EMPREGO DE POLÍMEROS EM UNIDADE PILOTO DE FLOTO-FILTRAÇÃO COMO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REATORES ANAERÓBIOS DE LEITO EXPANSÍVEL TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO

Eng.Ambiental EDUARDO ROCHA DIAS SANTOS

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 Antônio Penalva Reali

São Carlos
2008

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

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

S237e Santos, Eduardo Rocha Dias
Emprego de polímeros em unidade piloto de floto-
filtração como pós-tratamento de efluentes de reatores
anaeróbios de leito expansível tratando esgoto sanitário
/ Eduardo Rocha Dias Santos ; orientador Marco Antônio
Penalva Reali. -- São Carlos, 2008.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e
Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
Paulo, 2008.

1. Saneamento. 2. Floto-filtração. 3. Flotação por ar
dissolvido. 4. Efluente anaeróbio. 5. Polímeros
sintéticos catiônicos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **EDUARDO ROCHA DIAS SANTOS**

Dissertação defendida e julgada em 19/09/2008 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

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

APROVADO

Prof. Dr. **BERNARDO ARANTES DO NASCIMENTO TEIXEIRA**
(Universidade Federal de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **RODRIGO BRAGA MORUZZI**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" /UNESP/Campus de Rio Claro)

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

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

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Marco Antônio Dias Santos e Marília Silva Rocha Dias Santos que sempre me apoiaram e incondicionalmente dedicaram muito amor durante toda minha vida.

Aos meus irmãos Fernando Rocha Dias Santos e Renato Rocha Dias Santos pelo companheirismo e incentivo.

À Camila do Prado Gonçalves, por todo o carinho, amor, simpatia e companheirismo a mim dispensados, sempre sem economia.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Marco Antônio Penalva Reali, por contribuir de maneira inestimável no meu desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço-o pela liberdade, confiança, sabedoria e praticidade aplicados no decorrer desta pesquisa.

Ao professor José Roberto Campos pelo espírito de grupo no apoio das mais variadas pesquisas.

Aos professores Luiz Antônio Daniel e Sílvia Cláudia Semensato Povinelli, pelas sugestões e ensinamentos ao longo de toda a pesquisa.

Aos professores Marcelo Zaiat e Maria do Carmo Calijuri, pela coerência e competência na coordenação da pós-graduação do Departamento de Hidráulica e Saneamento.

À Glauce Guimarães Pereira, técnica do Laboratório de Tratamento Avançado e Reúso – LATAR, pelos ensinamentos metodológicos, pela alegria e festividade nos momentos certos.

Ao amigo Andrey Alessandro Rosa, famoso Gicrey, pelos momentos de descontração durante os diversos cafés nos intervalos de trabalho, e pela alegria de cada Flotatestes concluído.

Aos amigos da Estação Piloto de Floto-filtração, André Luiz de Oliveira e Cláudio Júnior Araújo, pela cooperação e otimismo durante os ensaios.

À equipe do Laboratório de Saneamento, por toda colaboração, ensinamentos e cordialidade.

Aos meus amigos e colegas de mestrado, Fausto de Assis Moraes, Flávia Bottino, Gessia Momoe Shida, Gregor Franz Friedl, Guilherme Peixoto, Gustavo Mockaitis, Ignazio Giuntoli, Ive Ciola Ferraz, Joel Dias Pinheiro Filho, Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho, Lissa Maria Nocko, Simone Pereira Casali, Sylvia Paes Farias de Omena, Tatiane

Furlaneto de Souza, Tatiane Sant'Ana Guimarães, pelo companheirismo e troca de idéias durante todo o trabalho experimental.

Ao Alcino pela presteza em todos os momentos de dificuldade, em companhia dos amigos Edson e Maurílio, sempre postos a ajudar.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC-USP: Rose, Sá, Pavi, André, Wagner, Flávia, Fernanda, por toda colaboração e agilidade.

À República Maloca, saudosa maloca, maloca querida, que sempre nos alegrou e aborreceu. Agradeço, especialmente, ao Aníbal da Fonseca Santiago, Cesar Sperchi Henrique, Diego Botelho Ruas e Patrick Valverde Medeiros.

Aos Engenheiros Ambientais da Universidade Federal de Viçosa que ingressaram no SHS e fizeram-me lembrar às origens.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pela qualidade de ensino oferecida e pela excelência nas pesquisas desenvolvidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de mestrado e incentivo a pesquisa acadêmica nacional.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo geral.....	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	6
3.1. Reatores anaeróbios de leito expandido (RALEx).....	6
3.2. Flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios	8
3.3. Emprego de polímeros no tratamento de águas residuárias	10
3.4. Floto-filtração aplicada ao tratamento de água de abastecimento.....	11
3.5. Floto-filtração aplicada ao tratamento de águas residuárias	16
3.5.1. Sistemas de filtração no tratamento de esgotos sanitários.....	17
4. MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1. Considerações iniciais	20
4.2. Produtos químicos utilizados	22
4.2.1. Cloreto férrico	22
4.2.2. Polímeros	23
4.3. ETAPA I – Verificação da faixa de variação de turbidez e cor aparente do efluente do RALEx	24
4.3.1. Instalações experimentais	24
4.3.1.1. Reator anaeróbio de leito expansível (RALEx).....	24
4.3.2. Procedimentos para coleta de amostras do efluente do RALEx	26
4.4. ETAPA II – Ensaio de flotatestes	28
4.4.1. Descrição das instalações experimentais	28
4.4.1.1. Unidade de mistura rápida e adição de polímero	28
4.4.1.2. Unidade de floculação e flotação por ar dissolvido em escala de bancada	28
4.4.2. Procedimentos utilizados nos ensaios de flotatestes	30
4.4.2.1. Considerações iniciais	30
4.4.2.2. Variáveis utilizadas nos ensaios de bancada	33
4.5. ETAPA III – Ensaio piloto de pós-tratamento do RALEx por mistura rápida/floculação/floto-filtração	36
4.5.1. Considerações iniciais.....	36
4.5.2. Descrição das instalações da ETE experimental piloto	39
4.5.2.1. Unidade piloto de pós-tratamento do RALEx por floto-filtração.....	39
4.5.2.2. Sistema dosador de cloreto férrico	40
4.5.2.3. Sistema dosador de polímero.....	41
4.5.2.4. Floculadores.....	42
4.5.2.5. Sistema de saturação de ar.....	43
4.5.2.6. Câmara de contato	44
4.5.2.7. Sistema regulador de nível	45
4.5.2.8. Piezômetros	46
4.5.2.9. Filtro de areia.....	47

4.5.2.10.	Retrolavagem do filtro de areia.....	47
4.5.2.11.	Remoção de lodo.....	48
4.5.2.12.	Pontos de coletas na ETE piloto.....	48
4.5.3.	Procedimentos dos ensaios piloto na ETE experimental.....	49
4.5.3.1.	Considerações iniciais.....	49
4.5.3.2.	Dosagem de cloreto férrico e polímero.....	52
4.5.3.3.	Manuseio de produtos químicos em escala piloto.....	54
4.5.3.4.	Turbidímetros.....	55
4.5.3.5.	Eficiência da câmara de saturação.....	56
4.5.3.6.	Manutenção dos equipamentos na unidade piloto de floto-filtração....	57
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.1.	Considerações iniciais.....	58
5.2.	Resultados da ETAPA I – verificação da faixa de variação de turbidez e cor aparente do efluente do RALEx.....	59
5.3.	Resultados da ETAPA II - ensaios de flotatestes.....	61
5.3.1.	Resultados da ETAPA IIA – ensaios de flotatestes para seleção do polímero sintético catiônico de alto peso molecular.....	62
5.3.1.1.	Fase 1.....	62
5.3.1.2.	Fase 2.....	64
5.3.2.	Considerações sobre a ETAPA IIA.....	68
5.3.3.	Resultados da ETAPA IIB - variação das dosagens de cloreto férrico nos ensaios de flotatestes com uso associado do polímero selecionado.....	70
5.3.3.1.	Fase 1.....	71
5.3.3.2.	Fase 2.....	72
5.3.4.	Considerações sobre a ETAPA IIB.....	74
5.4.	Resultados da ETAPA III - ensaios piloto de floto-filtração como pós-tratamento do RALEx tratando esgoto sanitário.....	75
5.4.1.	Comparação entre turbidímetros.....	75
5.4.2.	ENSAIOS 1 a 6: investigação das dosagens de produtos químicos e eficiência de remoção pela ETE piloto de floto-filtração.....	76
5.4.2.1.	ENSAIO 1.....	78
	nr: análise não realizada.....	78
5.4.2.2.	ENSAIO 2.....	79
5.4.2.3.	ENSAIO 3.....	81
	nr: análise não realizada.....	81
5.4.2.4.	ENSAIO 4.....	82
5.4.2.5.	ENSAIO 5.....	84
	nr: análise não realizada.....	84
5.4.2.6.	ENSAIO 6.....	85
5.4.2.7.	Considerações sobre os ENSAIOS 1 a 6.....	86
5.5.	ENSAIO 7: monitoramento da unidade piloto de floto-filtração.....	90
5.5.1.	Considerações iniciais.....	90
5.5.2.	Análise crítica dos resultados do monitoramento.....	91
5.6.	Considerações gerais sobre os ENSAIOS 1 a 7.....	101
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	104
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
8.	ANEXOS.....	117

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1. Módulo de floto-filtração (COCO-DAFF). Legenda: (1) Canal de água de lavagem, (2) Flotado, (3) Canal de saída do flotado, (4) Câmara de entrada, (5) Tubulação de entrada, (6) Bocal de recirculação da flotação por ar dissolvido, (7) Canal de saída do resíduo de retrolavagem, (8) Vertedor do efluente retrolavado, (9) Camada de antracito, (10) Camada de areia, (11) Bocais do filtro, (12) Saída do filtrado e entrada da água de lavagem, (13) Câmara do efluente filtrado 12
- Figura 4.1. Fluxograma geral dos ensaios em escala de bancada e piloto com suas respectivas instalações experimentais nos quais foram desenvolvidos os trabalhos 21
- Figura 4.2. Fotos do reator anaeróbio de leito expansível (RALEx) localizado na setor nordeste da área I da EESC-USP. Legenda: (1) RALEx (vista frontal), (2) RALEx (vista lateral), (3) painel elétrico de comando, (4) gradeamento à montante do reator, (5) conjunto motobomba de recalque de esgoto sanitário, (6) banda de rodagem de pneus inservíveis triturada utilizada como leito suporte do RALEx 26
- Figura 4.3. Fluxograma da ETAPA I referente aos ensaios para padronização das coletas de amostras a serem utilizadas nos ensaios de flotatestes da ETAPA II 27
- Figura 4.4. Equipamento Flotatestes desenvolvido na EESC-USP para ensaios de FAD em escala de bancada. Legenda: (1) regulador de tensão, (2) válvula de agulha, (3) motorreductor, (4) manômetros, (5) coluna de flotação, (6) câmara de saturação. ... 29
- Figura 4.5. Fluxograma dos ensaios de flotatestes para seleção do polímero sintético catiônico de alto peso molecular a ser utilizado nos ensaios piloto 31
- Figura 4.6. Fluxograma dos ensaios de flotatestes para variação das dosagens de cloreto férrico (expressada em mg Fe.L^{-1}) associadas ou não ao polímero..... 32
- Figura 4.7 Ponto de injeção do polímero no efluente do RALEx logo após mistura rápida 35
- Figura 4.8. Composição equilibrada de ar saturado a diferentes pressões de saturação. Fonte: Steinbach e Haarhoff (1998) 36
- Figura 4.9. Esquema geral dos ensaios piloto realizado na ETE experimental, situada na área I da EESC-USP..... 38
- Figura 4.10. Esquema em planta da ETE piloto localizada no setor nordeste da área I da EESC-USP..... 39
- Figura 4.11 Equipamentos e unidades que compõem o sistema dosador de FeCl_3 . Legenda - (1) turbidímetro de escoamento contínuo, (2) tanque de preparo de solução de FeCl_3 e agitador com 35 RPM, (3) misturador rápido estático em linha, (4) bomba dosadora de diafragma..... 41
- Figura 4.12 Componentes do sistema de dosagem do polímero. Legenda: (1) tanque de preparo da solução 0,04% de polímero e agitador com 152 RPM, (2) bomba dosadora peristáltica 42
- Figura 4.13. Floculadores mecanizados com sistema agitador de paletas. Legenda: (1) dois floculadores que compõem a unidade piloto, (2) único floculador utilizado devido às limitações de vazão afluyente 43
- Figura 4.14. Sistema de saturação de ar atmosférico no efluente recirculado. Legenda: (1) câmara de saturação, (2) manômetro controle da câmara, (3) dois compressores de ar ligados em série 44
- Figura 4.15. Câmara de contato das microbolhas com flocos. Fonte: Adaptado de Oliveira (2007). Legenda: (1) entrada de efluente floculado, (2) entrada de efluente saturado com ar, (3) válvula de agulha 45
- Figura 4.16. Sistema regulador de nível d'água na câmara de Floto-filtração. Legenda: (1) (2) (3) válvula angular de diafragma, (4) sensor de nível de ultra-sônico 45

Figura 4.17. Sistema de monitoramento da perda de carga no leito filtrante. Legenda: (1) piezômetros externos instalados ao longo do filtro de areia com espaçamento de 20 cm entre eles, (2) pontos de coleta ao longo do filtro e instalados no mesmo nível dos piezômetros.....	46
Figura 4.18. Dispositivos de remoção e contenção de lodo flotado. Legenda: (1) tanque de acúmulo de lodo flotado com bomba submersa e sensor de nível, (2) raspador de lodo flotado com 4 RPM	48
Figura 4.19. Pontos de coleta de amostras na ETE piloto para avaliação das etapas de tratamento	49
Figura 4.20. Dosagens de cloreto férrico e polímero utilizado em cada ensaio da ETAPA III.	54
Figura 5.1. Turbidez e cor aparente durante ensaio de 24 horas de monitoramento do esgoto sanitário e efluente do RALEx nos dias 18 e 19/04/2007.....	59
Figura 5.2. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes para seleção de polímero com efluente coletado às 7h no RALEx. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$, $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($12 \text{ g}_{\text{ar.m}}^{-3}$)	63
Figura 5.3. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes para seleção de polímero com efluente coletado às 17h no RALEx. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$, $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($12 \text{ g}_{\text{ar.m}}^{-3}$)	65
Figura 5.4. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes com efluente coletado às 7h e 17h no RALEx, com adição apenas de FeCl_3 . $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$, $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($12 \text{ g}_{\text{ar.m}}^{-3}$)	67
Figura 5.5. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes com efluente coletado às 17h h no RALEx, empregando apenas o Polímero 8589. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$, $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($12 \text{ g}_{\text{ar.m}}^{-3}$)	70
Figura 5.6. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes com efluente coletado às 7h no RALEx. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$, $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($12 \text{ g}_{\text{ar.m}}^{-3}$).....	72
Figura 5.7. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotação em escala de bancada com efluente coletado às 17h no RALEx. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$, $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($12 \text{ g}_{\text{ar.m}}^{-3}$)	73
Figura 5.8. Ensaio de verificação da turbidez no efluente do RALEx medida pelo turbidímetro de infravermelho presente na ETE piloto e o turbidímetro de luz branca portátil utilizado no LATAR.....	76
Figura 5.9. Turbidez, cor aparente, DQO bruta e filtrada, SST e SSV ao longo do ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h.	91
Figura 5.10. Condutividade, P-PO_4^{-3} , sulfato, $\text{Abs}_{254\text{nm}}$, OD, CF e CT ao longo do ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. $\text{TAS}=300 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$; $G_{\text{mr}}=2000 \text{ a } 7000 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$, $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{\text{ar.m}}^{-3}$)	93
Figura 5.11. pH, alcalinidade total e parcial, AOV ao longo do ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. $\text{TAS}=300 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$; $G_{\text{mr}}=2000 \text{ a } 7000 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$, $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{\text{ar.m}}^{-3}$).....	95

Figura 5.12. NTK e N-NH_4^+ ao longo do ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. $\text{TAS}=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{\text{mr}}=2000 \text{ a } 7000 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_f=18 \text{ min}$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{\text{ar}} \cdot \text{m}^{-3}$).....	96
Figura 5.13. Variação de turbidez ao longo do leito filtrante durante ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. $\text{TAS}=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{\text{mr}}=2000 \text{ a } 7000 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_f=18 \text{ min}$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{\text{ar}} \cdot \text{m}^{-3}$).....	98
Figura 5.14. Perda de carga medida nos pontos: 120cm, 100cm, 80cm, 60cm, 40cm, 20cm ao longo do leito filtrante durante ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. $\text{TAS}=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{\text{mr}}=2000 \text{ a } 7000 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_f=18 \text{ min}$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{\text{ar}} \cdot \text{m}^{-3}$).....	100
Figura 5.15. Teor de ST e SVT no lodo flotado coletado durante ENSAIO 7 em escala piloto entre 10h e 14h. $\text{TAS}=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{\text{mr}}=2000 \text{ a } 7000 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_f=18 \text{ min}$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{\text{ar}} \cdot \text{m}^{-3}$).....	101
Figura 6.1. Fluxograma sugerido de ETE experimental piloto para investigação de tecnologia de pós-tratamento de reatores anaeróbios por floto-filtração seguida de remoção de nitrogênio e desinfecção.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Benefícios e limitações do emprego de reatores anaeróbios no tratamento de esgotos sanitários.....	6
Tabela 3.2 - Gerações de reatores anaeróbios.....	7
Tabela 3.3 - Teses e dissertações envolvendo FAD desenvolvidas no SHS-EESC-USP....	9
Tabela 4.1 - Características dos polímeros utilizados nos ensaios de flotatestes.....	23
Tabela 4.2 - Concentração teórica de ar em equilíbrio na câmara de saturação com ventosa (flotatestes).....	35
Tabela 4.3 - Características da câmara de floculação	43
Tabela 4.4 - Características da câmara de saturação não-ventilada.....	44
Tabela 4.5 - Características do leito filtrante e da camada suporte utilizados na unidade piloto de floto-filtração.....	47
Tabela 4.6. Variáveis operacionais dos ensaios piloto de floto-filtração	52
Tabela 4.7 - Características dos turbidímetros utilizados na pesquisa.....	55
Tabela 4.8 - Concentração mássica teórica de ar na água.....	56
Tabela 4.9 - Concentração de ar disponível para o processo de flotação durante ensaios piloto de floto-filtração.....	57
Tabela 5.1 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 1 em escala piloto com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{m}^{-1}$	78
Tabela 5.2 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 1 com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	79
Tabela 5.3 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 2 em escala piloto com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{m}^{-1}$	80
Tabela 5.4 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 2 com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	80
Tabela 5.5 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 3 em escala piloto com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{m}^{-1}$	81
Tabela 5.6 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 3 com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	82
Tabela 5.7 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 4 em escala piloto com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{m}^{-1}$	83
Tabela 5.8 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 4 com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	83
Tabela 5.9 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 5 em escala piloto com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{m}^{-1}$	84
Tabela 5.10 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 5 com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	85
Tabela 5.11 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 6 em escala piloto com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{m}^{-1}$	86
Tabela 5.12 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 6 com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	86
Tabela 5.13 - Valores médios das variáveis medidas no esgoto sanitário e efluente do RALEx entre os dias 11/09/2007 e 13/12/2008	87

Tabela 5.14 - Resultados das análises de metais (Zn, Pb, Ni, Fe, Mn, Cu, Cr) nos efluentes do RALEx, FAD, FFAD e do esgoto sanitário	89
Tabela 5.15 - Análises de metais (Zn, Pb, Ni, Fe, Mn, Cu , Cr) ao longo do ENSAIO 7 com $TAS=300\text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	97
Tabela 5.16 - Comparação entre pesquisas que utilizaram filtração rápida como tratamento terciário de esgotos sanitários.....	102
Tabela 5.17 - Características da etapa de retrolavagem dos filtros e dos lodos gerados na etapa de floto-filtração no ENSAIO 7 e no ensaio final de Oliveira (2007)	103

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

Ab _{254nm}	Absorbância da amostra medida no comprimento de onda 254 nm
AOV	Ácidos orgânicos voláteis (mg.L ⁻¹)
COCO-DAFF	Floto-filtração por ar dissolvido em contra-corrente
C.U.	Coeficiente de uniformidade
D ₁₀	Tamanho efetivo (mm) - diâmetro das partículas correspondentes a 10% do peso total da amostra.
D ₆₀	Tamanho equivalente a 60% em peso massa do material que passa no peneiramento (mm)
DCF	Dosagem de cloreto férrico (mg FeCl ₃ .L ⁻¹)
DN	Diâmetro nominal da tubulação (mm)
DQO	Demanda química de oxigênio (mg.L ⁻¹)
DQO _{bruta}	Demanda química de oxigênio de amostra bruta (mg.L ⁻¹)
DQO _{filtrada}	Demanda química de oxigênio de amostra filtrada (mg.L ⁻¹)
DP	Dosagem de polímero
ES	Esgoto sanitário
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EESC-USP	Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de esgoto sanitário
FAD	Flotação por ar dissolvido
FAD/F	Flotação por ar dissolvido seguido de filtração
FD	Filtração direta
Fe/turbidez	Relação de dosagem de coagulante em mg Fe.L ⁻¹ por unidade de turbidez (NTU)
FFAD	Floto-filtração por ar dissolvido
G _m	Gradiente médio de velocidade (s ⁻¹)
G _{mr}	Gradiente médio de velocidade da mistura rápida (s ⁻¹)
G _f	Gradiente médio de velocidade da floculação (s ⁻¹)
G _p	Gradiente médio de velocidade na etapa de injeção do polímero
KAMET	Krofta advanced municipal effluent treatment
MON	Matéria orgânica natural
NTK	Nitrogênio total Kjeldahal (mg.L ⁻¹)

