992	29,28	7,9
G997	99,24	25,0	G997	38,76	-
G998	96,48	27,1	G998	34,56	-
G999	95,04	28,2	G999	39,60	-
G3055	96,72	26,9	G3055	31,56	0,8
G9046	40,92	69,1	G9046	26,40	17,0
G9047	41,76	68,4	G9047	59,52	-
G9048	57,72	56,4	G9048	18,60	41,5
G9049	81,48	38,4	G9049	34,20	-
G9050	93,0	29,7	G9050	37,56	-
G9052	97,68	26,2	G9052	36,12	-

TABELA 3 – Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para os 4 polímeros testados no item 4.7.1, em função da dosagem de polímero. *Dosagens de polímero testadas: 0; 0,094; 0,189; 0,282; 0,376 e 0,564 mg/L (0; 0,65; 1,30; 1,95; 2,60 e 3,90 g/Kg SST)*. Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa; fração de recirculação (R) = 40% (em volume). Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 107 uT; Cor Aparente = 815 uT; DQO bruta = 234 mg/L; SST = 145 mg/L; pH = 7,32; Temperatura = 22,5 ± 1 °C.

Dosagem de Polímero (mg/L)	Dosagem de Polímero (g/Kg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
		Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100								
0	0	47,58	55,5	23,92	77,6	11,60	89,2	10,76	89,9	7,40	93,1
POLÍMERO G 9046											
0,094	0,65	16,64	84,4	13,70	87,2	12,58	88,2	10,62	90,1	10,20	90,5
0,189	1,30	13,14	87,7	8,80	91,8	9,50	91,1	7,12	93,3	7,40	93,1
0,282	1,95	22,66	78,8	14,68	86,3	8,66	91,9	6,70	93,7	6,70	93,7
0,376	2,60	25,88	75,8	14,54	86,4	8,24	92,3	8,66	91,9	9,50	91,1
0,564	3,90	19,02	82,2	9,64	91,0	7,54	93,0	6,84	93,6	6,98	93,5
POLÍMERO G 9049											
0,094	0,65	18,32	82,9	13,42	87,5	10,76	89,9	8,24	92,3	8,80	91,8
0,189	1,30	17,48	83,7	11,74	89,0	9,92	90,7	8,80	91,8	8,10	92,4
0,282	1,95	28,82	73,1	12,16	88,6	7,40	93,1	5,58	94,8	6,84	93,6
0,376	2,60	27,56	74,2	13,14	87,7	8,94	91,6	7,12	93,3	6,70	93,7
0,564	3,90	29,52	72,4	11,18	89,6	8,24	92,3	7,68	92,8	6,42	94,0
POLÍMERO W 360 C											
0,094	0,65	17,62	83,5	11,74	89,0	10,34	90,3	9,64	91,0	8,38	92,2
0,189	1,30	20,28	81,0	11,04	89,7	8,66	91,9	6,98	93,5	6,70	93,7
0,282	1,95	27,0	74,8	15,38	85,6	10,06	90,6	8,52	92,0	7,82	92,7
0,376	2,60	17,34	83,8	12,58	88,2	10,76	89,9	8,24	92,3	7,26	93,2
0,564	3,90	24,06	77,5	12,3	88,5	6,98	93,5	6,14	94,3	6,28	94,1
POLÍMERO W 341											
0,094	0,65	18,32	82,9	13,28	87,6	10,90	89,8	8,10	92,4	7,54	93,0
0,189	1,30	22,66	78,8	11,74	89,0	7,54	93,0	5,30	95,0	6,28	94,1
0,282	1,95	23,92	77,6	12,44	88,4	5,16	95,2	7,12	93,3	6,98	93,5
0,376	2,60	14,12	86,8	11,32	89,4	10,06	90,6	7,40	93,1	9,22	91,4
0,564	3,90	16,64	84,4	12,30	88,5	7,96	92,6	7,26	93,2	6,84	93,6

TABELA 4 – Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para os 4 polímeros testados no item 4.7.1, em função da dosagem de polímero. **Dosagens de polímero testadas: 0; 0,094; 0,189; 0,282; 0,376 e 0,564 mg/L (0; 0,65; 1,30; 1,95; 2,60 e 3,90 g/Kg SST).** Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa; fração de recirculação (R) = 40% (em volume). Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 107 uT; Cor Aparente = 815 uT; DQO bruta = 234 mg/L; SST = 145 mg/L; pH = 7,32; Temperatura = 22,5 ± 1 °C.