N-NH ₄ ⁺	Nitrogênio na forma de amoniacal (mg.L ⁻¹)
OD	Oxigênio dissolvido (mg.L ⁻¹)
PAC	Cloreto de polialumínio
PE	Polieletrólitos
pH	Potencial hidrogeniônico
P-PO ₄ ⁻³	Fósforo na forma de fosfato (mg.L ⁻¹)
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
P _{sat}	Pressão de saturação (kPa)
Q _{afl}	Vazão floculada afluenta ao filtro (m ³ .h ⁻¹)
Q _d	Vazão de descarte do floculador (m ³ .h ⁻¹)
Q _{dr}	Vazão de descarte do efluente do RALEx (m ³ .h ⁻¹)
Q _{ent}	Vazão de entrada na unidade piloto (m ³ .h ⁻¹)
Q _r	Vazão de recirculação (%)
Q _{ralex}	Vazão afluenta ao RALEx (m ³ .h ⁻¹)
Q _{retr}	Vazão de retrolavagem (m ³ .h ⁻¹)
RALEx	Reator anaeróbio de leito expansível ou expandido
RA	Registro de agulha
R	Taxa de recirculação da flotação por ar dissolvido (%)
S [*]	Quantidade de ar fornecida ao processo de flotação por ar dissolvido (g _{ar} .m ⁻³)
SHS-EESC-USP	Departamento de Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
SST	Sólidos suspensos totais (mg.L ⁻¹)
SSV	Sólidos suspensos totais voláteis (mg.L ⁻¹)
ST	Sólidos totais (mg.L ⁻¹)
TAS	Taxa de aplicação superficial (m ³ .m ⁻² .d ⁻¹)
TAS _{retrolavagem}	Taxa de aplicação superficial durante retrolavagem dos filtros (m ³ .m ⁻² .d ⁻¹)
TC	Tempo de contato (min)
TE	Tamanho efetivo (mm)
TEC	Turbidímetro de escoamento contínuo
T _{mr}	Tempo de mistura rápida (s)
T _f	Tempo de floculação (min)

T_p	Tempo de mistura do polímero sob gradiente médio de velocidade de 308 s^{-1}
T_{sat}	Tempo de saturação (min)
USP	Universidade de São Paulo
VAD	Válvula angular de diafragma
V_{asc}	Velocidade ascensional
$V_F 20,83$	Velocidade na flotação por ar dissolvido nos ensaios de flotatestes de $20,83\text{ cm.min}^{-1}$

RESUMO

SANTOS, E.R.D. (2008). *Emprego de polímeros em unidade piloto de floto-filtração no pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios de leito expansível tratando esgoto sanitário*. São Carlos, 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho avaliou o desempenho de uma unidade piloto de floto-filtração, que utilizou polímeros associados ao cloreto férrico no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expansível (RALEx), tratando esgoto sanitário. Preliminarmente, testaram-se em ensaios de flotação por ar dissolvido em escala de bancada (flotateste), baixas dosagens de polímero sintético catiônico de alto peso molecular como auxiliar de flotação. As dosagens de coagulante deram-se na relação de mg Fe.L^{-1} por unidade de turbidez (NTU) do RALEx (Fe/turbidez) e variou de 0,08 a 0,18 nos ensaios de bancada. As dosagens fixas de polímero, associadas ao cloreto férrico ocorreram entre 0,1 e 0,4 mg.L^{-1} . As variáveis operacionais dos ensaios de flotateste e de floto-filtração em escala piloto utilizadas foram: gradiente de floculação de 90 s^{-1} , tempo de floculação de 18 min, recirculação de 15%, pressão de saturação na câmara com $450 \pm 10 \text{ kPa}$ e taxa de aplicação superficial igual a $300 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. Para os ensaios piloto de floto-filtração foi utilizado leito filtrante de areia, com tamanho efetivo de 0,8 mm e profundidade igual a 1,10 m. Dentre os ensaios piloto de floto-filtração realizados, foram obtidos os melhores resultados ao utilizar dosagens variáveis de cloreto férrico respeitando a relação de 0,15 mg Fe.L^{-1} para cada unidade de turbidez (Fe/turbidez), associado a dosagens fixas de 0,4 mg.L^{-1} de polímero, produzindo efluente final com SST $< 2 \text{ mg.L}^{-1}$. Para as condições da presente pesquisa, o polímero que propiciou em flotateste efluente com turbidez mais baixa, tem como características: catiônico, alto peso molecular e altíssima densidade de carga. Foi verificado nos ensaios piloto com dosagens de polímero entre 0,4 e 1,2 mg.L^{-1} um teor de sólidos totais $> 3\%$ no lodo flotado.

Palavras-chave: floto-filtração, flotação por ar dissolvido, efluente anaeróbio, polímeros sintéticos catiônicos.

ABSTRACT

SANTOS, E.R.D. (2008). Post-treatment of effluents from anaerobic reactor treating domestic sewage by flotation/filtration pilot system with cationic synthetic polymers. São Carlos, 2008. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work assessed the performance of domestic sewage treatment pilot unit consisting of anaerobic reactor followed dissolved-air flotation/filtration (DAFF). Associated ferric chloride was used polyelectrolytes. First, was tested in lab-scale dissolved-air flotation (LSDAF), low dosages of cationic synthetic polymer with high molecular weight as aiding of flotation. Coagulant dosages was given in mg Fe.L^{-1} by unit of turbidity (NTU) of RALEx and it varied from 0,08 to 0,16 in LSDAF. The fixed dosages of polymer associated to the ferric chloride happened between 0,1 and 0,4 mg.L^{-1} . The variables operational of the LSDAF and DAFF were: velocity gradient (90 s^{-1}), flocculation time (18 min), recirculation rate (15%), air requirements ($12 \text{ g}_{\text{air}}.\text{m}^{-3}$), saturation pressure ($450 \pm 10 \text{ kPa}$) and surface load ($300 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$). In pilot unit DAFF, of bed filter of sand was used, with effective size of 0,8 mm and depth the same to 1,10 m. Best results were achieved with 0,15 mg Fe.L^{-1} /turbidity associated to 0,4 mg.L^{-1} of polyelectrolytes, producing final effluent with TSS $< 2 \text{ mg.L}^{-1}$. For the conditions of this research, provide that the polyelectrolyte in LSDAF, effluent with lower turbidity, is characterized: cationic, high molecular weight and high load density. It was verified in the pilot essays with dosages of polymer between 0,4 and 1,2 mg.L^{-1} thickening sludge $> 3\%$.

Keywords: flotation/filtration, dissolved-air flotation, anaerobic effluent, cationic synthetic polymers.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos sanitários têm seu uso bastante difundido em países como o Brasil, onde a temperatura normalmente é elevada, característica favorável ao desenvolvimento e manutenção da biomassa microbiana. De maneira geral, os processos anaeróbios no tratamento de esgotos sanitários têm apresentado: redução nos custos de disposição final de lodos, possibilidade do aproveitamento de biogás, menor consumo energético, isso quando comparados aos processos biológicos aeróbios. Contudo, os sistemas anaeróbios têm dificuldades em produzir um efluente com características adequadas para disposição final em corpos d'água. Por isso, estes sistemas devem ser vistos como uma primeira etapa do processo, sendo necessário um pós-tratamento que complemente a remoção da matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos. Várias são as tecnologias utilizadas no pós-tratamento de reatores anaeróbios, dentre as quais Chernicharo et al. (2001) citam: aplicação no solo, lagoas de polimento, reator com biofilme, lodos ativados e flotação por ar dissolvido (FAD).

Alem Sobrinho e Jordão (2001) comentam a crescente utilização no tratamento de esgotos municipais por processos biológicos, de sistemas combinados constituídos de reator anaeróbio seguido de aeróbio. Em estudos utilizando reatores UASB seguidos de lodos ativados, von Sperling¹ (2000) apud Alem Sobrinho e Jordão (2001) constatou que em condições de sobrecarga os reatores aeróbios apresentaram crescimento excessivo de organismos filamentosos, que possuem dificuldade de sedimentação no decantador secundário, deteriorando a qualidade do efluente final.

¹ VON SPERLING, M. Performance evaluation of an UASB – activated sludge system treating municipal wastewater. In: WORLD WATER CONGRESS OF THE INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION, I. Conference Preprint Book 4: Paris, 2000. 3-7. p. 94-100.

Mendonça (2002) testou em escala piloto o sistema de lodos ativados como pós-tratamento de reator anaeróbio de leito expandido. O autor constatou baixa remoção de sólidos pelo tratamento aeróbio, evidenciado pelo arraste de sólidos no decantador secundário.

De maneira geral, o pós-tratamento de reatores anaeróbios por processos biológicos tem como aspecto negativo a baixa flexibilidade operacional, tornando o sistema vulnerável às variações dos efluentes anaeróbios. Alguns sistemas biológicos como o de lagoas de polimento possuem maior resistência a variações de carga orgânica devido ao grande volume do reator biológico, que tem maior capacidade de amortecimento. Para isso, são necessárias grandes áreas para implantação, quando comparados aos sistemas com pós-tratamento físico-químico.

A aplicação de sistemas físico-químicos como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios permite maior flexibilidade operacional e maior resistência a agentes tóxicos quando comparados ao pós-tratamento biológico.

No Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (SHS-EESC-USP), diversas pesquisas utilizando reator anaeróbio seguido de flotação por ar dissolvido apresentaram resultados satisfatórios, principalmente na remoção de matéria orgânica e fósforo. Outras características benéficas da aplicação da FAD são: geração de lodo já espessado, elevada eficiência na remoção de material em suspensão e possibilidades de aplicação de altas taxas (REALI; CAMPOS e PENETRA, 1999).

Apesar da elevada flexibilidade da FAD como pós-tratamento de reatores anaeróbios, Penetra (2003), constatou que a qualidade do efluente final após FAD era afetada pelas variações de qualidade do efluente anaeróbio, que aumentava as frações residuais de SST, carga orgânica residual e fósforo no efluente final. Reali, Penetra e

Campos (2007) demonstraram em escala piloto, que o uso de dosagens variáveis de coagulantes adequadas a turbidez do efluente anaeróbio, permitiram maior estabilidade (quando comparados aos sistemas de FAD com dosagem fixa de coagulante) do processo de flotação com conseqüente melhoria da qualidade do efluente final. Em unidade piloto de tratamento de esgotos sanitários, com a configuração de tratamento preliminar/reator anaeróbio/FAD/filtração, presente na Escola de Engenharia de São Carlos, Oliveira (2007) fez uso do sistema de dosagem variável de coagulante (cloreto férrico) na etapa de flotação. Com intuito de criar uma barreira adicional aos sólidos suspensos residuais do processo de flotação, o autor adicionou na mesma unidade, leito de areia, configurando um sistema de floto-filtração. Essa configuração produziu efluente com excelente qualidade, principalmente em termos material suspenso após etapa de filtração.

Os floto-filtros conjugam numa mesma unidade, os processos de flotação e de filtração rápida em leito granular, resultando em sistema integrado bastante compacto e seguro. A presença do leito filtrante adjacente à câmara de flotação e no mesmo reator, favorece a uniformização das linhas de fluxo do processo de flotação, permitindo aumento da taxa de aplicação superficial, conforme descreve Kiuru (2001).

Na tecnologia de floto-filtração, o leito filtrante é merecedor de maiores cuidados no que tange à qualidade do efluente de alimentação do filtro, principalmente da concentração de sólidos suspensos, principais responsáveis pela colmatação em leito granular. Para garantir qualidade adequada do afluente ao filtro, uma alternativa nos processos de FAD é adequar as dosagens de coagulante à qualidade do efluente de entrada, o que muitas vezes demanda grandes quantidades de coagulantes.

O uso de pequenas dosagens de polímeros como auxiliares de flotação associados a coagulantes vêm sendo altamente difundido pela possibilidade de redução da dosagem de coagulante e pelo potencial de maior adensamento do lodo flotado. Além disso, os

polímeros possuem maior independência do pH de atuação do que os coagulantes como o cloreto férrico e o sulfato de alumínio (AISSE et al., 2001; BOLTO, 1995).

Na EESC-USP, Penetra (2003) e Moretti (2005) fizeram uso de diferentes dosagens de polímeros sintéticos associados ao FeCl_3 no processo de FAD, como pós-tratamento de reatores biológicos. Ambos os pesquisadores obtiveram em ensaios de flotação em escala de bancada (flotateste), redução do consumo de coagulante (cloreto férrico) ao dosar associadamente pequenas quantidades de polímeros, mantendo efluente final com qualidade satisfatória. Os melhores resultados foram com os polímeros sintéticos catiônicos de alto peso molecular.

A presente pesquisa propôs verificar a influência da utilização de pequenas quantidades de polímeros sintéticos catiônicos de alto peso molecular associados a quantidades reduzidas de FeCl_3 , no desempenho da unidade piloto composta por: reator anaeróbio/mistura rápida/floculação/floto-filtração, presente na área I da EESC-USP.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

- Avaliar o desempenho de uma unidade piloto de mistura rápida/floculação/floto-filtração aplicada ao pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios de leito expansível tratando esgoto sanitário, com emprego de cloreto férrico como coagulante associado a baixas dosagens de polímeros como auxiliar de flotação/filtração;

2.2. Objetivos específicos

- Selecionar em ensaios de flotatestes, utilizando cloreto férrico como coagulante, um polímero sintético catiônico de alto peso molecular com desempenho satisfatório (efluente após flotação por ar dissolvido com turbidez < 10 NTU) quando aplicado em baixas dosagens (0,1; 0,2; 0,3; 0,4 mg.L⁻¹);
- Verificar em ensaios de flotatestes, a influência da variação das dosagens de cloreto férrico associado a baixas dosagens de polímero, sobre a turbidez remanescente da flotação por ar dissolvido;
- Verificar em ensaio piloto, o tempo de duração da carreira de filtração mediante adição de 0,4 mg.L⁻¹ de polímero associado a dosagens de cloreto férrico;
- Quantificar a concentração de sólidos totais presentes no lodo flotado ao utilizar 0,4 mg.L⁻¹ de polímero associado a dosagens de cloreto férrico;

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Reatores anaeróbios de leito expandido (RALEx)

Os processos anaeróbios vêm sendo utilizados há mais de um século no tratamento de esgotos sanitários. Utilizando-se de fenômenos biológicos naturais de estabilização de matéria orgânica, na ausência de oxigênio, os reatores anaeróbios convertem a matéria orgânica a metano e a compostos inorgânicos como amônia e dióxido de carbono (JEWELL et al., 1981).

O tratamento anaeróbio de esgotos sanitários oferece, até o presente momento, uma série de benefícios que muitas vezes superam as limitações nele envolvidas, conforme mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Benefícios e limitações do emprego de reatores anaeróbios no tratamento de esgotos sanitários

Benefícios	Limitações
1) Baixa produção de lodo (estabilizado);	1) As bactérias anaeróbias, em particular as metanogênicas, são muito susceptíveis a inibição por um grande número de compostos;
2) Pouca ou nenhuma necessidade de adição de nutrientes;	2) A partida do processo é muito lenta se não for utilizado como inóculo um lodo já adaptado;
3) Nenhum gasto de energia com aeração;	3) O tratamento anaeróbio requer o emprego de um pós-tratamento adequado para a remoção de carga orgânica restante, da amônia e de componentes que causam odores desagradáveis como H_2S ;
4) Produção de metano;	4) Remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatória.
5) O lodo anaeróbio ativo pode ser preservado, sem alimentação, por vários meses sem que ocorra deterioração;	
6) Altas taxas podem ser aplicadas quando em condições favoráveis.	

Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997)

Os reatores biológicos costumam ser divididos em dois grupos distintos, ou seja, os reatores de biomassa em suspensão e os reatores de biomassa fixa a um suporte inerte.

Entretanto, uma divisão bastante interessante, apresentando três gerações de reatores e mostrando sua evolução ao longo dos anos, foi proposta por Noyola (1993) conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Gerações de reatores anaeróbios

Reatores de 1ª geração	Reatores de 2ª geração	Reatores de 3ª geração
-Fossa Moura	-Filtro Anaeróbio	-Reator Anaeróbio de
-Tanque Séptico	-Reator Anaeróbio de	Leito Expandido
-Tanque Imhoff	Fluxo Ascendente de	(Expansível)
-Lagoa Anaeróbia	Manta de Lodo(UASB)	-Reator Anaeróbio de
-Reator Convencional de		Leito Fluidizado
Contato		

Fonte: Adaptado de Noyola (1993)

Os reatores anaeróbios de leito expandido ou expansível possuem em seu interior microrganismos aderidos a um suporte sujeito a expansão. O termo “expandido” pode ser aplicado aos reatores em que há aumento na altura do leito em cerca de 10 a 20%. O material normalmente empregado como suporte deve possuir grande área superficial para adesão dos microrganismos e manter boas características de sedimentação para assegurar a retenção de biomassa no reator (JEWELL et al., 1981).

Campos e Pereira (1999) citam que a suspensão do leito pode ser obtida com o estabelecimento de velocidade ascensional (V_{asc}) suficiente para expansão do leito com características próprias de dimensão e densidade das biopartículas. Quando se tem limitações da vazão afluyente ao reator, o emprego do sistema de recirculação de parcela do efluente pode garantir maior flexibilidade durante operação do reator, em termos de velocidade ascensional.

Diversas pesquisas foram realizadas no SHS-EESC-USP acerca da aplicação de RALEx no tratamento de esgoto sanitário, dentre os quais pode-se destacar: Campos e Pereira (1999), Pereira (2000) e Niciura (2005).

Niciura (2005) constatou em sua pesquisa que ao utilizar banda de rodagem de pneus inservíveis (BPIT) a expansão/fluidificação do leito só ocorreu após aplicar 40 m.h^{-1}

¹ de velocidade ascensional (V_{asc}) no reator. Como a V_{asc} máxima aplicada em seus estudos foi de 10 m.h^{-1} , o termo adequado para classificar o reator operando nestas condições foi **LEITO MÓVEL OU EXPANSÍVEL**.

Apesar da evolução dos reatores anaeróbios como os de leito expandido/fluidizado/expansível, estes ainda apresentam dificuldades em produzir um efluente com qualidade compatível com a legislação vigente. Deste modo, torna-se necessário um tratamento adicional, que complemente a remoção principalmente de matéria orgânica, fósforo e organismos patogênicos (CHERNICHARO, 1997).

3.2. Flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios

Diversos trabalhos de aplicação da FAD como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios foram desenvolvidos no SHS-EESC-USP, e são apresentados na Tabela 3.3. Segundo Penetra (1998), um sistema de reatores anaeróbios seguido de sistemas de FAD constitui alternativa bastante atraente, capaz de promover elevado grau de tratamento de esgotos sanitários.

Almejando uma maior eficiência do processo de FAD na remoção de matéria orgânica e fósforo de efluentes de reatores anaeróbios de leito expansível, Penetra (2003) realizou ensaios de bancada com o equipamento flotatest e ensaios em escala piloto utilizando uma associação entre FeCl_3 e polímeros como agentes da coagulação/floculação. Foram estudadas dosagens de cloreto férrico entre 15 e 92 mg.L^{-1} ($5,16$ e $31,68 \text{ mg Fe.L}^{-1}$) e polímero entre $0,25$ e $7,0 \text{ mg.L}^{-1}$. A determinação das variáveis adequadas de mistura rápida/floculação/FAD foi obtida através de ensaios de flotatest. Para uma dosagem de 50 mg.L^{-1} ($17,22 \text{ mg Fe.L}^{-1}$) de FeCl_3 , 20 min de tempo de floculação (T_f), gradiente de velocidade médio (G_f) de 80 s^{-1} , aplicação de $19,7 \text{ g}_{ar}.\text{m}^{-3}$,

18% de recirculação pressurizada a 450 ± 10 kPa e uma taxa de $180 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ aplicada na flotação do efluente do RALEx, produziu resultados com elevadas remoções de DQO (80,6%), de fósforo total (90,1%) e de sólidos suspensos totais (92,1%).

Tabela 3.3 - Teses e dissertações envolvendo FAD desenvolvidas no SHS-EESC-USP

Autor	Título do trabalho
Realí, M.A.P. (1984)	Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento
Coelho, E.R.C. (1990)	Estudo da taxa de aplicação superficial em uma instalação piloto de flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento de água para abastecimento
Realí, M.A.P. (1991)	Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo da flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante
Lima, M.R.A. (1996)	Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento das águas residuárias de uma indústria de papel visando a recuperação de fibras
Marchetto, M. (1996)	Estudo de uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de águas de abastecimento
Dombroski, S.A.G. (1996)	Influência das condições de floculação na eficiência da flotação por ar dissolvido de alta taxa aplicada ao tratamento de águas de abastecimento
Santos, S.P. (1997)	Estudo de uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento vertical entre placas, aplicada a remoção algas em águas de abastecimento
Patrizzi, L.J. (1998)	Redução do volume de lodo gerado em decantadores de estações de tratamento de água tradicionais utilizando espessamento por flotação, e por gravidade seguidos de centrifugação
Braga, G.A. (1998)	Emprego da flotação por ar dissolvido no pré-tratamento de efluentes líquidos de uma indústria cítrica
Penetra, R.G. (1998)	Pós-tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB)
Sartori, L. (1998)	Influência do uso de polímeros sintéticos no desempenho da flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento de água de abastecimento
Marchioretto, M.M. (1999)	Ozonização seguida de coagulação/floculação e flotação como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário
Pires, L.C. (2000)	Potencialidade da utilização de resíduos orgânicos removidos por flotação de efluentes líquidos de indústrias de alimentos como fonte de nutrientes para bovinos
Constanzi, R.N. (2000)	Estudos de tratamentos físico-químicos
Moruzzi, R.B. (2000)	Tratamento de água de abastecimento, contendo ácido húmico complexado com ferro e manganês, utilizando a flotação por ar dissolvido conjugada a oxidação química
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
Porto, T.G. (2001)	Tratamento avançado de esgoto sanitário em sistema sequencial composto por processo

Autor	Título do trabalho
	biológico anaeróbio, flotação, filtração em areia e em membranas
Marchetto, M. (2001)	Remoção de nutrientes do efluente de reator anaeróbio utilizando reatores microaeróbio e com aeração intermitente seguidos de flotação por ar dissolvido
Centurione Filho, P.L.(2002)	Desenvolvimento e operação de uma instalação de flotação de bancada para águas de abastecimento
Patrizzi, L.J. (2002)	Remoção de ferro, manganês e substâncias húmicas de água para abastecimento utilizando unidade de flotação por ar dissolvido de alta taxa e oxidação química
Carvalho, M.E. (2003)	Flotação de alta taxa aplicada ao pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios
Penetra, R.G. (2003)	Flotação aplicada ao pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio de leito expandido tratando esgoto sanitário
Bueno, F.B.A (2005)	Tratamento de água de abastecimento contendo cianobactérias e microcistina em sistema constituído por etapas de pré-cloração, coagulação/floculação, flotação e adsorção em carvão ativado
Moretti, R.C. (2005)	Emprego da flotação lamelar de alta taxa e convencional como pós-tratamento do efluente de sistema constituído de reator anaeróbio seguido de reator aeróbio tratando esgoto sanitário
Moruzzi, R.B. (2005)	Avaliação da influência da distribuição de tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho da flotação com utilização de sonda ultra-sônica e técnica de análise por imagem
Oliveira, A.L.(2007)	Floto-filtração como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio tratando esgoto sanitário

3.3. Emprego de polímeros no tratamento de águas residuárias

Os polímeros utilizados no tratamento de águas residuárias são compostos orgânicos sintéticos ou naturais normalmente de longas cadeias moleculares, e tem a capacidade de apresentar sítios ionizáveis ao longo da cadeia atuando como coagulantes ou auxiliares de floculação. Dependendo da carga superficial predominante, podem ser classificados como catiônicos, aniônicos, não-iônicos ou anfotéricos. Outros parâmetros que caracterizam os polímeros são o peso molecular (PM) e a densidade de carga (DC) (AISSE et al., 2001; BOLTO, 1995).

A Tabela 3.1 mostra os aspectos positivos e negativos do uso de polímeros no tratamento de águas residuárias e/ou de abastecimento.

Tabela 3.1 - Aspectos positivos e negativos do emprego de polímero no tratamento de águas residuárias e/ou de abastecimento

Aspectos Positivos	Aspectos Negativos
Menor volume de lodo produzido	Há preocupação sobre a toxicidade dos residuais de polímeros catiônicos em ambientes aquáticos
Aumento da taxa de separação das fases sólido-líquido	Dosagem excessiva pode promover a reestabilização das partículas
Menor dependência do pH	Algumas soluções de polímero são susceptíveis a biodegradação quando estocadas
Redução da dosagem de coagulantes (FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)	Os custos operacionais podem ser maiores
Diminuição da concentração de sais no efluente final	
Aplicável a diferentes tipos de águas	

Fonte: Adaptado de Bolto (1995)

3.4. Floto-filtração aplicada ao tratamento de água de abastecimento

Por não ser o objetivo desta pesquisa, alguns artigos relevantes sobre a tecnologia de floto-filtração aplicados ao tratamento de águas de abastecimento serão brevemente descritos ou apenas citados. Muitos são os trabalhos que utilizaram os sistemas de floto-filtração com este objetivo, principalmente no tratamento de águas de mananciais com grandes concentrações de algas.

Eades e Brignali (1995) desenvolveram um sistema que conjuga em uma mesma unidade a filtração e a FAD em contra-corrente, denominado COCO-DAFF (Counter-

Current Dissolved Air Flotation Filtration) apresentado na Figura 3.1. A principal diferença da floto-filtração convencional é que na COCO-DAFF a recirculação pressurizada é introduzida a uma distância segura do lodo flotado minimizando a quebra de flocos (CROSSLEY e VALADE, 2006).

Figura 3.1. Módulo de floto-filtração (COCO-DAFF). Legenda: (1) Canal de água de lavagem, (2) Flotado, (3) Canal de saída do flotado, (4) Câmara de entrada, (5) Tubulação de entrada, (6) Bocal de recirculação da flotação por ar dissolvido, (7) Canal de saída do resíduo de retrolavagem, (8) Vertedor do efluente retrolavado, (9) Camada de antracito, (10) Camada de areia, (11) Bocais do filtro, (12) Saída do filtrado e entrada da água de lavagem, (13) Câmara do efluente filtrado

Fonte: Adaptado de Crossley e Valade (2006)

Officer, Ostrowski e Woollard (2001) relatam que uma das grandes vantagens do processo por COCO-DAFF é que qualquer perda de partículas suspensas no lodo durante a sua remoção pode ser capturada pela manta de bolhas e flotando de volta para a superfície. Outro ponto importante seria a introdução da água recirculada num ponto onde grande parte dos flocos já foi removida, evitando a quebra dos mesmos na zona de introdução de água saturada. Os autores têm evidências que a floculação ocorre em elevado grau na célula de flotação, não necessitando utilizar floculadores mecânicos à montante da célula de flotação, bastando o uso de floculadores hidráulicos. Os sistemas

COCO-DAFF possuem elevado grau de adaptação a uso de filtros com diferentes profundidades.

Na ETA do reservatório Ballinress, localizado no nordeste da Irlanda, o antigo sistema era constituído de floculação/decantação/filtração rápida. Devido a proliferação de algas em determinadas épocas do ano os clarificadores existentes apresentavam baixas eficiências para água bruta de entrada, normalmente com cor de 200 uC, turbidez de 1,0 NTU e algas em número de 9000 células.mL⁻¹. Com a construção de um novo sistema composto por COCO-DAFF, no lugar dos decantadores e filtros separados, grandes melhorias foram constatadas. O sistema novo tratava uma vazão de 6,1 m.h⁻¹ e possuía leito filtrante com camada de areia de 1000 mm com granulometria entre 0,84 e 1,70 mm. O sistema de lavagem era com água e ar. A mistura rápida e floculação eram realizadas hidraulicamente, sendo adicionado 0,04 mg.L⁻¹ de polieletrólito no floculador. Essa unidade de COCO-DAFF produziu água com turbidez <0,1 NTU e apresentou carreiras de filtração com duração de até 30 horas. Segundo os autores, uma das desvantagens deste sistema COCO-DAFF é a redução da profundidade da zona de contato da flotação quando comparadas com a FAD convencional. Como consequência, reduz-se a manta de bolhas e as probabilidades de colisão entre sólidos e bolhas, reduzindo a sua captura.

Amato et al. (2001) citam que a qualidade do efluente flotado/filtrado e o tempo de duração da carreira de filtração são determinados principalmente pelo tipo de leito e método de operação dos filtros. Um estudo adicional dos autores foi avaliar o efeito da quantidade de ar dissolvido no efluente que segue para o filtro após a FAD. Valade et. al. (1996)² apud Amato et al. (2001) reportam que o ar possui quantidades insignificantes de particulados, porém ao adentrar no leito filtrante e acumular-se nos interstícios dos grãos, contribuíram para a colmatação do leito, reduzindo o tempo da carreira de filtração.

² VALADE, M. T.; EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E.; DALQUIST, J.; HEDBERG, T.; AMATO, T. (1996). Particle Removal by Flotation and Filtration: Pretreatment Effects. Journal AWWA, vol. 88, p. 35-47

Posteriormente, constatou-se que apesar da redução das carreiras de filtração, o efluente filtrado apresentou melhorias indicando o papel de filtração direta das bolhas inseridas no leito sobre os sólidos remanescentes. Em Fairfield (Connecticut, EUA), foi instalada uma unidade piloto que tratava água do reservatório Hemlocks com turbidez entre 0,61 NTU e 1,25 NTU e COT entre 2,9 mg.L⁻¹ e 3,3 mg.L⁻¹. Neste sistema foram dosados de 1,0 a 1,6 mg Al.L⁻¹ e 1,0 mg.L⁻¹ de polímero sintético catiônico. Na etapa de floculação utilizaram-se T_f de 7 min e G_f de 7 s⁻¹. A taxa de aplicação superficial no filtro, foi de 480 m³.m⁻².d⁻¹ sobre um leito de 2000 mm de antracito com granulometria entre 1,05 e 1,15 mm. Devido ao uso de polieletrólitos, a relação profundidade do filtro (L) / tamanho médio efetivo (D_{10}) foi tipicamente maior ($L/D_{10} = 1820$) quando comparado a filtração após tratamento físico-químico sem aplicação de polímeros.

Bauer et al. (1998) e Scriven et al. (1999) utilizaram a COCO-DAFF para tratamento de água de abastecimento com presença de algas, com objetivo principal de reter as algas na etapa de flotação (que possuem boa flotabilidade), preservando o filtro. O sistema COCO-DAFF destacou-se para tratamento de águas provenientes de reservatórios com de crescimento excessivo de algas, que acarretariam acelerado entupimento dos filtros com alimentação sem flotação prévia.

Além disso, Ferguson, Logsdon e Curley (1995), Montiel e Welté (1998) e Lainé et al. (1998) empregaram a FAD seguida por filtração em unidades separadas, para o tratamento da água de abastecimento provenientes de reservatórios com presença de algas. Especificadamente, Ferguson, Logsdon e Curley (1995) ao realizarem a filtração em leito de $D_{10}=1,5$ mm direta de água com turbidez afluenta entre 0,2 e 1,1 NTU, utilizando 0,02 mg.L⁻¹ de polímero associado a 6 mg Al.L⁻¹, obtiveram carreira de filtração de 12 horas, encerrada pela colmatção do filtro com carga hidráulica de 2,4 m.

Para as mesmas condições, porém sem adição de polímeros a carreira chegou a 16 horas sendo encerrada pelo transpasse.

No Brasil, Reali (1991) concebeu, construiu e operou um sistema compacto para tratamento de água de abastecimento que conjugava numa única estrutura as unidades de floculação, FAD e filtração, resultando em instalação de pequenas dimensões e fácil operação. A pequena área requerida em planta deveu-se ao bom aproveitamento dos espaços internos e ao fato de a flotação constituir um processo de alta taxa. Essas características permitiram que o sistema entrasse em regime de equilíbrio em espaços de tempo relativamente pequenos, mas mostrou-se sensível a variações bruscas na qualidade da água bruta e nas condições de floculação. De maneira geral, os resultados obtidos comprovaram que o sistema constitui alternativa tecnicamente viável para clarificação de águas de abastecimento.

Outros estudos utilizando a floto-filtração no tratamento de água foram realizados no Brasil por Pádua, Sales e Freire (2001). Os autores avaliaram a influência do pré-tratamento químico no desempenho de unidades de floto-filtração e de filtração direta descendente. Em instalação de floto-filtração a floculação era realizada em meio granular. Como coagulante utilizou-se o cloreto de polialumínio (PAC) nas dosagens de 2, 5, 10 e 30 mg.L⁻¹ associados aos polímeros ou não. Em alguns casos foi aplicado a pré-oxidação com 5 mg.L⁻¹ de cloro. Pelo fato da floculação ser realizada em meio granular, obteve-se principalmente ao utilizar polímeros como auxiliares de floculação, o acúmulo de impurezas no interior do meio granular, que provocou uma pré-filtração da água bruta. Em estudos de bancada, conclui-se que a pré-oxidação com cloro produziu uma água tratada com menor cor aparente. Ambas as configurações de tratamento (floto-filtração e filtração direta descendente) demonstraram-se eficientes para o tratamento de águas de abastecimento.

3.5. Floto-filtração aplicada ao tratamento de águas residuárias

Krofta et al. (1996) estudaram dois sistemas de pós-tratamento de esgoto sanitário verificando a capacidade de ambos, em produzir um efluente com turbidez $< 2,0$ NTU, próprio para reúso na irrigação paisagística. O efluente produzido pelas lagoas apresentou valores médios de turbidez de 82,5 NTU, 85,5 mg.L^{-1} de sólidos suspensos totais (SST), com coliformes fecais (CF) de no máximo 20/100mL. O primeiro sistema analisado era constituído por: lagoas de estabilização/floto-filtração (configuração I). O segundo tinha um incremento de uma FAD a montante da floto-filtração, configurando: lagoas de estabilização/FAD/floto-filtração (configuração II). Na primeira fase deste estudo, foi analisado o impacto do tipo e da concentração do coagulante e do floculante utilizados. Como resultado obteve-se uma dose adequada com 175 mg.L^{-1} $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ associado a 1 mg.L^{-1} de polímero aniônico de média densidade de carga (DC). Foram investigados diferentes mecanismos de floculação. Na segunda fase, verificou-se que somente sob moderadas vazões (4,54 a 9,08 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) durante os testes piloto com a configuração I foi possível alcançar a redução satisfatória da turbidez. Já a configuração II, obteve-se um melhor desempenho na clarificação sob uma vazão mais elevada (13,63 a 20,44 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$). Os coeficientes cinéticos dos sistemas investigados da flotação eram fixados pelos modelos empíricos de flotação. Concluiu-se através do estudo piloto, que a configuração II é capaz de absorver elevadas cargas de choque podendo ser usado para redução de grandes quantidades de sólidos sob altos carregamentos hidráulicos. Os autores do sistema modular de FAD/floto-filtração intitularam o módulo como KAMET (Krofta Advanced Municipal Effluent Treatment”) e recomendam esta nova tecnologia para ser utilizada como tratamento avançado de águas residuárias municipais, com finalidade no reúso do efluente tratado em irrigação de paisagens.

Buisine e Oemcke (2003) estudaram a estação de tratamento de águas residuárias de Bolívar, localizada no norte de Adelaide, Sul da Austrália, representando o maior sistema de lagoas de estabilização no hemisfério sul. Uma planta de FAD/filtração (FAD/F) foi instalada para o tratamento terciário a jusante das lagoas da estabilização fornecendo efluente tratado para a irrigação. Este sistema (lagoas de estabilização seguido por FAD/F) produziu efluente com 1500 mg.L^{-1} de sólidos dissolvidos totais (SDT), turbidez ($<15 \text{ NTU}$), SST (20 mg.L^{-1}) e CF ($<100 \text{ organismos/100mL}$). A unidade de FAD/F foi projetada para receber $6,25 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ de efluente das lagoas e utilizou taxas de filtração entre $216 \text{ e } 238 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ para as respectivas taxas de recirculação de 10% e 15%. Foram testados quatro (4) tipos de tratamento químico: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e pré-cloração, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e polímero; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, polímero e pré-cloração. Como resultados de laboratório, a associação $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (200 mg.L^{-1}) e polímero (3 mg.L^{-1}) e pré-cloração (20 mg.L^{-1}) foi a mais eficaz em termos de remoção de turbidez (97%). Notou-se na operação da planta de FAD/F, que o sistema é altamente dependente da população de algas na água bruta. Doses significativas de produtos químicos podem ser requeridas como resposta às mudanças rápidas da qualidade da água. Os autores reforçam que apesar dos bons resultados da FAD/F sob altas dosagens de produtos químicos, o ideal é reduzir os custos com o tratamento químico promovendo um manejo adequado das lagoas.

3.5.1. Sistemas de filtração no tratamento de esgotos sanitários

Na ETE Cambuí (SANEPAR), Aisse et al. (2007) utilizaram unidades piloto de filtração para remoção suplementar de SST do efluente proveniente de tratamento físico-químico com flotação, que dosava FeCl_3 (65 mg.L^{-1}), atuando como pós-tratamento de reator anaeróbio. O filtro foi operado ora com fluxo descendente sobre um leito duplo (55 cm de carvão de $D_{10}=0,99 \text{ mm}$ seguido de 25 cm de areia de $D_{10}=0,45 \text{ mm}$) ora com fluxo

ascendente sob leito simples (80 cm de areia com $D_{10}=0,60$ mm). Utilizando TAS entre 100 e $200 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ na filtração descendente com 1,70 m de carga hidráulica disponível o ensaio era encerrado quando a perda de carga (medida por piezômetros externos) fosse igual a carga hidráulica máxima disponível no filtro. Constatou-se neste estudo que ao aplicar uma TAS ($200 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) num afluente com as seguintes características: DQO ($86,3\pm14,4 \text{ mg.L}^{-1}$), turbidez ($89,3\pm10,1 \text{ NTU}$) e SST ($71,0\pm7,1 \text{ mg.L}^{-1}$), produziu-se um efluente pós-filtrado com: DQO ($73,0\pm23,4 \text{ mg.L}^{-1}$), turbidez ($29,3\pm7,6 \text{ NTU}$) e SST ($19,3\pm0,6 \text{ mg.L}^{-1}$). Nesta situação o tempo de duração da carreira de filtração foi de 6 horas. Após o encerramento era realizada uma lavagem com taxa de $1296 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ durante 15 min.

Em escala de bancada, Tobiasson et al. (1993) investigaram os efeitos do tamanho de partículas em suspensão na filtração direta de uma solução preparada com microesferas de poliestireno. O filtro utilizado era uma coluna de acrílico preenchida com leito com partículas de $D_{10}=0,4$ mm submetido a uma TAS de $115 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. Foi comparado o efeito na colmatção do filtro ao utilizar polímeros catiônicos ou CaCl_2 na desestabilização química das partículas. A remoção global de partículas foi semelhante para ambos coagulantes. Entretanto, o uso de polímeros como coagulante primário acarretou uma perda de carga maior (115 cm contra 58 cm após 7 horas) no filtro quando comparado ao uso de CaCl_2 na desestabilização de partículas.

Com a utilização de polímero, as partículas $<0,27 \mu\text{m}$ tiveram 83% da perda de carga nos primeiros 2 cm do filtro. Esse percentual foi de 72% ao utilizar CaCl_2 , indicando que as partículas menores que $0,27 \mu\text{m}$ desestabilizadas com polímero apresentaram maior dificuldade penetração no filtro. Entretanto, para as partículas de $1,32 \mu\text{m}$, os coagulantes contribuíram de maneira igual para a colmatção do filtro.

A tecnologia de floto-filtração na configuração utilizada nesta presente pesquisa para o tratamento de esgoto sanitário, requer todos os cuidados que os sistemas unitários de FAD e filtração necessitam, principalmente, no que tange a filtração. No caso desta pesquisa, a etapa de FAD não podia continuar em operação caso ocorresse a colmatação do filtro, uma vez que a saída do efluente era unicamente pela parte inferior da unidade, ou seja, inferior ao filtro de areia. Portanto, mais do que obter um resultado com baixa concentração de sólidos no efluente flotado ao inserir polímeros na etapa de floculação, esta pesquisa propôs monitorar o filtro, através de piezômetros e coletas ao longo do leito filtrante, a fim de verificar o perfil de colmatação do filtro ao utilizar polímeros associados ao cloreto férrico durante flotação.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Considerações iniciais

Devido às variações das características do efluente do RALEx ao longo do dia, foi adotado um procedimento para verificar a faixa de variação de turbidez e cor aparente no reator, com propósito de utilizar amostras do RALEx com variações máximas e mínimas nos ensaios de flotação por ar dissolvido em escala de bancada (flotatestes).

Os ensaios de flotatestes foram realizados com intuito de direcionar as dosagens de cloreto férrico (expressada em mg Fe.L^{-1}) e dosagens de polímero a serem aplicadas inicialmente em escala piloto.

A etapa de ensaios piloto é considerada a mais relevante para esta pesquisa, por possibilitar a avaliação do uso de polímeros no tratamento e o seu efeito em filtro de areia com dimensões representativas. Dessa maneira, os ensaios foram divididos em três etapas principais:

- ETAPA I: verificação de faixa de variação de turbidez e cor aparente no efluente do RALEx durante 24 horas;
- ETAPA II: ensaios de flotatestes;
 - IIA - Fases 1 e 2: ensaios para seleção do polímero sintético catiônico de alto peso molecular utilizando amostras do RALEx coletadas às 7h e 17h;
 - IIB - Fases 1 e 2: variação das dosagens de cloreto férrico (DCF) associadas as dosagens do polímero selecionado utilizando amostras do RALEx coletadas às 7h e 17h;
- ETAPA III: ensaios na unidade piloto de pós-tratamento do RALEx por mistura rápida/floculação/floto-filtração.

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma geral dos ensaios realizados nesta pesquisa, bem como as instalações utilizadas em suas respectivas escalas de trabalho.