Dosagem de Polímero (mg/L)	Dosagem de Polímero (g/Kg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
		Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100
0	0	427,6	47,5	282,0	65,4	248,4	69,5	199,4	75,5	184,0	77,4
POLÍMERO G 9046											
0,094	0,65	221,8	72,8	171,4	79,0	188,2	76,9	191,0	76,6	186,8	77,1
0,189	1,30	226,0	72,3	206,4	74,7	182,6	77,6	175,6	78,5	181,2	77,8
0,282	1,95	291,8	64,2	221,8	72,8	195,2	76,0	186,8	77,1	179,8	77,9
0,376	2,60	258,2	68,3	226,0	72,3	199,4	75,5	170,0	79,1	185,4	77,3
0,564	3,90	251,2	69,2	181,2	77,8	182,6	77,6	172,8	78,8	157,4	80,7
POLÍMERO G 9049											
0,094	0,65	244,2	70,0	224,6	72,4	199,4	75,5	196,6	75,9	184,0	77,4
0,189	1,30	240,0	70,6	214,8	73,6	192,4	76,4	185,4	77,3	177,0	78,3
0,282	1,95	317,0	61,1	209,2	74,3	186,8	77,1	175,6	78,5	164,4	79,8
0,376	2,60	311,4	61,8	221,8	72,8	214,8	73,6	182,6	77,6	193,8	76,2
0,564	3,90	321,2	60,6	198,0	75,7	184,0	77,4	191,0	76,6	181,2	77,8
POLÍMERO W 360 C											
0,094	0,65	234,4	71,2	200,8	75,4	198,0	75,7	188,2	76,9	171,4	79,0
0,189	1,30	251,2	69,2	179,8	77,9	198,0	75,7	188,2	76,9	179,8	77,9
0,282	1,95	300,2	63,2	227,4	72,1	193,8	76,2	186,8	77,1	185,4	77,3
0,376	2,60	263,8	67,6	231,6	71,6	195,2	76,0	193,8	76,2	188,2	76,9
0,564	3,90	268,0	67,1	195,2	76,0	184,0	77,4	175,6	78,5	168,6	79,3
POLÍMERO W 341											
0,094	0,65	240,0	70,6	219,0	73,1	195,2	76,0	181,2	77,8	170,0	79,1
0,189	1,30	268,0	67,1	200,8	75,4	184,0	77,4	184,0	77,4	178,4	78,1
0,282	1,95	300,2	63,2	238,6	70,7	186,8	77,1	175,6	78,5	168,6	79,3
0,376	2,60	242,8	70,2	223,2	72,6	196,6	75,9	192,4	76,4	199,4	75,5
0,564	3,90	272,2	66,6	210,6	74,2	175,6	78,5	181,2	77,8	174,2	78,6

TABELA 5 – Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para os 4 polímeros testados no item 4.7.1, em função da dosagem de polímero. **Dosagens de polímero testadas: 0; 0,094; 0,189; 0,282; 0,376 e 0,564 mg/L** (0; 0,65; 1,30; 1,95; 2,60 e 3,90 g/Kg SST). Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa; fração de recirculação (R) = 40% (em volume). Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 107 uT; Cor Aparente = 815 uT; DQO bruta = 234 mg/L; SST = 145 mg/L; SSF = 35 mg/L; SSV = 110 mg/L; pH = 7,32; Temperatura = 22,5 ± 1 °C.

Dosagem de Polímero (mg/L)	Dosagem de Polímero (g/Kg SST)	G 9046		G 9049		W 360 C		W 341	
		SS remanescente (mg/L)	(1-SS/SS0) * 100						
SST (mg/L)									
0	0	44,5	69,0						
0,094	0,65	30,5	79,0	18,5	87,0	30,5	79,0	40,5	72,0
0,189	1,30	70,5	51,0	46,5	68,0	65,5	55,0	56,2	61,0
0,282	1,95	34,0	77,0	6,5	96,0	18,3	87,0	4,5	97,0
0,376	2,60	26,5	82,0	2,5	98,0	2,5	98,0	12,5	91,0
0,564	3,90	41,0	72,0	52,5	64,0	18,5	87,0	0,5	>99,9
SSF (mg/L)									
0	0	2,6	93,0						
0,094	0,65	5,5	84,0	3,6	90,0	5,5	84,0	1,5	96,0
0,189	1,30	-	-	1,5	96,0	4,1	88,0	0	>99,9
0,282	1,95	8,3	76,0	0	>99,9	3,0	91,0	0	>99,9
0,376	2,60	17,6	50,0	1,9	95,0	0	>99,9	3,6	90,0
0,564	3,90	-	-	3,6	90,0	17,6	-	3,6	90,0
SSV (mg/L)									
0	0	36,8	67,0						
0,094	0,65	25,0	77,0	15,0	86,0	25,0	77,0	39,0	65,0
0,189	1,30	-	-	45,0	59,0	61,3	44,0	56,7	48,0
0,282	1,95	25,8	77,0	7,0	94,0	15,3	86,0	5,0	95,0
0,376	2,60	9,0	92,0	0,7	99,0	3,0	97,0	9,0	92,0
0,564	3,90	-	-	49,0	55,0	1,0	99,0	-	-

TABELA 6 – Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para os 4 polímeros testados no item 4.7.1, em função da dosagem de polímero. **Dosagens de polímero testadas: 0; 0,094; 0,189; 0,282; 0,376 e 0,564 mg/L (0; 0,65; 1,30; 1,95; 2,60 e 3,90 g/Kg SST).** Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa; fração de recirculação (R) = 40% (em volume). Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 107 uT; Cor Aparente = 815 uT; DQO bruta = 234 mg/L; SST = 145 mg/L; DQO filtrada = 127 mg/L; pH = 7,32; Temperatura = 22,5 ± 1 °C.