Figura 4.1. Fluxograma geral dos ensaios em escala de bancada e piloto com suas respectivas instalações experimentais nos quais foram desenvolvidos os trabalhos

Para a caracterização dos efluentes, as variáveis foram quantificadas por métodos padronizados dispostos no “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005). Tais variáveis foram as seguintes:

- Condutividade: Método 2510 B
- Série de sólidos: Método 2540.
- DQO: Método 5220 D (colorimétrico a 600 nm após refluxo fechado);
- $P-PO_4^{-3}$: Método 4500-P G (colorimétrico a 880 nm por FIA)
- $N-NH_4^{+}$: Método 4500-NH₃ H (colorimétrico a 630 nm por FIA)
- NTK: Método 4500-N_{org} B (Kjeldahl)
- Turbidez: Método 2130 B (Nefelométrico), USEPA 180.1 (1993) e ISO 7027 (1999);

- Cor aparente: Método 2120 C (amostra não filtrada e medida a 455 nm)
- Coliformes Fecais: Método 9222 B
- Coliformes Totais: Método 9222 B
- Metais: Método 3110 (Zn, Pb, Ni, Fe, Mn, Cu, Cr)
- OD: Método 4500 G (Eletrodo)
- Sulfato: Método 4500-SO₄²⁻ F (colorimétrico a 460 nm)
- Abs_{254nm}: Método 5910 B (leitura da absorbância a 254 nm);
- pH: Método 4500-H⁺ B (potenciométrico);
- A alcalinidade e os ácidos voláteis foram quantificados por método titulométrico adaptado de Ripley et al. (1986);

4.2. Produtos químicos utilizados

4.2.1. Cloreto férrico

Durante os ensaios de bancada e piloto utilizou-se como coagulante solução comercial de cloreto férrico (FeCl₃). As características do produto utilizado, segundo o fabricante são:

- FeCl₃: 38 a 40 (%)
- Fe_{II} (Fe_{II}/Fe_{total}) 2,5 (máx.) (%)
- Massa específica 1,40 (g.cm⁻³)
- Material insolúvel 0,10 (máx.) (%)
- pH < 1 -
- Acidez livre 1,21 (HCl livre) (%)

Para universalização da interpretação de dosagens de coagulante, neste trabalho as concentrações de coagulante foram expressadas em mg Fe.L^{-1} . A concentração em mg Fe.L^{-1} é relativa a concentração de ferro total e não apenas de Fe^{3+} .

4.2.2. Polímeros

O ponto de partida para a seleção dos polímeros baseou-se nos resultados obtidos em Penetra (2003) e Moretti (2000), que obtiveram melhor qualidade do efluente final flotado, em escala de bancada, ao utilizar polímeros sintéticos catiônicos de alto peso molecular (quando comparados com polímeros aniônicos, não-iônicos e catiônicos de baixo e médio peso molecular) tratando esgoto sanitário por FAD.

Selecionaram-se para testes diversas variações de polímeros sintéticos catiônicos de alto peso molecular com diferentes densidades de carga, classificadas como: baixa, média, médio-alta, alta e altíssima.

Os polímeros usados nesta pesquisa foram cedidos gratuitamente por diferentes fabricantes e estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características dos polímeros utilizados nos ensaios de flotatestes

Polímero	Fabricante	Carga	Densidade de Carga	Peso molecular	Forma
8110 pulv	NALCO	Catiônico	Baixa	Alto	Granular
CP-1604	GE BETZ	Catiônico	Média	Alto	Granular
8140	CIBA	Catiônico	Média	Alto	Granular
8160	CIBA	Catiônico	Médio-alta	Alto	Granular
8185	CIBA	Catiônico	Alta	Alto	Granular
8589	NALCO	Catiônico	Altíssima	Alto	Granular

4.3. ETAPA I – Verificação da faixa de variação de turbidez e cor aparente do efluente do RALEx

4.3.1. Instalações experimentais

As instalações experimentais utilizadas nesta ETAPA I e das demais etapas em escala piloto localizam-se no setor nordeste da área I da EESC-USP.

4.3.1.1. Reator anaeróbio de leito expansível (RALEx)

O reator utilizado foi edificado em 1996 na Escola de Engenharia de São Carlos - USP, como parte integrante do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), especificamente no tema “Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo”, naquele período sob coordenação do Prof. José Roberto Campos. Sua fabricação, segundo Pereira (2000), foi em aço zincado a quente. O RALEx possuía uma altura de 14,9 m com volume útil de 32 m³ sendo dividido em câmara de reação e câmara de sedimentação. A câmara de reação era destinada a degradação do material orgânico e abrigava o leito suporte com biomassa aderida ao longo de seus 12 m de altura e 1,5 m de diâmetro, com leito sujeito a expansão quando aplicada V_{asc} suficiente para este fim.

O uso do leito suporte utilizado nesta presente pesquisa foi idealizado e implantado no projeto de Doutorado de Cristiano Luchesi Niciura (2005), intitulado “Avaliação da Banda de Rodagem de Pneu Inservível Triturada como Suporte ao Desenvolvimento de Biofilme em Reator Anaeróbio de Leito Expansível. O leito suporte era constituído de bandas de rodagens trituradas de pneus inservíveis com diâmetro médio de 4,3 mm e massa específica média de 1,14 g.cm⁻³ ocupando 8 metros de altura no reator quando em repouso. A câmara de sedimentação tinha um formato propício à sedimentação de sólidos

com suas paredes suavemente inclinadas. Sua altura era de 2,9 m, diâmetro da base com 1,5 m e diâmetro de topo com 2,5 m. Para mais informações, consultar Niciura (2005).

Nesta presente trabalho, o RALEx não possuía recirculação de efluente, o que permitiu alcançar velocidades ascensionais de até $3,96 \text{ m.h}^{-1}$, caracterizando, segundo Niciura (2005), um reator anaeróbio de leito **EXPANSÍVEL**. A vazão de bombeamento de esgoto sanitário bruto era de aproximadamente $7,00 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, proveniente de interceptor da rede pública da cidade que atravessava a área I da EESC-USP. O tempo de detenção hidráulica (TDH) total do RALEx era aproximadamente 4,57 h. O sistema experimental anaeróbio era constituído por:

1. Interceptor de esgoto sanitário (diâmetro nominal de 200 mm);
2. Gradeamento: 25 mm de espaçamento entre barras, 10 mm de espessura e inclinação de 45° ;
3. Desarenador: 3 caixas de dimensões 0,60 m x 1,00 m interligadas na parte superior por tubo de diâmetro nominal de 100 mm;
4. Poço de sucção em concreto armado com volume útil de $2,7 \text{ m}^3$;
5. Uma bomba helicoidal, com pressão máxima de 588 kPa e sucção máxima de 8 mca acoplada a um motor elétrico, com potência de 5 cv e frequência de 60 Hz;
6. Poço em concreto armado de armazenamento do efluente do RALEx com volume útil de $3,78 \text{ m}^3$;
7. Painel eletrônico com dois indicadores de pressão digitais na faixa de 0/32 mca, botoeira de controle dos conjuntos moto-bomba e indicadores de operação (tempo de funcionamento das bombas, rotação dos motores, voltagem e amperagem);
8. Dois transmissores eletrônicos de pressão com selo e amortecedor de pulsação na faixa de 0/310 kPa;
9. Medidor de volume de gás.

A Figura 4.2 ilustra o sistema biológico da ETE piloto experimental utilizada e as unidades de pré-tratamento.

Figura 4.2. Fotos do reator anaeróbio de leito expansível (RALEx) localizado na setor nordeste da área I da EESC-USP. Legenda: (1) RALEx (vista frontal), (2) RALEx (vista lateral), (3) painel elétrico de comando, (4) gradeamento à montante do reator, (5) conjunto motobomba de recalque de esgoto sanitário, (6) banda de rodagem de pneus inservíveis triturada utilizada como leito suporte do RALEx

4.3.2. Procedimentos para coleta de amostras do efluente do RALEx

Para a realização dos ensaios de flotatestes foram determinados padrões de coleta, com vistas à obtenção de ensaios de bancada que representassem a variação das características do efluente anaeróbio produzido no RALEx ao longo do dia. A partir desta premissa foi feito um (1) ensaio que balizasse a escolha correta dos horários de

coleta de amostras. Este ensaio consistiu em coletas durante 24 horas consecutivas, do esgoto sanitário e do efluente anaeróbio, em intervalos de hora em hora, dos quais se mediu turbidez e cor aparente das amostras pontuais. O ensaio ocorreu das 11h do dia 18/10/2006 até as 11h do dia 19/10/2006, período selecionado por não registrar precipitação pluviométrica no dia e em até dois dias anteriores (contribuem para diluição do esgoto sanitário).

Outro critério preponderante para a seleção dos horários adequados para a coleta de amostras do RALEx foi a avaliação da variação de turbidez e SST no efluente anaeróbio ao longo dos estudos realizados por Niciura (2005) e Oliveira (2007), que operaram o reator em condições semelhantes a desta presente pesquisa.

A ETAPA I estruturou-se sob a forma apresentada na Figura 4.3.

Figura 4.3. Fluxograma da ETAPA I referente aos ensaios para padronização das coletas de amostras a serem utilizadas nos ensaios de flotatestes da ETAPA II

A limpeza da câmara de sedimentação e das elevatórias era por succionamento do lodo sedimentado por caminhões limpa-fossa. A periodicidade era determinada pela deterioração da qualidade do efluente do RALEx. Entretanto, não foi realizado nenhum acompanhamento metodológico, a não ser observacional que relacionasse a qualidade do efluente do RALEx com o período de limpeza do sistema.

4.4. ETAPA II – Ensaios de flotateste

4.4.1. Descrição das instalações experimentais

As instalações experimentais em escala de bancada utilizadas nesta pesquisa situavam-se no Laboratório de Tratamento Avançado e Reúso (LATAR).

4.4.1.1. Unidade de mistura rápida e adição de polímero

Para realizar a mistura rápida das amostras de efluente do RALEx em escala de bancada foi usado o equipamento de agitação em bancada, o qual era composto por seis jarros com volume útil de 2 L, cada jarro. O aparelho continha pás agitadoras com rotação controlada em RPM que podia ser convertido em $G \text{ (s}^{-1}\text{)}$ através de ábaco próprio do aparelho.

4.4.1.2. Unidade de floculação e flotação por ar dissolvido em escala de bancada

O equipamento de floculação/FAD, denominado Flotateste, foi concebido no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP sendo amplamente utilizado em pesquisas desenvolvidas no LATAR. O aparato visualizado na Figura 4.4 era composto por quatro colunas cilíndricas de acrílico onde se realizava os processos físico-químicos de floculação e FAD. Suas dimensões eram de 60 mm de diâmetro interno, 900 mm de altura, 5 mm de parede perfazendo um volume útil de 2,5 L. Cada coluna podia ser utilizada isoladamente das outras, pois todas eram interligadas individualmente à câmara de saturação. Na unidade de bancada constavam: agitador individual (tipo eixo vertical, paletas paralelas ao eixo, dois braços e uma paleta por braço) impulsionado por meio de conjunto motorreductor e ligado ao regulador de rotação para controle do gradiente de velocidade médio durante a floculação.

Figura 4.4. Equipamento Flotateste desenvolvido na EESC-USP para ensaios de FAD em escala de bancada. Legenda: (1) regulador de tensão, (2) válvula de agulha, (3) motorredutor, (4) manômetros, (5) coluna de flotação, (6) câmara de saturação.

Para saturação da água com ar atmosférico, o equipamento era provido de uma câmara, interligada às colunas de flotação. Tal unidade era um cilíndrico acrílico com espessura de parede de 10 mm, 105 mm de diâmetro interno e 1000 mm de altura. Para controle operacional, o equipamento possuía: válvula de segurança, manômetros, entrada e saída de ar comprimido; e entrada de água proveniente da rede de abastecimento público, utilizada na câmara de saturação e lavagem das colunas. Um compressor de ar de 756 W, 850 RPM, abastecia com ar atmosférico a câmara de saturação. A entrada da água saturada de ar nas colunas de flotação era controlada por válvulas de agulha posicionadas na parte inferior das colunas.

Ao longo das colunas de flotação existiam pontos de coleta por orifícios conectados a mangueiras que permitiam a coleta de amostras em tempos pré-determinados correspondentes às velocidades de flotação de trabalho.

A partir da caracterização dessas amostras coletadas foram construídas as “curvas de flotação”, conforme método proposto por Reali (1991).

4.4.2. Procedimentos utilizados nos ensaios de flotatestes

4.4.2.1. Considerações iniciais

Os ensaios de flotatestes tiveram como premissa produzir um efluente após flotação com turbidez <10 NTU.

Foram utilizados seis tipos distintos de polímeros sintéticos catiônicos de alto peso molecular, descritos na Tabela 4.1. Contudo, para aplicação nos ensaios piloto foi necessário selecionar dentre os polímeros, o que apresentasse desempenho satisfatório nas dosagens de 0,1; 0,2; 0,3; e 0,4 mg.L⁻¹ associados ao FeCl₃, na remoção de turbidez perante as variações mínimas e máximas de turbidez do efluente do RALEx. Com o polímero selecionado foi realizada a variação das dosagens de cloreto férrico (expressada em mg Fe.L⁻¹).

As amostras de efluente do RALEx usadas nesta ETAPA II foram coletadas em horários definidos por metodologia abordada no item 4.3.2. Deste modo, os ensaios de flotatestes foram divididos em dois segmentos (IIA e IIB), e estes em duas fases (1 e 2).

ETAPA IIA: ensaios de flotatestes para seleção do polímero sintético catiônico de alto peso molecular.

Fase 1: testes com efluente do RALEx coletado às 7h

Fase 2: testes com efluente do RALEx coletado às 17h

ETAPA IIB: variação das DCF nos ensaios de flotatestes com uso associado do polímero selecionado.

Fase 1: testes com efluente do RALEx coletado às 7h

Fase 2: testes com efluente do RALEx coletado às 17h

As Figura 4.5 e 4.6 explicitam em detalhes como foram realizadas as ETAPAS IIA e IIB.

ETAPA IIA

Figura 4.5. Fluxograma dos ensaios de flotatestes para seleção do polímero sintético catiônico de alto peso molecular a ser utilizado nos ensaios piloto

ETAPA IIB

Figura 4.6. Fluxograma dos ensaios de flotatest para variação das dosagens de cloreto férrico (expressada em mg Fe.L⁻¹) associadas ou não ao polímero

É importante frisar que esta pesquisa é um trabalho seqüencial de Oliveira (2007) e algumas variáveis do processo já estudadas, não foram reavaliadas.

4.4.2.2. Variáveis utilizadas nos ensaios de bancada

Para este presente trabalho, foram adotados os valores de variáveis utilizadas no trabalho piloto de floto-filtração em Oliveira (2007). As variáveis adotadas foram: taxa de aplicação superficial ao filtro (TAS), tempo de floculação (T_f), taxa de recirculação (R%) e quantidade ar fornecida a FAD (S^*), gradiente médio de velocidade de floculação (G_f) e pressão na câmara de saturação (P_{sat}).

A adição de polímero em diferentes concentrações (0,1; 0,2; 0,3; 0,4 mg.L⁻¹) sob gradiente médio de velocidade de aplicação do polieletrólito (G_p) e tempo de floculação do mesmo (T_p) foi o principal incremento da presente pesquisa em relação a Oliveira (2007).

Os valores das variáveis foram retirados do ensaio piloto de maior TAS (300 m³.m⁻².dia⁻¹) presente na pesquisa de doutoramento de André Luiz de Oliveira (2007), e que resultou num efluente final com características compatíveis com a Resolução CONAMA 357/05. Como variáveis operacionais adotaram-se: $V_F = 20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_f = 18 \text{ min}$; $R = 15\%$ ($S^* = 12 \text{ g}_{ar}.\text{m}^{-3}$); $G_f = 90 \text{ s}^{-1}$ e $P_{sat} = 450 \pm 10 \text{ kPa}$. Apenas a etapa de mistura rápida não foi possível reproduzir em escala de bancada com os mesmos G_{mr} (s⁻¹) e T_{mr} (s) aplicados na unidade piloto de Oliveira (2007), pelo fato de a mistura rápida ocorrer em um misturador estático em linha que produz G_{mr} entre 2000 e 7000 s⁻¹, incompatível com o agitador mecânico de bancada. Deste modo, foi adotado $G_{mr} = 800 \text{ s}^{-1}$ e um $T_{mr} = 20 \text{ s}$. A introdução do polímero como auxiliar de flotação nos ensaios de bancada foi realizada no agitador mecânico imediatamente após término da etapa de mistura rápida, com diminuição do G_p até o valor 308 s⁻¹ com tempo de homogeneização de 10 s no próprio

equipamento. Após 10 s, o efluente era transferido manualmente para o flotatestes onde submetia-se a floculação e flotação por dissolvido.

- *Gradiente de velocidade médio no ponto de injeção do polímero*

Em escala piloto, a solução de polímero, preparada a 0,04%, foi adicionada no efluente do RALEx por meio de uma conexão (Figura 4.7) entre a mangueira de recalque da bomba dosadora peristáltica e a tubulação (DN=50mm) de alimentação do floculador. Portanto, para conhecimento do G_p que o polímero era submetido na tubulação da ETE piloto, e para sua correta simulação em escala de bancada nos ensaios de flotatestes fez-se necessário o cálculo do G_p , segundo a equação (1) proposta por Camp & Stein (1943)³ apud Vianna (1997):

$$G_{méd} = \sqrt{\frac{\gamma \times U^3 \times f}{8 \times R_h \times g \times \mu}} \quad (1)$$

$G_{méd}$: gradiente de velocidade médio (s^{-1});

g : aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$);

R_h : raio hidráulico do tubo (m);

U : velocidade média de escoamento do líquido no tubo ($m.s^{-1}$);

f : $f(Re, k/d)$ - coeficiente de atrito - (diagrama de Moody);

μ : coeficiente de viscosidade dinâmica do líquido a 20°C ($N.s.m^{-2}$);

γ : peso específico do líquido ($N.m^{-3}$);

³ CAMP, T. R; STEIN, P.C. Velocity gradients and internal work in fluid motion. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 1943., vol. 85. p. 219-237.

Figura 4.7 Ponto de injeção do polímero no efluente do RALEx logo após mistura rápida

- *Quantidade de ar fornecida*

O cálculo de ar fornecido ao processo de FAD durante os ensaios de flotatestes foi extraído de Oliveira (2007) e apresenta na Tabela 4.2 os valores das variáveis relacionadas à saturação da água com ar. Estes valores foram utilizados como referência para realização dos ensaios presentes nesta pesquisa. Foi utilizada câmara ventilada nos ensaios de flotatestes em escala de bancada.

Tabela 4.2 - Concentração teórica de ar em equilíbrio na câmara de saturação com ventosa (flotatestes)

C_a (g.m ⁻³)	C_{s*} (g.m ⁻³)	$C_{s,0}$ (g.m ⁻³)	$C_{s,n}$ (g.m ⁻³)	$Y_{s,0}$	$Y_{s,n}$
18,67	115,04	42,88	72,17	0,209	0,791
T (°C)	P_{sat} (kPa)	H_0	H_n	C_{ar} para R = 15% (g.m ⁻³)'	
25,00	537,2	33,80	66,50	14,00	

Fonte: Adaptado de Oliveira (2007)

C_a : concentração mássica de ar na água de alimentação da câmara (g.m⁻³);

T: temperatura da água (°C);

$C_{s,0}$: concentração teórica de oxigênio na água em equilíbrio com o colchão de ar (rico em nitrogênio) no interior da câmara (g.m⁻³);

$C_{s,n}$: concentração teórica de nitrogênio na água em equilíbrio com o colchão de ar (rico em nitrogênio) no interior da câmara (g.m⁻³);

- C_{s*} : concentração teórica de ar na água efluente da câmara de saturação;
- P_{sat} : pressão absoluta de saturação (pressão lida no manômetro + pressão atmosférica local);
- $Y_{s,0}$: de acordo com a Figura 4.8, para 25 °C, temperatura considerada nos ensaios, é igual a 0,133 (sem ventosa – instalação piloto), com ventosa é 0,209 (flotateste);
- $Y_{s,n}$: $1 - Y_{s,0}$ que resulta em 0,867 (sem ventosa – instalação piloto), com ventosa o valor é 0,781 (flotateste)
- H_0 : valor da constante de Henry para 25 °C para o gás oxigênio;
- H_n : valor da constante de Henry para 25 °C para o gás nitrogênio;
- C_a : concentração de ar disponível para a flotação em flotateste.

Figura 4.8. Composição equilibrada de ar saturado a diferentes pressões de saturação. Fonte: Steinbach e Haarhoff (1998)

4.5. ETAPA III – Ensaios piloto de pós-tratamento do RALEx por mistura rápida/floculação/floto-filtração

4.5.1. Considerações iniciais

A ETE experimental localizada no setor nordeste da área I da EESC-USP foi o local dos ensaios piloto. O esgoto sanitário era proveniente da rede coletora municipal de São

Carlos/SP. Foram realizados sete ensaios piloto que seguiram a dinâmica apresentada na Figura 4.9, todos utilizando as mesmas estruturas experimentais. Não foi realizado uma bateria de ensaio somente com água e microbolhas para simulação da perda de carga no filtro de areia, ocasionada pelo acúmulo de microbolhas.

Na Figura 4.10 são apresentadas as estruturas experimentais da ETE piloto e a disposição das unidades no setor nordeste da área I da EESC-USP.

Figura 4.10. Esquema em planta da ETE piloto localizada no setor nordeste da área I da EESC-USP

4.5.2. Descrição das instalações da ETE experimental piloto

O RALEx e unidade de pré-tratamento utilizados nesta pesquisa foram descritos no item 4.3.1.1 desta dissertação.

4.5.2.1. Unidade piloto de pós-tratamento do RALEx por floto-filtração

A unidade utilizada foi implantada em 2005 no projeto de Doutorado do Engenheiro André Luiz de Oliveira, que teve como objetivo realizar o pós-tratamento em escala piloto de efluente anaeróbio visando remoção adicional de material suspenso com o uso da filtração após etapa de flotação utilizando FeCl_3 , no denominado sistema de floto-filtração.

Nesta presente pesquisa foram incluídos equipamentos pertinentes a utilização de polímeros.

4.5.2.2. Sistema dosador de cloreto férrico

A vazão afluente ao tratamento físico-químico era de $5,46 \pm 0,12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ durante todo ensaio piloto.

O sistema de dosagem de coagulante era regulado da seguinte maneira: para cada unidade de turbidez medida no turbidímetro de escoamento contínuo, dosava-se o volume correspondente de coagulante no efluente do RALEx. Essa medida evitava que a dosagem fosse insuficiente para picos de turbidez no efluente do RALEx, e também que as dosagens fossem em excesso, podendo ocasionar a re-estabilização de cargas ou simplesmente aumento o consumo de coagulante, desnecessariamente. Compunham o sistema de dosagem de cloreto férrico:

1. tanque em PRFV (2m^3) para armazenamento de solução comercial de FeCl_3 ;
2. tanque em PRFV (2m^3) para preparo da solução de FeCl_3 ($31254 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) com motorreductor e agitador (35 RPM) em PVDF;
3. bomba dosadora de diafragma da solução de FeCl_3 ($31254 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$);
4. turbidímetro de escoamento contínuo (TEC);
5. misturador rápido estático em linha.

Os tanques nos quais eram feitos o armazenamento e a diluição do FeCl_3 eram em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), próprios para o contato com o produto. A haste e paleta de agitação do produto foram feitas sob encomenda sendo fabricada em PVDF, própria para utilização neste tipo de solução.

A unidade de mistura rápida foi instalada na tubulação (DN=50mm) de alimentação do floculador e imprimia elevados gradientes através da redução e ampliação de maneira

abrupta dos diâmetros de passagem. O coagulante era aplicado no ponto de ampliação do misturador no qual havia maior dissipação de energia produzindo G_{mr} de 2000 s^{-1} a 7000 s^{-1} .

Na Figura 4.11 é possível visualizar a estrutura do sistema utilizado.

Figura 4.11 Equipamentos e unidades que compõem o sistema dosador de FeCl_3 . Legenda - (1) turbidímetro de escoamento contínuo, (2) tanque de preparo de solução de FeCl_3 e agitador com 35 RPM, (3) misturador rápido estático em linha, (4) bomba dosadora de diafragma

4.5.2.3. Sistema dosador de polímero

O sistema apresentado na Figura 4.12 foi implantado para dosagem de polímero, selecionado na ETAPA IIA.

Os equipamentos e acessórios instalados foram:

1. tanque em polietileno de preparo do polímero (0,04%) com volume útil 198 L;

2. motorreductor (0,37 kW) e agitador (152 RPM) com haste e paleta;
3. bomba peristáltica dosadora;
4. luva perfurada e espigão para introdução de polímero na tubulação de recalque a montante do floculador.

Figura 4.12 Componentes do sistema de dosagem do polímero. Legenda: (1) tanque de preparo da solução 0,04% de polímero e agitador com 152 RPM, (2) bomba dosadora peristáltica

4.5.2.4. Floculadores

O sistema em sua concepção original era constituído de duas câmaras de floculação, cada qual com seu respectivo agitador mecânico, permitindo realizar um escalonamento de gradientes nas câmaras. Devido às vazões e tempos de floculação estudados, o uso restringiu-se a apenas uma câmara. A entrada do efluente coagulado era pela parte superior do floculador e a saída na parte inferior conforme Figura 4.13.

Para emprego do G_f desejado, o motorreductor do agitador foi interligado ao inversor de frequência que permitia o controle da rotação.

A Tabela 4.3 demonstra as características da câmara de floculação utilizada na pesquisa.

Tabela 4.3 - Características da câmara de floculação

Parâmetro	Unidade	Câmara
Volume útil	m ³	1,46
Área superficial	m ²	0,50
Diâmetro	m	0,80
Altura útil	m	2,90
Material	-	Aço Carbono

Figura 4.13. Floculadores mecanizados com sistema agitador de paletas.
Legenda: (1) dois floculadores que compõem a unidade piloto, (2) único floculador utilizado devido às limitações de vazão afluente

4.5.2.5. Sistema de saturação de ar

O sistema de saturação de ar no efluente recirculado, visualizado na Figura 4.14, tinha como constituintes:

1. câmara de saturação com recheio de PVC;
2. dois compressores de ar ligados em série;
3. bomba centrífuga de alimentação da câmara de saturação;
4. válvula reguladora de pressão (0 a 10 bar);
5. manômetros (0 a 10 bar).

A câmara de saturação possuía as características descritas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características da câmara de saturação não-ventilada

Dimensões	Unidade	Câmara de Saturação
Volume Útil	m ³	0,11
Área Superficial	m ²	0,06
Diâmetro	m	0,28
Altura Útil	m	1,80
Material	-	Aço Inox
<u>Recheio</u>		
Material	-	PVC DN 50 mm; Peças de 50 mm Altura
Altura	m	1,20

(1)

(2)

(3)

Figura 4.14. Sistema de saturação de ar atmosférico no efluente recirculado. Legenda: (1) câmara de saturação, (2) manômetro controle da câmara, (3) dois compressores de ar ligados em série

4.5.2.6. Câmara de contato

Unidade responsável pelo contato dos flocos com as microbolhas provenientes do efluente recirculado despressurizado. Para as mesmas condições operacionais desta presente pesquisa, Oliveira (2007) constatou que o tempo de contato mínimo da câmara previsto em projeto foi de 1 minuto. A Figura 4.15 demonstra em detalhes os locais de introdução do efluente floculado e do recirculado saturado com ar, bem como a válvula de agulha responsável pela regulagem da taxa de recirculação (R%).

Figura 4.15. Câmara de contato das microbolhas com flocos. Fonte: Adaptado de Oliveira (2007). Legenda: (1) entrada de efluente floculado, (2) entrada de efluente saturado com ar, (3) válvula de agulha

4.5.2.7. Sistema regulador de nível

Este sistema era responsável pelo controle nível d'água na câmara de floto-filtração. Os equipamentos detectavam variações no nível d'água de até 1 cm. A Figura 4.16 apresenta os seguintes equipamentos:

1. válvula de mola reguladora de nível (4 a 20 mA);
2. sensor de nível ultra-sônico (4 a 20 mA).

Figura 4.16. Sistema regulador de nível d'água na câmara de Floto-filtração. Legenda: (1) (2) (3) válvula angular de diafragma, (4) sensor de nível de ultra-sônico

A válvula angular de diafragma (VAD) por acionamento pneumático era interligada ao medidor de nível ultra-sônico através de sinal analógico de 4 a 20 mA. À medida que o

nível d'água no floto-filtro elevava-se, devido à menor permeabilidade pelo filtro de areia (aumento da perda de carga), a válvula abria-se proporcionalmente. Quando alcançava a perda de carga máxima no leito filtrante, a válvula encontrava-se totalmente aberta.

É recomendável a instalação de uma válvula de retenção e filtro na linha de ar de alimentação do acionamento pneumático da válvula. Esta proteção adicional evita a introdução de líquido no sistema de distribuição de ar da válvula.

4.5.2.8. Piezômetros

Ao longo do floto-filtro com leito de areia, existiam instalados dez piezômetros com distância entre eles de 20 cm, conforme demonstrados na Figura 4.17. O encaixe dos piezômetros com o corpo do filtro era por meio de adaptadores. Dentro dos adaptadores existia uma malha de aço-inoxidável com abertura de 1mm, com objetivo de evitar o arraste de areia para dentro das mangueiras transparentes. Antes de cada ensaio era realizada a limpeza interna dos piezômetros.

Figura 4.17. Sistema de monitoramento da perda de carga no leito filtrante. Legenda: (1) piezômetros externos instalados ao longo do filtro de areia com espaçamento de 20 cm entre eles, (2) pontos de coleta ao longo do filtro e instalados no mesmo nível dos piezômetros.

4.5.2.9. Filtro de areia

O leito filtrante era constituído de areia sendo a granulometria definida por ensaios no Departamento de Geotecnia da EESC realizado durante projeto de Doutorado André Luiz de Oliveira (2007). Suas características intrínsecas estão detalhadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Características do leito filtrante e da camada suporte utilizados na unidade piloto de floto-filtração

Leito filtrante					
Características	Unidade	Leito (0,7 – 1,0)			
Espessura da camada de areia	m	1,10			
Tamanho do menor grão	mm	0,70			
Tamanho do maior grão	mm	1,00			
Tamanho efetivo = D ₁₀	mm	0,80			
D ₆₀	mm	0,90			
Coef. de Uniformidade = D ₆₀ /D ₁₀		1,13			
Camada suporte					
Características	Unidade	1ª	2ª	3ª	4ª
Espessura da camada	cm	15,00	5,00	5,00	5,00
Tamanho do menor grão	mm	12,50	6,40	3,20	1,60
Tamanho do maior grão	mm	19,00	12,50	6,40	3,20

4.5.2.10. Retrolavagem do filtro de areia

Para retrolavagem do filtro de areia foi utilizada uma TAS de $950 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (dentro da faixa recomendada por Di Bernardo e Dantas (2005)) em fluxo ascendente com água de abastecimento e ar. Compõem o sistema os seguintes equipamentos e materiais:

1. tanque em PRFV (2 m^3) para armazenamento de água de retrolavagem (originária da rede de abastecimento);
2. bomba centrífuga ($19,90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) de retrolavagem;
3. bocais de distribuição da água de retrolavagem;
4. tubulação para distribuição de ar por bolhas grossas, localizada abaixo do leito filtrante;
5. cada lavagem durava em torno de 6 min, esgotando por completo o tanque de armazenagem.

4.5.2.11. Remoção de lodo

Para que ocorresse a remoção de lodo flotado e que este fosse enviado à rede coletora de esgotos, os seguintes dispositivos compunham o sistema (Figura 4.18):

1. raspador de lodo (4 RPM);
2. caixa de 0,5 m³ em polietileno para recepção do lodo flotado;
3. bomba submersa;
4. sensor de nível.

Figura 4.18. Dispositivos de remoção e contenção de lodo flotado. Legenda: (1) tanque de acúmulo de lodo flotado com bomba submersa e sensor de nível, (2) raspador de lodo flotado com 4 RPM

4.5.2.12. Pontos de coletas na ETE piloto

Os pontos de coleta foram determinados de forma que toda ETE experimental pudesse ser caracterizada e avaliada.

1. efluente final com características compatíveis à Resolução CONAMA 357/05;
2. efluente da etapa de flotação com concentração de SST $<30 \text{ mg.L}^{-1}$, visando prolongar a duração da carreira de filtração conforme sugerem AISSE, 2007; IVES, 1970 e METCALF & EDDY, 2003 para filtração terciária;

Os ensaios investigativos (ENSAIOS 1, 2, 3, 4, 5 e 6) foram realizados da seguinte maneira:

- a partida do sistema iniciava-se às 10:00h com estabilização durante 1 hora. As 11:00h e às 13:00h eram coletados 1 L de amostras de esgoto sanitário, efluente do reator anaeróbio de leito expansível, efluente flotado, efluente floto-filtrado (final), efluente floculado e lodo flotado. Ao final do ensaio (13h) eram produzidas amostras compostas nas quais analisava-se: turbidez, cor aparente, $\text{DQO}_{\text{bruta}}$, $\text{DQO}_{\text{filtrada}}$, SST, N-NH_4^+ , P-PO_4^{3-} , condutividade, alcalinidade total e parcial, $\text{Abs}_{254 \text{ nm}}$, CF e CT e metais. O pH era medido logo após cada coleta. Mediu-se sólidos totais (ST) para o lodo flotado.

Transcorreram cinco (5) ENSAIOS (1, 2, 3, 4, 5) até que as condições fossem satisfeitas. O ENSAIO 6 foi a realizado com intuito de avaliar o comportamento do Polímero 8589 utilizado isoladamente em concentração superior ($1,6 \text{ mg.L}^{-1}$) às planejadas.

Depois de satisfeitas as condições (1) e (2) supracitadas, foi realizado um (1) ensaio de monitoramento utilizando as mesmas condições operacionais e dosagens de cloreto férrico ($\text{mg Fe.L}^{-1}/\text{turbidez}$) e polímero do ENSAIO 5 que apresentou resultados satisfatórios.

O ENSAIO 7 foi realizado com a dosagem de Fe/turbidez igual a 0,15 e dosagem de polímero de $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$.

O ensaio de monitoramento (ENSAIO 7) deu-se da seguinte maneira:

- a partida do sistema deu-se às 10h com coletas a cada 2 horas com início às 11h, após estabilização. O término do ensaio era determinado pela colmatção do leito filtrante, indicada pela perda de carga máxima (3,19m) no leito. A perda de carga máxima era igual à carga hidráulica máxima disponível (3,19m). Foram coletadas amostras simples do esgoto sanitário, efluente do reator anaeróbio de leito expansível, efluente flotado, efluente floto-filtrado (final), efluente floculado e lodo flotado, dentre os quais mediu-se: turbidez, cor aparente, DQO_{bruta}, DQO_{filtrada}, SST, SSV, NTK, N-NH₄⁺, sulfato, P-PO₄³⁻, pH, condutividade, OD, AOV, alcalinidade total e parcial, Abs_{254nm}, CF e CT e metais. Para as amostras coletadas do lodo flotado quantificou-se a concentração de ST e STV. Mediu-se o pH do efluente floculado.

A avaliação do tempo de carreira da filtração foi um fator de grande importância para esta pesquisa. Esta avaliação foi representada pela perda de carga e turbidez ao longo do leito filtrante. Foram colhidas amostras a cada 2 horas, da superfície do leito de areia até 120 cm abaixo da superfície do leito. O espaçamento entre os pontos de coleta foram de 20 cm. Em cada amostra coletada mediu-se turbidez.

Para determinar da vazão afluyente à floculação, utilizou-se a equação (2), esta em função da TAS desejada, da área superficial do filtro e da fração de recirculação do efluente.

$$Q_{afi} = \frac{TAS \times A}{(1 + R)} \quad (2)$$

Q_{afi}: vazão floculada afluyente ao flotador (m³.dia⁻¹)

TAS: taxa de aplicação superficial (m³.m⁻².dia⁻¹)

A: área do floto-filtro (m²)

R: fração de recirculação (adimensional)

O cálculo do T_f dá-se pela equação (3) que levou em consideração o volume de apenas um floculador, uma vez que o outro foi isolado.

$$T_f = \frac{V}{Q_{afl}} \quad (3)$$

T_f : tempo de floculação (min)

V : volume do floculador (m^3)

Q_{afl} : vazão floculada afluenta ao flotador ($m^3 \cdot min^{-1}$)

Assim tem-se:

$$Q_{flot} = Q_r + Q_{afl} \quad (4)$$

$$Q_{ent} = Q_{flot} + Q_d \quad (5)$$

em que:

Q_{flot} : vazão de flotação ($m^3 \cdot h^{-1}$)

Q_r : vazão de recirculação ($m^3 \cdot h^{-1}$)

Q_d : vazão de descarte ($m^3 \cdot h^{-1}$)

Q_{ent} : vazão de entrada na unidade ($m^3 \cdot h^{-1}$)

Na Tabela 4.6 são demonstradas as variáveis operacionais utilizadas nos ensaios piloto da ETAPA III.

Tabela 4.6. Variáveis operacionais dos ensaios piloto de floto-filtração

TAS ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$)	R (%)	T_f (min)	Q_{flot} ($m^3 \cdot h^{-1}$)	Q_r ($m^3 \cdot h^{-1}$)	Q_d ($m^3 \cdot h^{-1}$)	Q_{ent} ($m^3 \cdot h^{-1}$)
300	15	18	$6,28 \pm 0,14$	$0,82 \pm 0,02$	0	$5,46 \pm 0,12$

4.5.3.2. Dosagem de cloreto férrico e polímero

O sistema dosador de coagulante foi desenvolvido conforme Oliveira (2007) e consistia de uma bomba dosadora interligada ao turbidímetro de escoamento contínuo. O turbidímetro enviava um sinal elétrico de 4 a 20 mA. Ao enviar 4 mA, a bomba dosadora envia o menor pulso de injeção de coagulante e ao enviar 20 mA a bomba envia a maior pulso. Na bomba dosadora o pulso máximo e mínimo é inserido manualmente sendo

acionado depois o modo automático que recebe o sinal elétrico do turbidímetro e o transforma automaticamente em pulso dosador. Os valores intermediários entre os sinais 4 e 20 mA são calculados linearmente pela bomba dosadora. Por isso, em laboratório foi de interesse apenas calcular as respectivas dosagens máximas e mínimas aplicadas ao efluente do RALEx. Foram determinadas relações de dosagem de Fe/turbidez a serem testadas em escala piloto. Portanto, a bomba dosadora injetava a solução de FeCl_3 no misturador rápido estático em linha de acordo com a turbidez que o turbidímetro de escoamento contínuo (TEC) registrava no efluente do RALEx, sempre obedecendo a curva gerada pela bomba dosadora.

A confirmação da vazão de coagulante e polímero era utilizada por meio da medição em mangueira transparente graduada a cada 200 mL, comunicantes com tanque de dosagem. Através de manobra de válvulas, o líquido da mangueira era succionado, bastando medir o tempo de consumo de determinado volume.

Para a etapa piloto, cada ensaio manteve sua dosagem de polímero fixada. Em escala de bancada foram testadas dosagens com relação de Fe/turbidez entre 0,08 e 0,16 associadas ao polímero e dosagens isoladas com relação de Fe/turbidez entre 0,08 e 0,18. Em escala piloto testou-se dosagens com relação de 0; 0,10 e 0,15 Fe/turbidez associadas ao polímero, ou não.

A Figura 4.20 apresenta as dosagens de produtos químicos aplicados em cada ensaio.

Figura 4.20. Dosagens de cloreto férrico e polímero utilizado em cada ensaio da ETAPA III.

4.5.3.3. Manuseio de produtos químicos em escala piloto

Os tanques para armazenamento e preparo dos produtos químicos na ETE experimental possuíam agitadores que permitiam a homogeneização da solução de $FeCl_3$ e polímero. Particularmente, o tanque de agitação do polímero requereu maiores cuidados, pois o fato de aplicar altas rotações de agitação da hélice podia prejudicar a capacidade de formação de pontes no produto. Entretanto, baixas rotações podiam não dissolver corretamente o polímero granular na água de abastecimento.

A solução de preparo de polímero foi de 0,04% (recomendado pelo fabricante), pois concentrações mais elevadas poderiam vir a ocasionar problemas de entupimento no sistema de dosagem, além de propiciar dificuldade no manuseio.

4.5.3.4. Turbidímetros

Foi necessário realizar a calibração entre o turbidímetro de escoamento contínuo (TEC) de emissão de luz infravermelho (utilizado em escala piloto) e o turbidímetro estático de emissão de luz branca (utilizado em laboratório). Contudo, adaptou-se uma curva de calibração, para compatibilizar a turbidez entre os distintos mecanismos de medição.

O turbidímetro utilizado como equipamento de bancada, possui emissão de luz branca e foi projetado para atender aos critérios especificados pela USEPA 180.1 (1993).

O Método 2130 B (APHA, 2005) segue a mesma metodologia estabelecida da USEPA 180.1 (1993).

O turbidímetro de emissão infravermelha foi utilizado na unidade piloto no monitoramento on-line da turbidez do efluente do RALEx, e segue os critérios especificados pela ISO 7027 (1999). Este último tinha por função apenas medir a turbidez instantaneamente e enviá-la por sinal elétrico à bomba dosadora, caracterizando a automatização das DCF. Para medição da turbidez nos efluentes coletados durante ensaios de flotatestes e piloto, todas as amostras foram medidas com o turbidímetro de luz branca.

As principais diferenças entre os dois tipos de turbidímetros estão descritas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Características dos turbidímetros utilizados na pesquisa

Turbidímetro	Escala bancada	Escala piloto
Leitura	Dinâmica	Estática
Unidade	NTU	NNU ou FNU
Emissão	Luz branca	Infravermelha
Norma	USEPA 180.1	ISO 7027
Comprimento de onda (nm)	400 a 600	880
Lâmpada	Filamento de Tungstênio	LED
Aspectos Operacionais	Interferência pela cor	
	Vida útil reduzida	
	Maior tempo de estabilização	

4.5.3.5. Eficiência da câmara de saturação

A eficiência adotada da câmara de saturação foi baseada em Oliveira (2007) que utilizou o método proposto por Steinbach e Haarhoff (1998). Oliveira (2007) testou taxas de aplicação superficial na câmara de saturação de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ a $600 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$. Além do ensaio com a câmara de saturação de escoamento contínuo são também apresentados os resultados obtidos em Oliveira (2007), relativos à saturação teórica da câmara de saturação em batelada (acoplada ao Flotatest). A Tabela 4.8 os resultados obtidos em Oliveira (2007), que apresenta a concentração mássica teórica de ar na água em equilíbrio com o colchão de ar pressurizado no interior da câmara de saturação e o valor da concentração real de ar na massa líquida.