Dosagem de Polímero (mg/L)	Dosagem de Polímero (g/Kg SST)	G 9046		G 9049		W 360 C		W 341	
		DQO remanescente (mg/L)	(1-DQO/DQO0) * 100						
DQO bruta (mg/L)									
0	0	69,2	70,5						
0,094	0,65	41,2	82,4	44,7	80,9	48,2	79,4	41,2	82,4
0,189	1,30	55,2	76,5	48,2	79,4	62,2	73,5	76,2	67,5
0,282	1,95	65,7	72,0	86,7	63,0	62,2	73,5	69,2	70,5
0,376	2,60	69,2	70,5	65,7	72,0	69,2	70,5	62,2	73,5
0,564	3,90	58,7	75,0	83,2	64,5	62,2	73,5	62,2	73,5
DQO filtrada (mg/L)									
0	0	40,7	68,0						
0,094	0,65	93,2	26,7	23,3	81,7	54,7	57,0	180,6	-
0,189	1,30	51,2	59,7	61,7	51,5	51,2	59,7	37,2	70,7
0,282	1,95	82,7	35,0	51,2	59,7	68,7	46,0	44,2	65,2
0,376	2,60	37,2	70,7	58,2	54,2	44,2	65,2	61,7	51,5
0,564	3,90	58,2	54,2	33,7	73,5	30,2	76,2	37,2	70,7

TABELA 7 – Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341 testado no item 4.7.2, em função da dosagem de polímero. **Dosagens do polímero testadas: 0; 0,735; 1,47 e 2,21 mg/L (0; 5,30; 10,60 e 15,90 g/Kg SST).** Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 279 uT; DQO bruta = 347 mg/L; SST = 138,5 mg/L; pH = 7,32; Temperatura = 22,5 ± 1 °C.

Dosagem de Polímero (mg/L)	Dosagem de Polímero (g/Kg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
		Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100								
A/S = 0,035 mg ar/mg SST (5 g ar/m ³ afluyente)											
0,735	5,30	179,9	35,5	141,1	49,1	108,5	61,1	62,62	77,6	49,49	82,3
1,47	10,60	171,5	38,5	130,6	53,2	111,6	60,0	69,6	75,1	49,6	82,2
2,21	15,90	145,3	47,9	111,6	60,0	91,49	67,2	54,95	80,3	48,96	82,5
A/S = 0,053 mg ar/mg SST (7 g ar/m ³ afluyente)											
0	0	197,0	29,4	150,9	43,9	83,82	70,0	50,88	81,8	32,64	88,3
0,735	5,30	142,3	49,0	141,2	49,4	112,6	59,8	58,28	79,1	42,3	84,9
1,47	10,60	109,0	60,9	88,76	68,2	69,12	75,2	29,31	89,5	16,33	94,1
2,21	15,90	94,44	66,1	74,81	73,2	46,16	83,5	27,27	90,2	14,51	94,8
A/S = 0,072 mg ar/mg SST (10 g ar/m ³ afluyente)											
0	0	122,9	56,0	96,61	65,4	59,75	78,6	31,26	88,8	20,36	92,7
0,735	5,30	67,23	75,9	32,69	88,3	24,33	91,3	21,80	92,2	14,1	95,0
1,47	10,60	58,33	79,1	48,94	82,5	33,38	88,0	23,69	91,5	18,44	93,4
2,21	15,90	54,19	80,6	50,66	81,8	28,13	89,9	22,68	91,9	14,50	94,8
A/S = 0,087 mg ar/mg SST (12 g ar/m ³ afluyente)											
0	0	133,2	52,3	128,1	54,1	86,11	69,1	81,15	70,9	79,63	71,5
0,735	5,30	59,98	78,5	39,14	86,0	20,44	92,7	17,98	93,6	14,28	94,9
1,47	10,60	49,78	82,2	28,95	89,6	24,58	91,2	16,18	94,2	11,14	96,0
2,21	15,90	47,77	82,9	34,66	87,6	22,12	92,1	19,54	93,0	11,93	95,7

TABELA 8 – Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341 testado no item 4.7.2, em função da dosagem de polímero. *Dosagens do polímero testadas: 0; 0,735; 1,47 e 2,21 mg/L (0; 5,30; 10,60 e 15,90 g/Kg SST).* Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; pressão de saturação (P_{sat}) = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 279 uT; DQO bruta = 347 mg/L; SST = 138,5 mg/L; pH = 7,32; Temperatura = 22,5 ± 1 °C.

Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)	Dosagem de Polímero W 341 (g/Kg SST)	SST Remanescente (mg/L)	(1-SST/SST0) * 100	SST Remanescente (mg/L)	(1-SST/SST0) * 100	SST Remanescente (mg/L)	(1-SST/SST0) * 100	SST Remanescente (mg/L)	(1-SST/SST0) * 100
		0,035 mg ar/mg SST (5 g ar/m ³ afluente)		0,053 mg ar/mg SST (7 g ar/m ³ afluente)		0,072 mg ar/mg SST (10 g ar/m ³ afluente)		0,087 mg ar/mg SST (12 g ar/m ³ afluente)	
0	0	-	-	92,70	33,0	57,80	58,0	127,40	8,0
0,735	5,30	112,30	19,0	105,90	24,0	41,20	70,0	34,80	75,0
1,47	10,60	124,60	10,0	53,90	61,0	42,80	69,0	31,60	77,0
2,21	15,90	60,30	56,0	50,20	64,0	40,90	70,0	37,80	73,0
Dosagem de Polímero W 341 (mg/L)	Dosagem de Polímero W 341 (g/Kg SST)	DQO Remanescente (mg/L)	(1-DQO/DQO0) * 100	DQO Remanescente (mg/L)	(1-DQO/DQO0) * 100	DQO Remanescente (mg/L)	(1-DQO/DQO0) * 100	DQO Remanescente (mg/L)	(1-DQO/DQO0) * 100
		0,035 mg ar/mg SST (5 g ar/m ³ afluente)		0,053 mg ar/mg SST (7 g ar/m ³ afluente)		0,072 mg ar/mg SST (10 g ar/m ³ afluente)		0,087 mg ar/mg SST (12 g ar/m ³ afluente)	
0	0	-	-	142,40	59,0	114,70	67,0	159,60	51,7
0,735	5,30	163,0	53,0	150,70	56,6	80,20	76,9	67,50	80,5
1,47	10,60	144,20	58,4	109,10	68,6	85,90	75,2	64,60	81,4
2,21	15,90	149,60	56,9	92,50	73,3	68,70	80,2	73,40	78,8

TABELA 9 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341 (item 4.8.1), para o cloreto férrico (item 4.8.2) e para uma associação entre os dois (item 4.8.2), em função da dosagem de coagulante. *Dosagens do polímero testadas: 0,54; 1,08 e 1,62 mg/L (2,2; 4,4 e 6,6 g/Kg SST). Dosagens de cloreto férrico testadas: 20; 40; 60 e 80 mg/L. Dosagens polímero testadas para uma dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L: 0,09; 0,18; 0,27; 0,36; 0,45 e 0,54 mg/L (0,37; 0,74; 1,11; 1,48; 2,22; 2,96 g/Kg SST). A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente); Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Nos ensaios onde foi utilizado polímero = Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; Nos ensaios onde foi utilizado cloreto férrico = Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 206 uT; DQO bruta = 319 mg/L; SST = 245 mg/L; pH = 7,09; Temperatura = 24,8 ± 1 °C.*

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
		Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100								
0	0	93,63	54,5	72,16	65,0	49,59	75,9	33,35	83,8	24,74	88,0
ENSAIOS COM POLÍMERO W 341											
0,54	2,2	57,88	71,9	40,77	80,2	30,41	85,2	22,78	88,9	20,93	89,8
1,08	4,4	43,06	70,1	30,41	85,2	26,38	87,2	20,49	90,1	17,33	91,6
1,62	6,6	37,61	81,7	31,07	84,9	24,85	87,9	21,8	89,4	17,66	91,4
ENSAIOS COM CLORETO FÉRRICO											
20	-	167,9	18,5	75,21	63,5	57,66	72,0	27,80	86,5	9,30	95,5
40	-	44,04	78,6	26,27	87,2	22,56	89,0	8,93	95,7	4,26	97,9
60	-	40,55	80,3	26,81	87,0	11,01	94,7	3,74	98,2	2,80	98,6
80	-	16,35	92,1	7,88	96,2	3,97	98,1	1,87	99,1	3,03	98,5
ENSAIOS COM ASSOCIAÇÃO DE CLORETO FÉRRICO (20 mg/L) + POLÍMERO W 341											
0,09	0,37	69,43	66,3	47,96	76,7	44,25	78,5	22,56	89,0	6,87	96,7
0,18	0,74	35,21	82,9	18,97	90,9	17,66	91,4	7,66	96,3	6,14	97,0
0,27	1,11	41,53	79,8	24,74	88,0	22,24	89,2	7,35	96,4	5,06	97,5
0,36	1,48	43,38	78,9	22,24	89,2	14,72	92,9	7,13	96,5	5,52	97,3
0,45	2,22	94,29	54,2	59,19	71,3	24,74	88,0	14,06	93,2	7,31	96,4
0,54	2,96	38,80	81,2	21,36	89,6	13,95	93,2	6,34	96,9	5,66	97,3

TABELA 10 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341 (item 4.8.1), para o cloreto férrico (item 4.8.2) e para uma associação entre os dois (item 4.8.3), em função da dosagem de coagulante. **Dosagens do polímero testadas: 0,54; 1,08 e 1,62 mg/L (2,2; 4,4 e 6,6 g/Kg SST).** **Dosagens de cloreto férrico testadas: 20; 40; 60 e 80 mg/L.** **Dosagens polímero testadas para uma dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L: 0,09; 0,18; 0,27; 0,36; 0,45 e 0,54 mg/L (0,37; 0,74; 1,11; 1,48; 2,22; 2,96 g/Kg SST).** A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente); Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Nos ensaios onde foi utilizado polímero = Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; Nos ensaios onde foi utilizado cloreto férrico = Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 206 uT; DQO bruta = 319 mg/L; SST = 245 mg/L; pH = 7,09; Temperatura = 24,8 ± 1 °C.

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
		Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100
0	0	637,7	23,2	414,2	50,1	443,6	46,6	373,9	55,0	307,4	63,0
ENSAIOS COM POLÍMERO W 341											
0,54	2,2	456,7	45,0	376,1	54,7	332,5	59,9	284,5	65,7	245,3	70,5
1,08	4,4	365,2	56,0	306,3	63,1	274,7	66,9	261,6	68,5	231,1	72,2
1,62	6,6	371,7	55,2	317,2	61,8	286,7	65,5	267,1	67,8	243,1	70,7
ENSAIOS COM CLORETO FÉRRICO											
20	-	975,5	-	441,5	46,8	482,9	41,8	270,3	67,4	138,4	83,3
40	-	396,8	52,2	244,2	70,6	213,6	74,3	106,8	87,1	79,57	90,4
60	-	359,7	56,7	266,0	68,0	130,8	84,2	71,94	91,3	64,31	92,3
80	-	169,0	79,6	111,2	86,6	76,30	90,8	56,68	93,2	55,59	93,3
ENSAIOS COM ASSOCIAÇÃO DE CLORETO FÉRRICO (20 mg/L) + POLÍMERO W 341											
0,09	0,37	550,5	33,7	396,8	52,2	370,6	55,3	230,0	72,3	117,7	85,8
0,18	0,74	308,5	62,8	210,4	74,7	196,2	76,4	128,6	84,5	114,5	86,2
0,27	1,11	369,5	55,5	254,0	69,4	231,1	72,2	127,5	84,6	109,0	86,9
0,36	1,48	369,5	55,5	242,0	70,8	168,0	79,8	121,0	85,4	115,5	86,1
0,45	2,22	577,7	30,4	472,0	43,1	243,1	70,7	173,3	79,1	112,3	86,5
0,54	2,96	332,5	59,9	199,5	76,0	163,5	80,3	103,6	87,5	103,6	87,5