Tabela 4.8 - Concentração mássica teórica de ar na água

Cs*	Cs,o	Cs,n	T	P _{manom}	P _{sat}	H ₀	H _n	Taxa	V _p	V _{p,c}	a _p	n _{sat}
g.m ⁻³	g.m ⁻³	g.m ⁻³	°C	Kpa	KPa	Cte	Cte	m ³ .m ⁻² .d ⁻¹	L.m ⁻³	L.m ⁻³	g.m ⁻³	%
106,4	27,3	79,1	25	450	537,2	33,8	66,5	100	81,2	78,3	79,9	99
106,4	27,3	79,1	25	450	537,2	33,8	66,5	200	80,3	78,1	79,6	98,6
106,4	27,3	79,1	25	450	537,2	33,8	66,5	300	79,4	77,6	79,1	98
106,4	27,3	79,1	25	450	537,2	33,8	66,5	400	78,5	77,2	78,7	97,6
106,4	27,3	79,1	25	450	537,2	33,8	66,5	500	77,6	76,6	78,1	96,8
106,4	27,3	79,1	25	450	537,2	33,8	66,5	600	75,9	76,3	77,8	96,4

Fonte: Adaptado de Oliveira (2007)

V_p: concentração volumétrica de ar precipitado (L.m⁻³);

V_{p,c}: concentração volumétrica de ar precipitado corrigida (L.m⁻³)

a_p: concentração mássica (g.m⁻³);

η_{sat}: eficiência de saturação (%)

Para os ensaios piloto, a concentração de ar disponível para flotação foi retirada dos resultados obtidos em Oliveira (2007), que utilizou a mesma câmara de saturação com os mesmos parâmetros desta presente pesquisa. A Tabela 4.9 compila os resultados dos cálculos realizados em Oliveira (2007).

Tabela 4.9 - Concentração de ar disponível para o processo de flotação durante ensaios piloto de floto-filtração

Base de Cálculo				
TAS _{filtro} (m ³ .m ⁻² .dia ⁻¹)	R (%)	Q _{flot} (m ³ . h ⁻¹)	Q _r (m ³ . h ⁻¹)	Q _{filtro} (m ³ . h ⁻¹)
300	15	6,28±0,14	0,82±0,02	5,46
Calculado em Oliveira (2007)				
TAS _{câmara} (m ³ .m ⁻² .dia ⁻¹)	C _{ar câmara} (g.m ⁻³)	C _{ar aplicada} (g.m ⁻³)	C _{ar adotado} (g.m ⁻³)	
344	78,89	11,8	12	

Fonte: Adaptado de Oliveira (2007)

4.5.3.6. Manutenção dos equipamentos na unidade piloto de floto-filtração

Devido as características agressivas da solução de FeCl₃, da concentração de SST no efluente do RALEx e do alto grau de instrumentação da ETE piloto, alguns cuidados foram tomados para manutenção do sistema:

- desobstrução dos furos do misturador rápido estático em linha ao perceber redução de vazão pela bomba dosadora para mesmo pulso programado;
- instalação de escorva na linha de recalque da bomba dosadora, evitando ar na mangueira e sifonagem do líquido (caracterizando descontrole das dosagens);
- limpeza da linha de alimentação do turbidímetro de escoamento contínuo (TEC);
- regulagem da vazão de entrada de efluente do RALEx no TEC com atenção especial ao turbilhonamento na cubeta de leitura;
- uso de peças apropriadas ao cloreto férrico na linha de coagulante;
- limpeza do sistema de distribuição de ar do acionamento pneumático da válvula angular de diafragma;
- limpeza de medidor de nível, tipo bóia pêra, localizado na elevatória de alimentação do RALEx, uma vez que o acúmulo de sólidos sobre a equipamento desativava a bomba helicoidal de alimentação do RALEx.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Considerações iniciais

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos nas ETAPAS I, II e III. Os resultados de turbidez (NTU) e cor aparente (uC) do esgoto sanitário e efluente do RALEx durante 24 horas de monitoramento, destinados a verificação da faixa de variação de turbidez e cor aparente do efluente do RALEx, denominada ETAPA I, estão apresentados no item 5.2.

Os ensaios de flotatestes para seleção do polímero, dita ETAPA IIA dividida nas fases 1 e 2, têm seus resultados apresentados no item 5.3. Na ETAPA IIB, fases 1 e 2, foram realizadas as variações das dosagens de cloreto férrico (DCF) em flotatestes, com seus resultados apresentados no item 5.4.

No item 5.5.1 são apresentados os resultados da ETAPA III relativos aos ensaios para aplicação de algumas das dosagens de cloreto férrico e polímero nos ensaios piloto. Foram realizados cinco (5) ensaios (ENSAIOS 1, 2, 3, 4 e 5) até que as dosagens de produtos químicos estivessem suficientes para produzir efluente final com qualidade satisfatória e efluente após flotação com concentração adequada de SST, responsáveis pela colmatação do leito filtrante. No ENSAIO 6 dosou-se $1,6 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero sem nenhuma adição de cloreto férrico.

O ENSAIO 7 foi realizado com as dosagens de produtos químicos já ajustadas em escala piloto, e tem os resultados do monitoramento apresentados no item 5.5.2.

5.2. Resultados da ETAPA I – verificação da faixa de variação de turbidez e cor aparente do efluente do RALEx

Os resultados obtidos durante o monitoramento de 24 horas do RALEx, com coleta horárias, são apresentados em termos de turbidez (NTU) e cor aparente (uC) na Figura 5.1. Verificou-se no efluente do RALEx uma variação de 69 NTU (mínimo às 7h) a 122 NTU (máximo às 16h) na turbidez ao longo dos dias 18 e 19/04/2007, o que subsidiou a escolha dos horários de coleta do efluente do RALEx a serem submetidos aos ensaios de flotatestes realizados durante ETAPA II.

Figura 5.1. Turbidez e cor aparente durante ensaio de 24 horas de monitoramento do esgoto sanitário e efluente do RALEx nos dias 18 e 19/04/2007

A cor aparente do efluente do RALEx comportou-se de maneira similar à turbidez, com valor máximo às 17h (795 uC) e mínimo às 7h (415 uC).

As variáveis cor aparente e turbidez apresentaram variações semelhantes ao longo das 24 horas, devido à influência da turbidez na cor aparente, medida em amostra não filtrada.

Nesta ETAPA I as remoções médias de turbidez e cor aparente pelo RALEx foram aproximadamente 60 e 51% respectivamente. No período da madrugada, entre 0h e 6h, o efluente do RALEx apresentou turbidez e cor aparente mais elevadas do que no esgoto sanitário de entrada do reator. O que ocorre no período da madrugada é a menor contribuição de carga orgânica pelos usuários da rede coletora de esgotos. Essa mudança da qualidade do esgoto sanitário não reflete de imediato na qualidade do efluente do RALEx pelo fato do RALEx possuir um TDH de 4,57h, produzindo um efluente com variações menos acentuadas durante todo o dia. Às 7h ocorre um aumento acentuado na turbidez e cor aparente do esgoto sanitário ocasionada provavelmente pelo fato dos usuários da rede coletora iniciarem suas atividades do dia a dia. Considerando o amortecimento da rede coletora, esse início das atividades pode acontecer em período um pouco mais cedo.

Pela pesquisa de Oliveira (2007), pode-se verificar que no último ensaio piloto realizado, com duração de 27 h, o pico de turbidez (110 NTU) deu-se às 17h e a menor turbidez (40 NTU) às 5h. Na pesquisa de Niciura (2005), durante monitoramento do efluente do RALEx por 24 horas com coletas a cada 2h, verificou-se maior concentração de SST (62 mg/L) às 18h e menores concentrações de SST (40 mg/L) às 2h. O autor não mediu turbidez do efluente do RALEx durante monitoramento.

Para seleção dos horários de coleta que representassem as variações de turbidez do efluente do RALEx ao longo do dia, apenas um (1) ensaio de monitoramento (24 h) não

era o ideal para decisão dos horários de coleta de amostras para ETAPA II. Analisando os resultados obtidos em Oliveira (2007), em Niciura (2005) e os obtidos nesta pesquisa, nota-se que os valores de turbidez (SST no trabalho de NICIURA, 2005) mínima no efluente do RALEx não apresentaram uma tendência entre os horários das pesquisas avaliadas. Deste modo, optou-se pela avaliação obtida neste presente pesquisa que encontrou menor turbidez no efluente do RALEx às 7h.

Para a variação máxima do efluente do RALEx foi selecionado um horário intermediário (17h) dentre os picos de turbidez (ou SST) encontrados nos trabalhos de Oliveira (2007) (às 17h), Niciura (2005) (às 18h) e nesta presente pesquisa (às 16h).

Deste modo, os horários selecionados para coleta que representassem os **valores mínimos e máximos** de turbidez no efluente do RALEx seria às **7h e 17h** respectivamente.

Portanto, para a ETAPA II deste trabalho, determinou-se que as coletas do efluente do RALEx utilizadas nos ensaios de flotatestes seriam sempre às 7h e 17h.

Percebeu-se nesta pesquisa, que a qualidade do efluente do RALEx esteve intimamente ligada aos períodos de remoção de lodo do sedimentador do reator, bem como da limpeza da elevatória de alimentação e caixa de acúmulo do efluente.

5.3. Resultados da ETAPA II - ensaios de flotatestes

Os resultados dos ensaios de bancada realizados no equipamento Flotatestes apresentaram-se sob a forma de turbidez e cor aparente remanescentes no efluente flotado, com medição do pH de coagulação. Essas duas variáveis foram utilizadas como indicativo de qualidade do efluente final. O efluente flotado tinha sua melhoria constatada julgando-se apenas o aumento dos níveis de remoção de turbidez e cor aparente. Em todas as baterias de ensaios foram utilizados os mesmos valores das variáveis a seguir:

velocidade de flotação ($V_f=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$); tempo de mistura rápida ($T_{mr}=20 \text{ s}$); gradiente médio de velocidade de mistura rápida ($G_{mr}=800 \text{ s}^{-1}$); pressão na câmara de saturação ($P_{sat}=450\pm 10 \text{ kPa}$); tempo de saturação ($T_{sat}=10 \text{ min}$); tempo de floculação ($T_f=18 \text{ min}$); gradiente médio de velocidade de floculação ($G_f=90 \text{ s}^{-1}$); gradiente médio de velocidade de mistura do polímero ($G_p = 308 \text{ s}^{-1}$), tempo de mistura do polímero ($T_p=10 \text{ s}$ em jar-test a 308 s^{-1} e 18 min no Flotatest a 90 s^{-1}), taxa de recirculação ($R = 15\%$), quantidade de ar fornecida ($S^*=12 \text{ g}_{ar} \cdot \text{m}^{-3}$).

Os valores de pH do efluente do RALEx coletados às 7:00h e 17:00h ficaram entre 7,01 e 7,12.

5.3.1. Resultados da ETAPA IIA – ensaios de flotatest para seleção do polímero sintético catiônico de alto peso molecular

Neste item são apresentados os resultados referentes aos ensaios de flotatest que serviram como referência para seleção do polímero a ser utilizado em escala piloto. Nestes ensaios de bancada dosou-se $6,47 \text{ mg Fe.L}^{-1}$ e $15,77 \text{ mg Fe.L}^{-1}$ (correspondentes a fase 1 e fase 2, respectivamente) para todos os jarros. Os polímeros sintéticos catiônicos de alto peso molecular foram utilizados em associação após mistura rápida e surtiram os efeitos na etapa de flotação em termos de remoção de turbidez e cor aparente, apresentados na Figura 5.2 para fase 1 e na Figura 5.3 para a fase 2.

5.3.1.1. Fase 1

A fase 1 dos ensaios para seleção do polímero foi realizada com efluente do RALEx coletado às 7h com 61 NTU de turbidez e com 605 uC de cor aparente.

Como critério para avaliação do polímero empregado foi estabelecida como premissa a produção de efluente após flotação com turbidez $<10 \text{ NTU}$. Essa avaliação foi

realizada com valores médios de turbidez no efluente flotado dentre todos os ensaios realizados, que utilizaram $6,47 \text{ mg Fe.L}^{-1}$ e dosagens de polímero de $0,1$ a $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$.

Figura 5.2. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes para seleção de polímero com efluente coletado às 7h no RALEx. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm 10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($12 \text{ g}_{\text{ar}}.\text{m}^{-3}$)

Nessa primeira avaliação, a utilização do Polímero 8185 com característica de alta densidade de carga (DC) apresentou os melhores resultados, quando aplicado em associação a $6,47 \text{ mg Fe.L}^{-1}$, obtendo remoção média de 87% (residual médio: $8,03\pm 0,34 \text{ NTU}$) de turbidez e 81% (residual médio: $115\pm 3 \text{ uC}$) de cor aparente.

O polímero CP-1604 de média DC apresentou remoção média, em suas variações de dosagens, na ordem de 86% (residual médio: $8,26 \pm 1,01$ NTU) de turbidez e 81% (residual médio: 113 ± 7 uC) de cor aparente.

O polímero 8589 de altíssima DC apresentou remoção média, em suas variações de dosagens, na ordem de 85% (residual médio: $9,22 \pm 1,47$ NTU) para turbidez e 81% (residual médio: 117 ± 13 uC) para cor aparente.

O pH da mistura rápida apresentou valores entre 6,59 e 6,70.

Os polímeros 8110 pulv (baixa DC), 8140 (média DC) e 8160 (médio-alta DC) apresentaram desempenho não satisfatório, gerando efluente após flotação com turbidez média >10 NTU, utilizando o efluente do RALEx coletado às 7h. O ensaio com a utilização isolada de cloreto férrico ($6,47 \text{ mg Fe.L}^{-1}$) produziu efluente final com melhor qualidade (turbidez igual a 12,51 NTU) que todos os ensaios com utilização de 0,1 a 0,4 mg.L^{-1} dos polímeros 8110 pulv, 8160 e 8140.

Nesta primeira fase os melhores resultados foram com polímeros de densidades de carga mais elevadas.

5.3.1.2. Fase 2

A fase 2 foi realizada com efluente do RALEx coletado às 17h com 130 NTU de turbidez e com 910 uC de cor aparente.

O polímero 8110pulg, que apresentou o pior resultado dentre os polímeros testados na fase 1, obteve os melhores resultados em flotatestes para o efluente do RALEx com turbidez e cor aparente mais elevadas. A remoção média utilizando $15,77 \text{ mg Fe.L}^{-1}$ associado a dosagens entre 0,1 e 0,4 mg.L^{-1} do Polímero 8110 pulv foi na ordem de 96% de turbidez (residual médio: $6,04 \pm 0,98$ NTU) e 92% de cor aparente (residual médio: 92 uC).

O polímero 8160 de médio-alta DC apresentou remoção média, em suas variações de dosagens, na ordem de 95% (residual médio: $6,24 \pm 0,54$ NTU) para turbidez e 87% (residual médio: 117 ± 51 uC) para cor aparente.

Figura 5.3. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes para seleção de polímero com efluente coletado às 17h no RALEx. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ (12 gar.m^{-3})

O polímero 8589 de altíssima DC apresentou remoção média, em suas variações de dosagens, na ordem de 94% (residual médio: $7,98 \pm 1,78$ NTU) para turbidez e 85% (residual médio: 141 ± 19 uC) para cor aparente.

O polímero 8140 de baixa DC apresentou remoção média, em suas variações de dosagens, na ordem de 93% (residual médio: $8,71 \pm 2,61$ NTU) para turbidez e 88% (residual médio: 107 ± 22 uC) para cor aparente.

O polímero CP-1604 de média DC apresentou remoção média, em suas variações de dosagens, na ordem de 93% (residual médio: $8,91 \pm 2,47$ NTU) para turbidez e 86% (residual médio: 128 ± 19 uC) para cor aparente.

O polímero 8185 de alta densidade de carga, que apresentou os melhores resultados na fase 1, obteve resultados não satisfatórios nesta fase 2, produzindo efluente após flotação com turbidez média >10 NTU.

O pH após a mistura rápida e antes da injeção de polímero apresentou valores entre 6,39 e 6,60.

- *Ensaios com cloreto férrico aplicado isoladamente*

A aplicação de cloreto férrico em sistemas de flotação tem seu uso consagrado conforme comenta Odegaard (1995). No SHS-EESC-USP Oliveira (2007); Moretti (2005), Penetra (2003) e Carvalho (2003) fizeram uso cloreto férrico aplicado isoladamente na flotação por ar dissolvido obtendo bons resultados com o coagulante. Entretanto, a investigação de dosagens cada vez menores que mantenham a funcionalidade operacional e eficiência do sistema de flotação, a ponto de não implicar em comprometimento de etapa posterior de filtração, justifica a inserção destes ensaios, bem como os ensaios do item 5.3.2.

Nos ensaios da fase 1 da ETAPA IIA, o uso de $6,47 \text{ mg Fe.L}^{-1}$ de coagulante aplicado isoladamente, não foi suficiente para produzir efluente após flotação com turbidez <10 NTU. Foram realizados ensaios com utilização isolada de cloreto férrico com dosagens maiores que $6,47 \text{ mg.L}^{-1}$. As DCF variaram de $6,47 \text{ mg.L}^{-1}$ a $11,12 \text{ mg.L}^{-1}$

aplicadas no efluente do RALEx com 62 NTU de turbidez e 370 uC de cor aparente. Pela equação obtida na Figura 5.4, equivalente a $\text{turbidez (NTU)} = -0,735 \times \text{dosagem em mg Fe.L}^{-1} + 12,2$, pode-se obter redução de 1 NTU a cada 1,36 mg Fe.L^{-1} (3,95 mg $\text{FeCl}_3.\text{L}^{-1}$).

Figura 5.4. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes com efluente coletado às 7h e 17h no RALEx, com adição apenas de FeCl_3 . $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ (12 gar.m^{-3})

Nos ensaios da fase 2 da ETAPA IIA, a dosagem de $15,77 \text{ mg Fe.L}^{-1}$ em efluente do RALEx com turbidez de 129 NTU e 902 uC de cor aparente, foi suficiente para produzir efluente após flotação com turbidez média igual a 6,42 NTU, satisfatório perante ao objetivo proposto. Portanto, foi avaliado nestes ensaios o impacto da redução da DCF na qualidade do efluente após flotação. Foram utilizadas dosagens entre 12,98 e $15,77 \text{ mg Fe.L}^{-1}$ no efluente do RALEx com 129 NTU de turbidez. Na Figura 5.4 obteve-se uma equação com coeficiente de determinação igual a 1, entre turbidez remanescente e dosagens em mg Fe.L^{-1} . A equação de turbidez (NTU) = $-0,723 \times \text{dosagem em mg Fe.L}^{-1} + 20,84$, permite verificar redução de 1 NTU a cada $1,38 \text{ mg Fe.L}^{-1}$ ($4,00 \text{ mg FeCl}_3.\text{L}^{-1}$) adicionados.

Os valores do pH de coagulação foram entre 6,34 e 6,83 para as dosagens de coagulante entre 6,47 e $15,77 \text{ mg Fe.L}^{-1}$.

5.3.2. Considerações sobre a ETAPA IIA

Devido às variações de qualidade do efluente do RALEx ao longo do dia e pelo fato de serem aplicadas variadas dosagens de polímero em escala piloto, foi selecionado aquele polímero que gerou efluente final com menor turbidez residual média ao longo de todos os ensaios. Neste caso, o Polímero 8589 de alto peso molecular e altíssima densidade de carga foi selecionado para utilização nos ensaios piloto. A aplicação deste polímero associada ao cloreto férrico produziu efluente flotado com turbidez residual média de $8,60 \pm 1,65 \text{ NTU}$ apresentando eficiência média de 89%.

O Polímero 8185, que apresentou excelente desempenho com efluente do RALEx com 61 NTU, não conseguiu obter desempenho médio satisfatório com o efluente do RALEx mais concentrado (130 NTU de turbidez). O efluente após flotação utilizando o

Polímero 8185 apresentou turbidez residual média de $9,11 \pm 2,76$ NTU com eficiência média de 89%.

Já o Polímero 8110pulv obteve ótimos resultados com o efluente mais concentrado do RALEx e resultados não satisfatórios com efluente do RALEx com turbidez mínima. O efluente após flotação com utilização do Polímero 8110pulv obteve turbidez residual média de $10,84 \pm 7,00$ NTU com eficiência média de 84%.

As fases 1 e 2 diferiram quanto a relação de dosagem de cloreto férrico por unidade turbidez, expressada como $\text{mg Fe.L}^{-1}/\text{turbidez}$ do efluente do RALEX (NTU) ou Fe/turbidez . Na fase 1 foi utilizada a relação Fe/turbidez próxima a 0,11. Na fase 2 utilizou-se a relação próxima a 0,12. Esse aumento de dosagem da fase 1 para a fase 2 era devido a possibilidade de uma proporção maior de coagulante para um efluente do RALEx com turbidez de pico (130 NTU). Entretanto, após a realização da fase 2 constatou-se que os residuais de turbidez (residual médio: $7,79 \pm 2,75$ NTU) no efluente após flotação foram menores do que os residuais (residual médio: $12,16 \pm 4,36$ NTU) gerados na fase 1 que utilizou efluente com turbidez mínima (61 NTU).

Verificada a proporcionalidade entre a turbidez do efluente do RALEx e as dosagens de cloreto férrico, a ETAPA IIB procurou avaliar o impacto das variações de DCF em associação ao Polímero 8589.

- *Ensaio com uso de polímeros aplicados isoladamente*

A título de verificar a eficiência de remoção de turbidez e cor aparente pelo uso isolado do polímero 8589 aplicado em baixa dosagem são apresentados os resultados na Figura 5.5 dos residuais de turbidez e cor aparente no efluente flotado. Ao aplicar uma dose de $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero o efluente do RALEx com turbidez (130 NTU) e cor aparente (910 uC) flotado em escala de bancada teve como característica turbidez e cor

aparente remanescentes de 43,40 NTU (66% de remoção) e 363 uC (60% de remoção) respectivamente.