TABELA 11 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341 (item 4.8.1), para o cloreto férrico (item 4.8.2) e para uma associação entre os dois (item 4.8.3), em função da dosagem de coagulante. **Dosagens do polímero testadas: 0,54; 1,08 e 1,62 mg/L (2,2; 4,4 e 6,6 g/Kg SST).** **Dosagens de cloreto férrico testadas: 20; 40; 60 e 80 mg/L.** **Dosagens polímero testadas para uma dosagem fixa de cloreto férrico de 20 mg/L: 0,09; 0,18; 0,27; 0,36; 0,45 e 0,54 mg/L (0,37; 0,74; 1,11; 1,48; 2,22; 2,96 g/Kg SST).** A/S = 0,037 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente); Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Nos ensaios onde foi utilizado polímero = Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; Nos ensaios onde foi utilizado cloreto férrico = Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 206 uT; DQO bruta = 319 mg/L; SST = 245 mg/L; pH = 7,09; Temperatura = 24,8 ± 1 °C.

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	SST Remanescente (mg/L)	(1-SST/SST0) * 100	DQO Remanescente (mg/L)	(1-DQO/DQO0) * 100
0	0	45,05	81,6	95,81	69,9
ENSAIOS COM POLÍMERO W 341					
0,54	2,2	25,06	89,8	80,12	74,9
1,08	4,4	28,60	88,3	74,12	76,7
1,62	6,6	28,50	88,4	62,70	80,3
ENSAIOS COM CLORETO FÉRRICO					
20	-	47,69	80,5	77,50	75,7
40	-	9,08	96,3	61,15	80,8
60	-	4,84	98,0	49,60	84,4
80	-	3,72	98,5	25,40	92,0
ENSAIOS COM ASSOCIAÇÃO DE CLORETO FÉRRICO (20 mg/L) + POLÍMERO W 341					
0,09	0,37	24,78	89,9	68,23	78,6
0,18	0,74	21,80	91,1	45,24	85,8
0,27	1,11	46,71	80,9	44,69	86,0
0,36	1,48	17,71	92,8	42,07	86,8
0,45	2,22	27,25	88,9	62,13	80,5
0,54	2,96	10,38	95,8	53,52	83,2

TABELA 12 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341 (item 4.8.1) e para o cloreto férrico (item 4.8.2), em função da razão A/S. **A/S testados: 0,03 e 0,037 mg ar/mg SST (7 e 9 g ar/m³ afluente)**; Dosagem de polímero = 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST); Dosagem de cloreto férrico = 80 mg/L; Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Nos ensaios onde foi utilizado polímero = Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; Nos ensaios onde foi utilizado cloreto férrico = Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 206 uT; DQO bruta = 319 mg/L; SST = 245 mg/L; pH = 7,09; Temperatura = 24,8 ± 1 °C.

Razão A/S (mg ar/mg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100								
ENSAIOS COM POLÍMERO W 341										
0,03	54,72	73,4	39,46	80,9	30,52	85,2	23,0	88,8	18,31	91,9
0,037	43,06	79,1	30,41	85,2	26,38	87,2	20,49	90,1	17,33	91,6
ENSAIOS COM CLORETO FÉRRICO										
0,03	369,5	-	154,8	24,9	37,39	81,9	23,98	88,4	3,56	98,3
0,037	16,35	92,1	7,88	96,2	3,97	98,1	1,87	99,1	3,03	98,5
Razão A/S (mg ar/mg SST)	Cor Aparente Remanescente (uC)									
	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/CO) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/CO) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/CO) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/CO) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/CO) * 100
ENSAIOS COM POLÍMERO W 341										
0,03	418,1	49,6	374,1	54,9	307,7	62,9	266,9	67,8	243,3	70,7
0,037	365,2	56,0	306,3	63,1	274,7	66,9	261,6	68,5	231,1	72,2
ENSAIOS COM CLORETO FÉRRICO										
0,03	2021	-	862,9	-	305,5	63,2	231,6	72,1	71,82	91,3
0,037	169,0	79,6	111,2	86,6	76,3	90,8	56,68	93,2	55,59	93,3

TABELA 13 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotateste), para o polímero W 341 (item 4.8.1) e para o cloreto férrico (item 4.8.2), em função da razão A/S. **A/S testados: 0,03 e 0,037 mg ar/mg SST (7 e 9 g ar/m³ afluente)**; Dosagem de polímero = 1,08 mg/L (4,4 g/Kg SST); Dosagem de cloreto férrico = 80 mg/L; Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Nos ensaios onde foi utilizado polímero = Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; Nos ensaios onde foi utilizado cloreto férrico = Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 206 uT; DQO bruta = 319 mg/L; SST = 245 mg/L; pH = 7,09; Temperatura = 24,8 ± 1 °C.

Razão A/S (mg ar/mg SST)	SST Remanescente (mg/L)	(1- SST/SST0) * 100	DQO Remanescente (mg/L)	(1- DQO/DQO0) * 100
ENSAIOS COM POLÍMERO W 341				
0,03	34,84	85,8	72,25	77,3
0,037	28,61	88,3	74,12	76,7
ENSAIOS COM CLORETO FÉRRICO				
0,03	42,38	82,7	58,0	81,8
0,037	3,72	98,5	25,4	92,0

TABELA 14 – Resultados obtidos em ensaios de floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341, para o cloreto férrico e para uma associação entre os dois, testados no item 4.8.4. **Dosagem de polímero: 1,07 mg/L (1,75 g/Kg SST); Dosagem de cloreto férrico: 80 mg/L; Dosagem de cloreto + polímero = 20 mg/L + 0,71 mg/L (1,07 g/Kg SST); A/S testado: 0,015 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente);** Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Nos ensaios onde foi utilizado polímero = Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min.; Nos ensaios onde foi utilizado cloreto férrico = Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 450 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 407 uT; DQO bruta = 650 mg/L; SST = 609 mg/L; NTK = 79,96 mg/L; N-NH₄⁺ = 31,71 mg/L; NO₃⁻ = 0,38 mg/L; NO₂⁻ = 0; Ptotal bruto = 21,14 mg/L; Ptotal filtrado = 12,60 mg/L; pH = 7,09; Temperatura = 24,8 ± 1 °C.

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
		Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100								
ENSAIO COM POLÍMERO W 341											
1,07	1,75	102,2	74,9	82,51	79,7	57,44	85,9	38,48	90,6	25,51	93,7
ENSAIO COM CLORETO FÉRRICO											
80	-	300,8	26,1	105,7	74,0	52,32	87,1	7,70	98,1	1,84	99,6
ENSAIO COM ASSOCIAÇÃO DE CLORETO FÉRRICO (20 mg/L) + POLÍMERO W 341											
0,71	1,17	242,0	40,6	107,7	73,5	61,69	84,8	28,34	93,0	5,94	98,5

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	SST Remanescente (mg/L)	(1-SST/SST0) * 100	DQO Remanescente (mg/L)	(1-DQO/DQO0) * 100
ENSAIO COM POLÍMERO W 341					
1,07	1,75	62,24	89,8	59,35	90,9
ENSAIO COM CLORETO FÉRRICO					
80	-	27,25	95,5	10,68	98,6
ENSAIO COM ASSOCIAÇÃO DE CLORETO FÉRRICO (20 mg/L) + POLÍMERO W 341					
0,71	1,17	29,58	95,2	51,67	92,1

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	NTK (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	Fosfato Total (mg/L) Amostra bruta	Fosfato Total (mg/L) Amostra filtrada
ENSAIO COM POLÍMERO W 341							
1,07	1,75	39,3 (48,6)	5,7 (29,9)	66,4 (0,13)	0	26,3 (15,6)	7,9 (11,6)
ENSAIO COM CLORETO FÉRRICO							
80	-	58,1 (33,5)	3,3 (30,7)	87,9 (0,05)	0	92,3 (1,27)	>99,9 (0)
ENSAIO COM ASSOCIAÇÃO DE CLORETO FÉRRICO (20 mg/L) + POLÍMERO W 341							
0,71	1,17	66,5 (26,8)	* (32,4)	66,4 (0,13)	0	62,2 (5,4)	74,1 (2,76)

Obs.: o valor entre parênteses corresponde ao residual

TABELA 15 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341, (item 4.9.1). **Dosagens do polímero testadas: 0,32; 0,64 e 0,96 mg/L (0,83; 1,66 e 2,49 g/Kg SST)**. A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente); Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min.; Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min; pressão de saturação (Psat) = 400 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 293 uT; Cor Aparente = 1705 uC; DQO bruta = 469 mg/L; SST = 382,5 mg/L; pH = 7,14; Temperatura = 25,3 ± 1 °C.

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
		Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100								
0,32	0,83	108,1	63,1	94,59	67,7	57,78	80,3	44,62	84,8	35,95	87,7
0,64	1,66	156,2	46,7	111,3	62,0	83,78	71,4	63,56	78,3	38,63	86,8
0,96	2,49	71,26	75,7	62,06	78,8	48,79	83,3	41,94	85,7	25,15	91,4
Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100
0,32	0,83	663,4	61,1	652,7	61,7	444,1	74,0	472,9	72,3	310,3	81,8
0,64	1,66	1006	41,0	551,1	67,7	577,8	66,1	454,8	73,3	326,4	80,9
0,96	2,49	530,7	68,8	440,8	74,1	359,5	78,9	318,9	81,3	249,3	85,4
Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	SST Remanescente (mg/L)		(1-SST/SST0) * 100		DQO Remanescente (mg/L)		(1-DQO/DQO0) * 100			
0,32	0,83	49,48		87,1		104,43		77,7			
0,64	1,66	125,73		67,1		122,62		73,9			
0,96	2,49	52,16		86,4		74,69		84,1			

TABELA 16 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para a dosagem de 0,96 mg/L do polímero W 341, (item 4.9.1). *A/S testados : 0,012; 0,017; 0,021 e 0,025 mg ar/mg SST (5; 7; 9 e 11 g ar/m³ afluente)*; Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min.; Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min; pressão de saturação (Psat) = 400 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 293 uT; Cor Aparente = 1705 uC; DQO bruta = 469 mg/L; SST = 382,5 mg/L; pH = 7,14; Temperatura = 25,3 ± 1 °C.