Figura 5.5. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes com efluente coletado às 17h h no RALEx, empregando apenas o Polímero 8589. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm 10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($12 \text{ g}_{\text{ar}}.\text{m}^{-3}$)

A aplicação isolada de polímero nas doses de até $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ não foi suficiente para obtenção de efluente final com qualidade satisfatória. Para melhoria da qualidade do efluente flotado seria necessário o aumento das dosagens de polímero ou adição associada de cloreto férrico. Como dosagens mais elevadas de polímero não era o objetivo desta pesquisa, que previa a filtragem do efluente flotado em unidade piloto, a presente pesquisa optou pelo uso combinado de cloreto férrico e polímero.

5.3.3. Resultados da ETAPA IIB - variação das dosagens de cloreto férrico nos ensaios de flotatestes com uso associado do polímero selecionado

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados de turbidez e cor aparente do efluente do RALEx após flotação em escala de bancada com dosagens variadas de cloreto férrico associadas a pequenas dosagens do Polímero 8589. Na ETAPA IIA foi

definido o polímero a ser utilizado nos ensaios piloto e que apresentou melhor desempenho médio durante flotatestes. Utilizando dosagens de 0,1 a 0,4 mg.L⁻¹ do Polímero 8589 associados a DCF entre 6,47 e 15,77 mg.L⁻¹ tem-se os resultados apresentados nas Figura 5.6 e 5.7.

Os ensaios desta etapa foram divididos em fase 1, relativa aos testes com efluente do RALEx coletado às 7h (59 NTU e 364 uC) e fase 2, que utilizou efluente do RALEx coletado às 17h (135 NTU e 898 uC).

5.3.3.1. Fase 1

Para amostras do RALEx coletadas às 7h variaram-se as DCF entre 6,47 e 9,27 mg Fe.L⁻¹ em associação às dosagens do Polímero 8589 entre 0,1 e 0,4 mg.L⁻¹, obtendo os resultados apresentados na Figura 5.6.

Pela Figura 5.6, pode-se constatar que ao utilizar 6,47 mg Fe.L⁻¹ associado ao polímero, o efluente após FAD apresentou turbidez média de 9,22±1,48 NTU, proporcionando eficiência de remoção de 84%. A remoção de cor aparente foi de 68% com residual médio de 118±13 uC. Com a dosagem Fe/turbidez próximo a 0,13, os efluentes após flotação apresentaram valores máximos de turbidez e cor aparente de 4,23 NTU e 53 uC, respectivamente. Com a maior relação Fe/turbidez (próxima a 0,16) associada às dosagens polímeros, o efluente flotado apresentou turbidez residual média de 1,74±0,62 NTU e cor aparente residual média de 19±4 uC, com remoção respectiva na ordem 97% e 95%.

Pode-se perceber pela Figura 5.6, que as relações de dosagens Fe/turbidez acima de 0,14 associadas à DP entre 0,1 e 0,4 mg.L⁻¹, não contribuem de maneira significativa na remoção de turbidez e cor aparente do efluente mais diluído do RALEx (59 NTU e 364 uC) de turbidez e cor aparente.

Figura 5.6. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotatestes com efluente coletado às 7h no RALEx. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ (12 g ar.m^{-3})

5.3.3.2. Fase 2

Nesta fase foi utilizada amostra do efluente do RALEx coletada às 17h com turbidez de 135 NTU e cor aparente igual 898 uC. As dosagens testadas nos ensaios de flotatestes, para este efluente considerado crítico para o tratamento, foram de 11,12 a 15,77 mg Fe.L⁻¹. As relações de dosagem Fe/turbidez ficaram entre 0,08 e 0,12.

Pode-se verificar pela Figura 5.7, que as dosagens Fe/turbidez entre 0,08 e 0,10 mg.L^{-1} associadas as dosagens de polímero (0,1 a 0,4 mg.L^{-1}) não são suficientes para manter o efluente após flotação com turbidez <10 NTU.

Figura 5.7. Turbidez e cor aparente remanescentes em ensaio de flotação em escala de bancada com efluente coletado às 17h no RALEx. $V_{\text{flot}}=20,83 \text{ cm.min}^{-1}$; $T_{\text{mr}}=20 \text{ s}$; $G_{\text{mr}}=800 \text{ s}^{-1}$; $P_{\text{sat}}=450\pm 10 \text{ kPa}$; $T_{\text{sat}}=10 \text{ min}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ (12 g ar.m^{-3})

Com a menor dosagem de coagulante ($11,12 \text{ mg Fe.L}^{-1}$) associado a dosagens entre $0,1$ e $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero, foram obtidas remoções médias de 89% (residual médio: $14,25 \pm 1,21 \text{ NTU}$) e 78% (residual médio: $194 \pm 13 \text{ uC}$) de turbidez e cor aparente, respectivamente.

Na aplicação de $15,77 \text{ mg Fe.L}^{-1}$ associado a $0,1$; $0,2$; $0,3$ e $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ do Polímero 8589, foram obtidas remoções médias de 95% (residual médio: $7,98 \pm 1,78 \text{ NTU}$) e 8% (residual médio: $141 \pm 19 \text{ uC}$) de turbidez e cor aparente, respectivamente.

5.3.4. Considerações sobre a ETAPA IIB

Foi verificado na ETAPA IIA, que a proporcionalidade das dosagens cloreto férrico se manteve nas variações máximas e mínimas de turbidez e cor de efluente do RALEx.

Nas dosagens de cloreto férrico para o efluente de máxima turbidez do RALEx, verificou-se uma redução na relação de dosagem Fe/turbidez até $0,11$, produzindo efluente da FAD com turbidez $<10 \text{ NTU}$. Valores abaixo de $0,11$, produziram efluentes após flotação com turbidez que não atendia ao proposto nesta presente pesquisa.

Nos ensaios com efluente do RALEx com mínima turbidez e cor aparente, percebeu-se que a relação de dosagem Fe/turbidez próxima a $0,11$ foi satisfatória para produzir efluente após flotação com turbidez $<10 \text{ NTU}$.

Deste modo, a relação de dosagem Fe/turbidez igual a $0,11$ associada ao Polímero 8589 ($0,1$ a $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$) foi uma referência inicial para as dosagens de cloreto férrico nos ensaios piloto da ETAPA III.

5.4. Resultados da ETAPA III - ensaios piloto de floto-filtração como pós-tratamento do RALEx tratando esgoto sanitário

As ETAPAS I e II foram realizadas com objetivo de balizar os ensaios piloto, principalmente, no que tange as dosagens de produtos químicos. Entretanto, verificou-se em campo, que os resultados entre ensaios de bancada e piloto distinguiram-se a ponto de tornar a pesquisa em tentativa e erro no que tange as dosagens iniciais de produtos químicos na própria escala piloto.

As variações das dosagens de coagulantes e polímeros foram mais acentuadas em nos ensaios piloto do que em escala de bancada. Com vistas à obtenção de diferenças mais significativas entre a qualidade dos efluentes flotados e filtrados entre os ensaios piloto, adotou-se faixas mais amplas de dosagens de produtos químicos, descritas a seguir:

- As relações de dosagens de coagulante foram de 0; 0,10 e 0,15 mg Fe.L⁻¹/ unidade de turbidez (NTU);
- As dosagens do Polímero 8589 foram de 0; 0,4; 1,2 e 1,6 mg.L⁻¹ associados, ou não, ao cloreto férrico.

No item 5.4.1. são apresentados os resultados da medição de turbidez pelos diferentes turbidímetros utilizados na pesquisa.

5.4.1. Comparação entre turbidímetros

Na Figura 5.8 é apresentada a turbidez do efluente do RALEx medida por turbidímetros com diferentes mecanismos de medição utilizados neste presente trabalho. Deste modo, foi possível fazer as correções necessárias durante calibragem da bomba dosadora com o TEC.

Figura 5.8. Ensaio de verificação da turbidez no efluente do RALEx medida pelo turbidímetro de infravermelho presente na ETE piloto e pelo turbidímetro de luz branca portátil utilizado no LATAR

O coeficiente r^2 foi de 0,94, demonstrando que para o líquido medido, no caso efluente do RALEx, era possível realizar uma curva de calibração confiável da turbidez corrigida entre os dois turbidímetros.

5.4.2. ENSAIOS 1 a 6: investigação das dosagens de produtos químicos e eficiência de remoção pela ETE piloto de floto-filtração

Os resultados apresentados nestes ensaios são referentes às análises das amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD, onde mediu-se: turbidez, cor aparente, SST, ST, DQO_{bruta} , $DQO_{filtrada}$, condutividade, alcalinidade parcial, alcalinidade total, pH, Abs_{254nm} , $N-NH_4^+$, $P-PO_4^{3-}$, coliformes fecais e coliformes totais.

Após a última coleta (13h) era medida a perda de carga sob o leito filtrante pelo piezômetro do ponto 120 cm da coluna de floto-filtração, indicado no item 5.6.1.13.

As **eficiências de remoção** são calculadas da seguinte maneira:

$$E1(\%): \quad (ES - RALEx) * 100 / ES$$

$$E2(\%): \quad (RALEx - FAD) * 100 / RALEx$$

$$E3(\%): \quad (RALEx - FFAD) * 100 / RALEx$$

$$EG(\%): \quad (ES - FFAD) * 100 / ES$$

As eficiências supracitadas possuem os seguintes significados:

- E1: eficiência de remoção do RALEx em relação ao esgoto sanitário (%);
- E2: eficiência de remoção da flotação por ar dissolvido em relação ao efluente do RALEx (%);
- E3: eficiência de remoção da flotação/filtração em relação ao efluente do RALEx (%);
- EG: eficiência de remoção do sistema piloto (eficiência global), constituído de reator anaeróbio seguido de floto-filtração, em relação ao esgoto sanitário (%).

As variáveis de entrada para o cálculo estão a seguir:

- ES: valor medido no esgoto sanitário;
- RALEx: valor medido no efluente do reator anaeróbio;
- FAD: valor medido no efluente após flotação por ar dissolvido do efluente do RALEx;
- FFAD: valor medido no efluente (final) após flotação e filtração do efluente do RALEx;

5.4.2.1. ENSAIO 1

Pela Tabela 5.1 pode-se destacar a remoção de carga orgânica ($DQO_{\text{solúvel}}$) pelo RALEx com percentuais de aproximadamente 44%.

Tabela 5.1 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 1 em escala piloto com $TAS=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$

DATA						11/09/2007				
						ENSAIO 1				
DOSAGENS		Fe/turbidez 0,10		Polímero 0 mg.L ⁻¹		Perda de carga após 3 h de ensaio 2,59 m				
Análises	Unidade	ES	RALE x	FAD	FFA D	LOD O	E1(%)	E2(%)	E3(%)	EG(%)
Turbidez	NTU	328,67	203,33	43,20	18,27		38	79	91	94
Cor aparente	uC	2080	1140	389	143		45	66	88	93
SST	mg.L ⁻¹	329	128	40	15		61	69	89	96
ST	mg.L ⁻¹					29058				
DQO_{bruta}	mg.L ⁻¹	632	426	206	186		33	52	56	71
DQO_{filtrada}	mg.L ⁻¹	390	220	146	143		44	33	35	63
Condutividade	$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	499	541	463	452					
Alc.Parcial	mg.L ⁻¹	177	271	225	158					
Alc.Total	mg.L ⁻¹	nr	nr	nr	nr					
pH		6,80	6,72	6,56	6,50					
$Ab_{S_{254nm}}$		1,768	0,861	0,618	0,413		51	28	52	77
N-NH_4^+	mg.L ⁻¹	33,50	66,68	44,41	43,50		-99	33	35	-30
P-PO_4^{3-}	mg.L ⁻¹	5,41	5,02	4,20	3,96		7	16	21	27

nr: análise não realizada

Foi constatada queda de pH nos efluentes no decorrer das etapas de tratamento, com valor no efluente final (FFAD) de 6,50.

A etapa de FAD obteve 69% de remoção de SST do efluente do RALEx, porém com residual ($43,20 \text{ mg SST.L}^{-1}$) não adequado para ser filtrado em leito de areia com granulometria entre 0,7 e 1,0 mm. Ives (1970), Aisse et al. (2007) e Metcalf & Eddy (2003), sugerem para a filtração terciária efluente na entrada do leito filtrante com concentração máxima de 30 mg SST.L^{-1} .

As eficiências negativas apresentadas na Tabela 5.1 significam que o efluente possui valor menor para determinada variável do que o afluente, indicando incremento na variável pela etapa na qual o afluente foi submetido.

Pela Tabela 5.2 pode-se inferir que o sistema piloro de RALEx seguido de floto-filtração apresentou remoção global de 1 log de coliformes fecais (CF) e totais (CT) em relação ao esgoto sanitário. O reator anaeróbio não promoveu a remoção de CF e CT do esgoto sanitário.

Tabela 5.2 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 1 com $TAS=300m^3.m^{-2}.d^{-1}$

Efluente	Unidade	Coliformes fecais	Coliformes totais
Esgoto sanitário	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁶	10 ⁷
RALEx	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁶	10 ⁷
FAD	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁵	10 ⁶
FFAD	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁵	10 ⁶

5.4.2.2. ENSAIO 2

Pela Tabela 5.3, nota-se que de maneira geral que o ENSAIO 2 apresentou menor eficiência de remoção na etapa físico-química do que a FFAD do ENSAIO 1, o que não significa que o desempenho durante ENSAIO 2 foi inferior ao do ENSAIO 1. As variáveis relacionadas ao material suspenso, turbidez e SST, presentes no esgoto sanitário e no efluente do RALEx, apresentaram valores maiores no ENSAIO 2 do que durante ENSAIO 1, justificando a maior eficiência para estas variáveis no primeiro ensaio, mesmo utilizando iguais dosagens de coagulante (Fe/turbidez) e não utilizando polímero.

Neste ensaio, a remoção de fósforo no RALEx foi acima do esperado. Nota-se que a concentração de $P-PO_4^{-3}$ no esgoto sanitário é a menor dentre os ensaios realizados.

Tabela 5.3 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 2 em escala piloto com $TAS=300\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}$

DATA				19/09/2007						
				ENSAIO 2						
DOSAGENS		Fe/turbidez		Polímero		Perda de carga após 3 h de ensaio				
		0,10		0,4 mg.L ⁻¹		0,66 m				
Análises		ES	RALE _x	FAD	FFAD	LODO	E1(%)	E2(%)	E3(%)	EG(%)
Turbidez	NTU	317,75	146,75	50,40	16,43		54	66	89	95
Cor aparente	uC	1801	1168	395	163		35	66	86	91
SST	mg.L ⁻¹	272	94	53	20		65	43	79	93
ST	mg.L ⁻¹					24368				
DQO _{bruta}	mg.L ⁻¹	871	358	188	161		59	47	55	81
DQO _{filtrada}	mg.L ⁻¹	nr	nr	nr	nr					
Condutividade	μS.cm ⁻¹	392	476	448	426					
Alc.Parcial	mg.L ⁻¹	135	278	218	263					
Alc.Total	mg.L ⁻¹	218	342	278	327					
pH		7,28	7,15	7,00	6,96					
Abs _{254nm}		0,635	0,370	0,252	0,241		42	32	35	62
N-NH ₄ ⁺	mg.L ⁻¹	21,77	40,41	37,36	36,13		-86	8	11	-66
P-PO ₄ ³⁻	mg.L ⁻¹	3,21	1,16	0,93	0,60		64	20	48	81

A eficiência de remoção microbiológica do sistema piloto como um todo continuou próximo a 1 log em relação ao esgoto sanitário que apresentou valores de CF e CT de 7 log, conforme Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 2 com $TAS=300\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$

Efluente	Unidade	Coliformes fecais	Coliformes totais
Esgoto sanitário	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁷	10 ⁷
RALEx	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁶	10 ⁷
FAD	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁶	10 ⁶
FFAD	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁶	10 ⁶

5.4.2.3. ENSAIO 3

Os resultados apresentados na Tabela 5.5 mostram a melhoria do desempenho do sistema em relação aos ensaios anteriores. A qualidade do efluente final (FFAD) ao aplicar 0,15 Fe/turbidez apresentou bons resultados, principalmente, na concentração de DQO_{bruta} (106 mg.L^{-1}) no efluente após floto-filtração. Apesar da melhoria da qualidade do efluente final, os teores de SST que chegavam ao filtro continuavam acima do recomendado.

Tabela 5.5 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 3 em escala piloto com $TAS=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$

DATA		18/10/2007								
		ENSAIO 3								
DOSAGENS		Fe/turbidez 0,15	Polímero 0,0 mg.L^{-1}	Perda de carga após 3 h de ensaio 1,75 m						
Análises		ES	RALE _x	FAD	FFAD	LODO	E1(%)	E2(%)	E3(%)	EG(%)
Turbidez	NTU	314,00	163,00	50,6	14,00		48	69	91	96
Cor aparente	uC	1667	917	346	115		45	62	87	93
SST	mg.L^{-1}	241	96	61	45		60	36	53	81
ST	mg.L^{-1}					20031				
DQO_{bruta}	mg.L^{-1}	850	376	136	106		56	64	72	87
$DQO_{filtrada}$	mg.L^{-1}	316	156	63	70		51	60	55	78
Condutividade	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	nr	nr	nr	nr					
Alc.Parcial	mg.L^{-1}	173	263	162	169					
Alc.Total	mg.L^{-1}	267	342	237	225					
pH		7,10	7,01	6,95	6,90					
Abs 254nm		0,532	0,319	0,185	0,162		40	42	49	70
N-NH_4^+	mg.L^{-1}	13,41	50,23	38,29	37,29		-275	24	26	-178
PO_4^{3-}	mg.L^{-1}	6,56	5,55	4,23	4,02		15	24	28	39

nr: análise não realizada

A eficiência de remoção de fósforo (P-PO_4^{3-}) pela unidade piloto no ENSAIO 3 foi baixa, não ultrapassando 39% em relação ao esgoto sanitário.

O teor de ST no lodo foi menor comparado ao ENSAIO 2 que utilizou menores dosagens de coagulante, mas com aplicação de $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero. Este aspecto benéfico da utilização polímero, favorecendo o aumento da concentração sólidos no lodo flotado, incitou a aplicação de doses maiores de polieletrólito no ensaio a seguir.

Na Tabela 5.6 pode-se observar uma remoção de CF na etapa de FAD maior que na etapa de FFAD.

Tabela 5.6 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 3 com $\text{TAS}=300\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$

Efluente	Unidade	Coliformes fecais	Coliformes totais
Esgoto sanitário	NMP.100mL^{-1}	10^7	10^7
RALEx	NMP.100mL^{-1}	10^7	10^7
FAD	NMP.100mL^{-1}	10^5	10^6
FFAD	NMP.100mL^{-1}	10^6	10^6

5.4.2.4. ENSAIO 4

Dentre os resultados demonstrados na Tabela 5.7, destaca-se o teor de ST (41599 mg.L^{-1}) no lodo, que aumentou significativamente devido as dosagens de polímeros (DP) serem mais elevadas ($1,2 \text{ mg.L}^{-1}$). O aumento no adensamento do lodo é uma das justificativas da inserção de polímero nos tratamentos por FAD.

Neste ensaio, o efluente do RALEx encontrava-se nas piores condições da pesquisa com relação a turbidez (208 NTU). O consumo médio de cloreto férrico de $60,5 \text{ mg FeCl}_3.\text{L}^{-1}$ durante coagulação/floculação, não foi suficiente para obtenção de efluente final e efluente flotado com características satisfatórias. Em Penetra (2003), não foi obtida elevação da eficiência de remoção de turbidez na FAD ao aumentar as DP de $0,25$ até $1,25 \text{ mg.L}^{-1}$ associados a DCF entre 0 e $40 \text{ mg FeCl}_3.\text{L}^{-1}$, durante ensaios de flotatestes.

Tabela 5.7 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 4 em escala piloto com $TAS=300\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}$

DATA		29/10/2007								
		ENSAIO 4								
DOSAGENS		Fe/turbidez 0,10	Polímero 1,2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		Perda de carga após 3 h de ensaio 0,34 m					
Análises		ES	RALEx	FAD	FFAD	LODO	E1(%)	E2(%)	E3(%)	EG(%)
Turbidez	NTU	418,50	208,00	78,75	42,55		50	62	80	90
Cor aparente	uC	2103	1420	628	381		32	56	73	82
SST	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	306	162	71	36		47	56	78	88
ST	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$					41599				
DQO _{bruta}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1068	475	255	181		56	46	62	83
DQO _{filtrada}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	373	208	146	95		44	30	54	75
Condutividade	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	488	585	515	461					
Alc.Parcial	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	113	56	218	241					
Alc.Total	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	259	428	271	301					
pH		6,79	6,77	6,68	6,69					
Abs _{254nm}		0,469	0,370	0,326	0,224		21	12	39	52
N-NH ₄ ⁺	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	18,62	40,63	39,96	35,72		-118	2	12	-92
P-PO ₄ ³⁻	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6,18	5,21	4,45	4,27		16	15	18	31

A remoção nula de CF e CT do esgoto sanitário pelo RALEx pode estar relacionada a elevada concentração de sólidos no efluente do RALEx. À medida que se aumenta a remoção de SST na etapa de FAD, verifica-se a menor presença de CF e CT no efluente após flotação, conforme apresentado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 4 com $TAS=300\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$

Efluente	Unidade	Coliformes fecais	Coliformes totais
Esgoto sanitário	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁷	10 ⁷
RALEx	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁷	10 ⁷
FAD	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁵	10 ⁶
FFAD	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁶	10 ⁶

5.4.2.5. ENSAIO 5

Os resultados presentes na Tabela 5.9 foram decisivos para o caminhar da pesquisa. O efluente da FAD apresentou condições satisfatórias de residual de SST (25 mg.L⁻¹) considerado adequado a etapa posterior de filtração rápida em areia. Dentre as variáveis analisadas, destacam-se o residual (66 mg.L⁻¹) no efluente final de DQO_{bruta} e as concentrações de P-PO₄⁻³ com residual de 0,81 mg.L⁻¹ no efluente final. Foram obtidas eficiências de remoção de P-PO₄⁻³ do efluente do RALEx de 73% pela FAD e 88% pelo conjunto floto-filtro. Reali, Penetra e Campos (2007) obtiveram 71% (residual: 2,00 mg P-PO₄⁻³.L⁻¹) de remoção de P-PO₄⁻³ do efluente do RALEx pela FAD, ao aplicar uma relação de dosagem próxima a 0,12 Fe/Turbidez.