A/S (mg ar/mg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100
0,012	83,10	71,6	71,52	75,6	50,48	82,8	45,45	85,5	30,65	89,5
0,017	58,53	80,0	44,19	84,9	36,17	87,7	26,86	90,8	21,72	92,6
0,021	48,79	83,3	41,08	86,0	29,67	90,0	24,12	91,8	18,91	93,5
0,025	40,28	86,3	30,88	89,5	25,45	91,3	19,48	93,4	16,27	94,4
A/S (mg ar/mg SST)	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100
0,012	489,8	71,3	481,4	71,8	405,5	76,2	343,4	79,9	286,6	84,2
0,017	331,7	80,5	337,1	80,2	300,7	82,4	266,4	84,4	212,9	87,5
0,021	392,3	77,0	334,7	80,4	261,9	84,6	236,9	86,1	195,6	88,5
0,025	349,7	79,5	288,8	83,1	252,3	85,2	218,0	87,2	199,2	88,3
A/S (mg ar/mg SST)	Fornecimento de ar (g ar/m ³ afluente)	SST Remanes- cente (mg/L)	(1- SST/SST0) * 100	DQO Remanes- cente (mg/L)	(1- DQO/DQO0) * 100					
0,012	5	46,08	88,0	103,33	78,0					
0,017	7	24,08	94,0	131,82	71,9					
0,021	9	19,25	95,0	59,44	87,3					
0,025	11	13,84	96,0	56,88	87,9					

TABELA 17 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para a dosagem de 40 mg/L de cloreto férrico (item 4.9.2). *A/S testados: 0,012; 0,017; 0,025 e 0,033 mg ar/mg SST (5; 7; 11 e 14 g ar/m³ afluyente)*; Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 400 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 293 uT; Cor Aparente = 1705 uC; DQO bruta = 469 mg/L; SST = 382,5 mg/L; pH = 7,14; Temperatura = 25,3 ± 1 °C.

A/S (mg ar/mg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100
0,012	336,0	-	225,4	23,1	119,0	59,4	62,04	78,8	17,06	94,2
0,017	163,7	44,1	58,53	80,0	21,83	92,6	8,35	97,2	2,78	99,1
0,025	21,69	92,6	12,62	95,7	5,58	98,1	2,47	99,2	2,67	99,1
0,033	16,19	94,5	7,36	97,5	4,05	98,6	2,87	99,0	2,80	99,0
A/S (mg ar/mg SST)	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100
0,012	1685	1,2	1332	21,8	674,1	60,5	437,1	74,4	154,8	90,9
0,017	979,1	42,6	434,4	74,5	153,0	91,0	85,6	95,0	49,22	97,1
0,025	187,0	89,0	117,3	93,1	71,93	95,8	49,8	97,1	47,59	97,2
0,033	148,2	91,3	75,24	95,6	58,14	96,6	49,02	97,1	47,88	97,2
A/S (mg ar/mg SST)	Fornecimento de ar (g ar/m ³ afluente)	SST Remanes- cente (mg/L)	(1- SST/SST0) * 100	DQO Remanes- cente (mg/L)	(1- DQO/DQO0) * 100					
0,012	5	96,12	75,0	127,87	72,8					
0,017	7	4,01	99,0	46,55	90,1					
0,025	11	6,92	98,0	38,73	91,7					
0,033	14	1,42	>99,9	51,41	89,0					

TABELA 18 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotateste), para a associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, (item 4.9.3). *Dosagens testadas: dosagem fixa de cloreto férrico = 20 mg/L + dosagem de polímero = 0,13; 0,26 e 0,39 mg/L (0,33; 0,66 e 0,99 g/Kg SST) e dosagem fixa de cloreto férrico = 30 mg/L + dosagem de polímero = 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST);* A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente); Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Nos ensaios onde foi utilizado polímero = Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min; Nos ensaios onde foi utilizado cloreto férrico = Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 400 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 293 uT; Cor Aparente = 1705 uC; DQO bruta = 469 mg/L; SST = 382,5 mg/L; pH = 7,14; Temperatura = 25,3 ± 1 °C.

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
		Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100								
20+ 0,13	20+ 0,33	40,66	86,1	27,93	90,5	17,33	94,1	9,95	96,6	8,0	97,3
20+ 0,26	20+ 0,66	37,13	87,3	21,83	92,6	13,38	95,4	7,42	97,5	4,76	98,4
20+ 0,39	20+ 0,99	74,04	74,7	67,95	76,8	42,27	85,6	20,44	93,0	5,08	98,3
30+ 0,21	30+ 0,54	24,93	91,5	15,62	94,7	7,49	97,4	5,35	98,2	3,20	98,9
Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100
20+ 0,13	20+ 0,33	316,7	81,4	231,1	86,4	160,5	90,6	112,4	93,4	98,44	94,2
20+ 0,26	20+ 0,66	286,8	83,2	192,6	88,7	135,9	92,0	87,74	94,9	74,9	95,6
20+ 0,39	20+ 0,99	531,8	68,8	467,6	72,6	332,8	80,5	177,6	89,6	70,62	95,9
30+ 0,21	30+ 0,54	215,1	87,4	145,5	91,5	84,53	95,0	56,71	96,7	52,43	96,9
Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	SST Remanescente (mg/L)		(1-SST/SST0) * 100		DQO Remanescente (mg/L)		(1-DQO/DQO0) * 100			
20 + 0,13	20 + 0,33	9,36		98,0		57,35		87,8			
20 + 0,26	20 + 0,66	9,36		98,0		49,43		89,5			
20 + 0,39	20 + 0,99	34,78		91,0		65,81		86,0			
30 + 0,21	30 + 0,54	8,03		98,0		48,26		89,7			

TABELA 19- Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para a associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, (item 4.9.3). **A/S testados = 0,012; 0,017 e 0,025 mg ar/mg SST (5; 7 e 11 g ar/m³ afluente)**; dosagem fixa de cloreto férrico = 30 mg/L + dosagem de polímero = 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST); Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Nos ensaios onde foi utilizado polímero = Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min; Nos ensaios onde foi utilizado cloreto férrico = Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 400 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 293 uT; Cor Aparente = 1705 uC; DQO bruta = 469 mg/L; SST = 382,5 mg/L; pH = 7,14; Temperatura = 25,3 ± 1 °C.

A/S (mg ar/mg SST)	Vflot1 = 5 cm/min		Vflot2 = 10 cm/min		Vflot3 = 15 cm/min		Vflot4 = 20 cm/min		Vflot5 = 25 cm/min	
	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100	Turbidez Remanescente (uT)	(1-T/T0) * 100
0,012	29,70	89,9	24,75	91,6	7,20	97,5	4,15	98,6	2,80	99,0
0,017	10,81	96,3	11,88	95,9	4,26	98,5	2,93	99,0	3,14	98,9
0,025	16,05	94,5	10,13	96,5	4,79	98,4	2,77	99,1	2,62	99,1
A/S (mg ar/mg SST)	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100	Cor Aparente Remanescente (uC)	(1-C/C0) * 100
0,012	226,5	86,7	193,8	88,6	81,11	95,2	58,99	96,5	52,67	96,9
0,017	109,1	93,6	116,6	93,2	53,5	96,9	50,29	97,1	48,15	97,2
0,025	140,6	91,8	109,6	93,6	65,3	96,2	49,8	97,1	49,8	97,1
A/S (mg ar/mg SST)	Fornecimento de ar (g ar/m ³ afluente)	SST Remanes- cente (mg/L)	(1- SST/SST0) * 100	DQO Remanes- cente (mg/L)	(1- DQO/DQO0) * 100					
0,012	5	10,53	97,0	42,24	91,0					
0,017	7	4,01	99,0	32,31	93,1					
0,025	11	9,69	97,0	56,44	88,0					

TABELA 20 – Resultados obtidos em ensaios de coagulação/floculação/flotação em equipamento em escala de laboratório (Flotatest), para o polímero W 341 (item 4.9.1), para o cloreto férrico (item 4.9.2) e para a associação entre o cloreto férrico e o polímero W 341, (item 4.9.3). *Dosagens e A/S testados: dosagem de polímero = 0,96 mg/L (0,99 g/Kg SST) e A/S = 0,021 mg ar/mg SST (9 g ar/m³ afluente); dosagem de cloreto férrico = 40 mg/L e A/S = 0,025 mg ar/mg SST (11 g ar/m³ afluente); dosagem fixa de cloreto férrico = 30 mg/L + dosagem de polímero = 0,21 mg/L (0,54 g/Kg SST e A/S = 0,017 mg ar/mg SST (7 g ar/m³ afluente);* Velocidades de flotação: Vflot1 = 5 cm/min.; Vflot2 = 10 cm/min.; Vflot3 = 15 cm/min.; Vflot4 = 20 cm/min.; Vflot5 = 25 cm/min. Nos ensaios onde foi utilizado polímero = Gradiente médio de floculação (Gf) = 100 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 1 min; Nos ensaios onde foi utilizado cloreto férrico = Gradiente médio de mistura rápida (Gmr) = 800 s⁻¹; tempo de mistura rápida (Tmr) = 30s; Gradiente médio de floculação (Gf) = 80 s⁻¹; tempo de floculação (Tf) = 15 min.; pressão de saturação (Psat) = 400 ± 10 kPa. Características do efluente da lagoa aerada: Turbidez = 293 uT; Cor Aparente = 1705 uC; DQO bruta = 469 mg/L; SST = 382,5 mg/L; NTK = 42,73 mg/L; N-NH₄⁺ = 20,24 mg/L; NO₃⁻ = ND; NO₂⁻ = ND; Sulfato = 34,0 mg/L; Sulfeto = 0,018 mg/L; Ptotal bruto = 17,08 mg/L; Ptotal filtrado = 5,54 mg/l; pH = 7,14; Temperatura = 25,3 ± 1 °C.

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	A/S (mg ar/mg SST)	NTK (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Sulfato (mg/L)
ENSAIO COM O POLÍMERO W 341								
0,96	2,49	0,021	43,5 (24,16)	1,0 (20,03)	ND	ND	2,9 (33,0)	16,7 (0,015)
ENSAIO COM O CLORETO FÉRRICO								
40	-	0,025	42,6 (24,53)	1,8 (19,87)	ND	ND	20,6 (27,0)	83,3 (0,003)
ENSAIO COM O CLORETO FÉRRICO + POLÍMERO W 341								
30 + 0,21	30 + 0,54	0,017	44,9 (23,54)	* (21,13)	ND	ND	2,9 (33,0)	83,3 (0,003)

Dosagem (mg/L)	Dosagem (g/Kg SST)	A/S (mg ar/mg SST)	Fosfato total bruto (mg/L)	Fosfato total filtrado (mg/L)
ENSAIO COM O POLÍMERO W 341				
0,96	2,49	0,021	52,2 (8,16)	* (5,86)
ENSAIO COM O CLORETO FÉRRICO				
40	-	0,025	99,0 (0,18)	97,8 (0,12)
ENSAIO COM O CLORETO FÉRRICO + POLÍMERO W 341				
30 + 0,21	30 + 0,54	0,017	95,3 (0,81)	>99,9 (0)

Obs.: o valor entre parênteses corresponde ao residual