Tabela 5.9 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 5 em escala piloto com TAS=300 m³.m⁻².m⁻¹

DATA		20/11/2007								
		ENSAIO 5								
DOSAGENS		Fe/turbidez	Polímero		Perda de carga após 3 h de ensaio					
		0,15	0,4 mg.L ⁻¹		1,50 m					
Análises		ES	RALEx	FAD	FFAD	LODO	E1(%)	E2(%)	E3(%)	EG(%)
Turbidez	NTU	297,00	105,00	23,00	11,00		65	78	90	96
Cor aparente	uC	1196	616	190	100		48	69	84	92
SST	mg.L ⁻¹	221	80	25	9		64	69	88	96
ST	mg.L ⁻¹					27331				
DQO _{bruta}	mg.L ⁻¹	1033	243	100	66		76	59	73	94
DQO _{filtrada}	mg.L ⁻¹	316	76	36	46		76	52	39	85
Condutividade	µS.cm ⁻¹	477	501	380	360					
Alc.Parcial	mg.L ⁻¹	241	304	195	188					
Alc.Total	mg.L ⁻¹	338	402	nr	301					
pH		6,85	6,67	6,56	6,55					
Abs 254nm		0,617	0,292	0,158	0,149		53	46	49	76
N-NH ₄ ⁺	mg.L ⁻¹	29,23	49,28	35,00	30,19		-69	29	39	-3
P-PO ₄ ³⁻	mg.L ⁻¹	5,17	6,55	1,80	0,81		-27	73	88	84

nr: análise não realizada

As concentrações de N-NH₄⁺ encontraram-se elevadas no efluente do RALEx, pelo fato de a biomassa presente no RALEx realizar reações de amonificação com o esgoto

sanitário. A etapa físico-química conseguiu remover cerca de 39% do N-NH_4^+ do efluente do RALEx, provavelmente por incorporação deste nutriente ao lodo flotado.

A elevada remoção de sólidos pelo sistema físico-químico favoreceu a queda do número de organismos do grupo coliformes fecais no efluente final, podendo ser visualizada na Tabela 5.10. O bom funcionamento do RALEx, que produziu efluentes com baixa concentração de SST (80 mg.L^{-1}), favoreceu a remoção microbiológica no reator.

A remoção global do sistema foi na ordem de grandeza de 2 log de coliformes fecais e 1 log de coliformes totais.

Tabela 5.10 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 5 com $\text{TAS}=300\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$

Efluente	Unidade	Coliformes fecais	Coliformes totais
Esgoto sanitário	NMP.100mL^{-1}	10^7	10^7
RALEx	NMP.100mL^{-1}	10^6	10^7
FAD	NMP.100mL^{-1}	10^6	10^6
FFAD	NMP.100mL^{-1}	10^5	10^6

5.4.2.6. ENSAIO 6

Bolto (1995) afirma que polieletrólitos catiônicos de alto peso molecular podem ser utilizados como coagulantes primários. Este ensaio investigou o desempenho do sistema de floto-filtração ao utilizar o Polímero 8589 como coagulante primário. Na Tabela 5.11 pode-se verificar a manutenção do pH, devido a não utilização do FeCl_3 . O elevado teor de ST (38353 mg.L^{-1}) no lodo reforça o efeito benéfico de uso de polímeros no adensamento de lodo em etapa de flotação. A utilização isolada de $1,6 \text{ mg.L}^{-1}$ de polímero propiciou a remoção 62% de SST pela FFAD, em relação ao efluente do RALEx. Na amostra analisada do efluente da FFAD, verifica-se que a etapa de flotação foi a responsável por praticamente toda a remoção do SST no efluente.

Tabela 5.11 - Resultados das análises realizadas nas amostras compostas do ENSAIO 6 em escala piloto com TAS=300 m³.m⁻².m⁻¹

DATA						13/12/2007				
						ENSAIO 6				
DOSAGENS		Fe/turbidez		Polímero		Perda de carga após 3 h de ensaio				
		0,00		1,6 mg.L ⁻¹		1,22 m				
Análises		ES	RALE _x	FAD	FFAD	LODO	E1(%)	E2(%)	E3(%)	EG(%)
Turbidez	NTU	278,33	144,00	98,33	68,67		48	32	52	75
Cor aparente	uC	1291	811	579	423		37	29	48	67
SST	mg.L ⁻¹	214	57	23	22		73	60	62	90
ST	mg.L ⁻¹					38353				
DQO _{bruta}	mg.L ⁻¹	696	261	136	130		63	48	50	81
DQO _{filtrada}	mg.L ⁻¹	284	140	82	77		51	41	45	73
Condutividade	μS.cm ⁻¹	445	515	485	499					
Alc. Parcial	mg.L ⁻¹	150	233	199	233					
Alc. Total	mg.L ⁻¹	218	391	312	346					
pH		6,82	6,72	6,76	6,74					
Abs 254nm		0,520	0,369	0,316	0,274		29	14	26	47
N-NH ₄ ⁺	mg.L ⁻¹	22,36	44,35	39,27	37,28		-98	11	16	-67
P-PO ₄ ³⁻	mg.L ⁻¹	5,16	5,50	4,29	4,37		-7	22	21	15

Durante este ensaio, a concentração de SST nos efluentes do RALEx, no efluente da FAD e FFAD apresentaram-se com valores reduzidos, quando comparados aos demais ensaios, refletindo em um menor número de coliformes fecais no efluente do RALEx e no efluente final (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 - Análise de coliformes fecais e totais nas amostras compostas do esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD durante ENSAIO 6 com TAS=300m³.m⁻².d⁻¹

Efluente	Unidade	Coliformes fecais	Coliformes totais
Esgoto sanitário	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁷	10 ⁷
RALEx	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁶	10 ⁷
FAD	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁶	10 ⁶
FFAD	NMP.100mL ⁻¹	10 ⁵	10 ⁶

5.4.2.7. Considerações sobre os ENSAIOS 1 a 6

Estão apresentados na Tabela 5.13 os valores médios de turbidez, cor aparente, SST, DQO (bruta e filtrada), condutividade, alcalinidade (parcial e total), pH, abs_{254nm}, N-

NH_4^+ e P-PO_4^{3-} do esgoto sanitário e o efluente do RALEx medidos entre os dias 11/09/2007 e 13/12/2007.

Tabela 5.13 - Valores médios das variáveis medidas no esgoto sanitário e efluente do RALEx entre os dias 11/09/2007 e 13/12/2008

Análise	Unidade	Esgoto sanitário		Efluente do RALEx		Remoção (%)
		Média	Desvio	Média	Desvio	
Turbidez	NTU	325,71	48,76	161,68	39,07	38 a 65
Cor aparente	uC	1690	384	1012	287	32 a 48
SST	mg.L ⁻¹	263,91	46,65	102,75	37,00	46 a 73
DQO _{bruta}	mg.L ⁻¹	858	174	357	91	33 a 76
DQO _{filtrada}	mg.L ⁻¹	336	44	160	58	44 a 76
Condutividade	μS.cm ⁻¹	460	43	524	42	-
Alc. Parcial	mg.L ⁻¹	164,73	44,11	234,25	90,15	-
Alcalinidade Total	mg.L ⁻¹	260,05	49,24	381,06	38,20	-
pH	-	6,94	0,20	6,84	0,19	-
Abs _{254nm}	-	0,757	0,499	0,430	0,214	21 a 53
N-NH ⁴⁺	mg.L ⁻¹	23,15	7,24	48,60	9,78	-
P-PO ₄ ³⁻	mg.L ⁻¹	5,28	1,16	4,83	1,87	0 a 64

O RALEx produziu efluente ao longo dos ensaios com turbidez variando entre 105 NTU a 208 NTU de turbidez.

A investigação das dosagens de Fe/turbidez deu-se por fim no ENSAIO 5, quando foram alcançadas a qualidade final do efluente satisfatória e as concentrações adequadas de SST no afluente ao filtro.

Pelas perdas de cargas medidas no leito filtrante ao longo dos ensaios investigativos, verificam-se menores perdas de cargas no leito filtrante quando se utilizou polímeros associados na etapa de floculação. Os ensaios com dosagens isoladas na relação de Fe/turbidez entre 0,10 e 0,15, apresentaram perda de carga entre 1,75 e 2,59m durante 3 horas de ensaio. Com utilização de polímero entre 0,4 e 1,6 mg.L⁻¹, as perdas de cargas medidas no leito filtrante ocorreram entre 0,34 e 1,50m nas 3 horas de ensaio.

As dosagens de produtos químicos utilizadas no ENSAIO 5 permitiram que o sistema alcançasse qualidade satisfatória de SST afluente ao filtro, favorecendo as

discussões do efeito do polímero sobre o leito filtrante além de permitir comparações com a pesquisa de Oliveira (2007).

- *Considerações sobre as análises de metais*

Dentre as variáveis analisadas nos ENSAIOS de 1 a 6, constam nas condições e padrões de lançamento de efluentes da Resolução CONAMA 357/07, apenas o pH e os metais: zinco (Zn), chumbo (Pb), níquel (Ni), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e cromo (Cr). Os valores de pH no efluente final mantiveram-se adequados a legislação em todos os ensaios. As concentrações de metais presentes no esgoto sanitário, efluente do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD ao longo dos ENSAIOS de 1 a 6 estão apresentadas na Tabela 5.14.

Em nenhum dos ensaios foi detectada concentrações de metais (Zn, Pb, Ni, Fe, Mn, Cu, Cr) acima do permitido pela Resolução CONAMA 357/07 nos efluentes analisados.

Os metais com maior concentração no esgoto sanitário e que acarretaram em residuais com concentrações mais elevadas nos efluentes do RALEx, efluente da FAD e efluente da FFAD foram o Fe e Cr. Valores mais elevados de Fe no efluente após FAD podem ser explicados pela adição de clorato férrico (FeCl_3) ao efluente durante tratamento físico-químico.

Foram obtidos na etapa de filtração, bons resultados na remoção de Fe do efluente da FAD. Em alguns casos, como no ENSAIO 4, a filtração removeu o Fe do efluente da FAD até concentrações abaixo do limite de detecção. Entretanto, para os demais metais (Zn, Pb, Ni, Mn, Cu, Cr) a filtração apresentou baixa eficiência de remoção e em algumas vezes eficiência nula.

Tabela 5.14 - Resultados das análises de metais (Zn, Pb, Ni, Fe, Mn, Cu, Cr) nos efluentes do RALEx, FAD, FFAD e do esgoto sanitário

Data		11/09/2007						
		ENSAIO 1						
Amostras Compostas		Zn	Pb	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr
	Esgoto Sanitário	0,24	<0,02	<0,008	2,81	0,06	0,05	0,07
	RALEx	0,28	<0,02	<0,008	3,07	0,09	0,07	0,25
	FAD	0,1	<0,02	<0,008	4,32	0,01	0,01	0,06
	FADD	0,11	<0,02	<0,008	1,72	0,06	0,02	0,11
Data		19/09/2007						
		ENSAIO 2						
Amostras Compostas		Zn	Pb	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr
	Esgoto Sanitário	0,24	<0,02	<0,008	2,81	0,06	0,05	0,07
	RALEx	0,28	<0,02	<0,008	4,32	0,09	0,07	0,25
	FAD	0,1	<0,02	<0,008	3,07	0,01	0,01	0,06
	FADD	0,11	<0,02	<0,008	1,72	0,06	0,02	0,11
Data		18/10/2007						
		ENSAIO 3						
Amostras Compostas		Zn	Pb	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr
	Esgoto Sanitário	0,21	<0,02	<0,0008	5,46	0,1	0,07	0,13
	RALEx	0,2	<0,02	<0,0008	3,27	0,07	0,09	0,05
	FAD	0,13	<0,02	<0,0008	5,2	0,08	0,04	0,02
	FADD	0,09	<0,02	<0,0008	1,77	0,11	0,04	0,03
Data		29/10/2007						
		ENSAIO 4						
Amostras Compostas		Zn	Pb	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr
	Esgoto Sanitário	0,17	<0,02	<0,008	5,17	0,07	0,06	<0,005
	RALEx	0,41	<0,02	<0,008	4,37	0,06	0,09	<0,005
	FAD	0,01	<0,02	<0,008	0,98	0,08	0,04	<0,005
	FADD	<0,002	<0,02	<0,008	<0,005	<0,003	0,01	<0,005
Data		20/11/2007						
		ENSAIO 5						
Amostras Compostas		Zn	Pb	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr
	Esgoto Sanitário	0,1	<0,02	<0,008	2,81	0,06	0,05	0,07
	RALEx	0,17	<0,02	<0,008	3,07	0,09	0,07	0,25
	FAD	0,01	<0,02	<0,008	4,32	0,01	0,01	0,06
	FADD	0,005	<0,02	<0,008	1,72	0,06	0,02	0,11
Data		13/12/2007						
		ENSAIO 6						
Amostras Compostas		Zn	Pb	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr
	Esgoto Sanitário	0,05	<0,02	<0,008	1,06	0,07	0,04	<0,005
	RALEx	<0,002	<0,02	<0,008	0,68	0,04	0,03	<0,005
	FAD	<0,002	<0,02	<0,008	0,38	0,08	0,02	<0,005
	FADD	0,01	<0,02	<0,008	0,02	<0,003	0,05	<0,005
RESOLUÇÃO CONAMA 357/07								
Metais		Zn	Pb	Ni	Fe*	Mn*	Cu*	Cr
Limites máximos (mg.L-1)		5,0	0,5	2,0	15,0	1,0	1,0	0,5

* Metais na forma dissolvida

5.5. ENSAIO 7: monitoramento da unidade piloto de floto-filtração

5.5.1. Considerações iniciais

Neste último ensaio, foram utilizadas dosagens de $0,15 \text{ mg.Fe.L}^{-1}$ / unidade de turbidez do efluente do RALEx (NTU) e $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ de Polímero 8589. As dosagens de produtos químicos foram iguais às utilizadas no ENSAIO 5, que apresentou bons resultados, produzindo efluente após flotação com SST menores que 30 mg.L^{-1} , bem como a qualidade do efluente final em acordo com Resolução CONAMA 357/05.

A duração da carreira de filtração foi de 4 horas, com início do ensaio às 10h e término às 14h (indicado pela perda de carga de 3,19m, medida por piezômetros). Ao término da carreira de filtração, tinha-se a intenção de realizar coletas de efluentes ao longo do filtro e nos demais pontos de coletas. Contudo, esse procedimento foi inviabilizado pelo fato de ocorrer pressão negativa nos amostradores ao longo do leito filtrante.

Apesar da curta carreira de filtração, este ensaio é significativo para avaliação da eficiência do emprego de polímeros na floto-filtração como pós-tratamento de RALEx tratando esgoto sanitário, pois o ensaio ocorreu durante período crítico de qualidade dos efluentes sanitários e do efluente do RALEx.

Antes do ensaio, realizaram-se três retrolavagens consecutivas, com duração de 6 min cada, utilizando TAS ($950 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$). As três(3) retrolavagens consecutivas ocorreram em caráter excepcional, com intuito de minimizar um possível residual de polímero no leito filtrante proveniente dos ensaios anteriores.

Na avaliação global do sistema de tratamento constituído de RALEx/floto-filtração tratando esgoto sanitário, o desempenho foi satisfatório em termos de remoção de turbidez, cor aparente, P-PO_4^{-3} , $\text{Abs}_{254\text{nm}}$, $\text{DQO}_{\text{bruta}}$, $\text{DQO}_{\text{filtrada}}$.

Os valores de N-NH_4^+ , CF e CT reforçam a necessidade de complementação do tratamento para remoção destes.

5.5.2. Análise crítica dos resultados do monitoramento

Durante o ENSAIO 7 a qualidade do RALEx pouco variou, no que diz respeito a turbidez (101,00 e 104,00 NTU) e cor aparente (708 e 760 uC).

Constata-se pela Figura 5.9, que a turbidez afluente ao filtro apresentou-se com 3,68 NTU às 11h e 22,40 NTU às 13h.

Figura 5.9. Turbidez, cor aparente, DQO bruta e filtrada, SST e SSV ao longo do ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h.

TAS=300 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{\text{mr}}=2000$ a 7000 s^{-1} ; $P_{\text{sat}}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_f=18 \text{ min}$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{\text{ar}} \cdot \text{m}^{-3}$)

Esta variação provavelmente ocorreu pelo fato do efluente coletado às 11h estar diluído, devido ao enchimento da câmara de floto-filtração na partida ser com água de abastecimento.

A unidade de floto-filtração apresentou remoção média 86% de DQO_{bruta} do efluente do RALEx, com residual máximo de 53 mg.L^{-1} no efluente final. A remoção média de $DQO_{filtrada}$ pela FFAD do efluente do RALEx foi de 78 % com residual máximo 20 mg.L^{-1} no efluente final. A $DQO_{filtrada}$ é representada pelas substâncias causadoras de DQO que possuem tamanho menor que a porosidade do filtro ($0,45\mu\text{m}$) utilizado no preparo da análise. Pode-se dizer que o processo de floto-filtração conseguiu remover parte das frações coloidais presente no efluente do RALEx.

A etapa de flotação produziu efluente com residual máximo de $13,75 \text{ mg SST.L}^{-1}$, considerado adequado para etapa posterior de filtração. A relação SSV/SST apresentou resultados próximos a 0,73. O efluente do RALEx apresentou-se em média com 0,90 de SSV/SST, demonstrando alto grau de biodegradabilidade residual após reator anaeróbio.

Como remoção global, a ETE piloto apresentou eficiência média 90% de remoção de DQO_{bruta} (residual máximo: 53 mg.L^{-1}) e 91% de $DQO_{filtrada}$ (residual máximo: 20 mg.L^{-1}). Esses níveis de remoção de DQO_{bruta} enquadra o efluente gerado pela ETE piloto ao padrão de lançamento de efluentes de legislações estaduais como a COPAM 10/86 ⁴ que exige 90 mg DQO.L^{-1} .

Os residuais máximos foram 3,8 NTU de turbidez, 29 uC de cor aparente; $8,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de SST e $1,2 \text{ mg.L}^{-1}$ de SSV.

⁴ Deliberação Normativa COPAM nº10, de 16 de dezembro de 1986 do Estado de Minas Gerais

Na Figura 5.10 são apresentados os resultados de condutividade, $P-PO_4^{-3}$, sulfato, Abs_{254nm} , OD, CF e CT ao longo do ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. $TAS=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{mr}=2000$ a 7000 s^{-1} ; $P_{sat}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_f=18 \text{ min}$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{ar} \cdot \text{m}^{-3}$).

Figura 5.10. Condutividade, $P-PO_4^{-3}$, sulfato, Abs_{254nm} , OD, CF e CT ao longo do ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. $TAS=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{mr}=2000$ a 7000 s^{-1} ; $P_{sat}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_f=18 \text{ min}$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{ar} \cdot \text{m}^{-3}$).

Em Reali, Penetra e Campos (2007) encontram-se eficiências médias de remoção pelo processo de FAD de 90% de P-PO_4^{-3} , quando o efluente do RALEx apresentou turbidez média de 136 NTU e foram aplicados dosagens entre 0,12 e 0,13 mg Fe/turbidez sob TAS de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Os mesmos autores comentam a produção de efluentes após flotação com residual de $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de sulfato. A remoção pela FAD de sulfato foi de 10% do presente no efluente do RALEx, enquanto nesta presente pesquisa a remoção ocorreu em média de 42% (residual: $22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

A remoção de CF e CT no sistema piloto alcançou no máximo de 2 log, cabendo etapa posterior de desinfecção em trabalhos futuros.

Os teores de OD no efluente final após FFAD apresentou-se acima de $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ resultando em aspecto positivo para disposição deste tipo de efluente em corpos d'água.

A injeção de ar dissolvido no efluente durante o processo de flotação favorece a remoção de compostos com $\text{Abs}_{254\text{nm}}$ que ocorreu durante FAD acima de 46%.

Conforme Figura 5.11 os valores de pH no ES e no efluente do RALEx não sofreram grandes variações ao longo do ensaio. Os valores de pH na entrada e na saída do reator foram 6,76 a 7,00 (entrada) e de 6,77 a 6,78 (saída), respectivamente. Desta forma, o pH no efluente do reator foi bem próximo ao pH da entrada evidenciando certa capacidade de tamponamento do sistema biológico.

Figura 5.11. pH, alcalinidade total e parcial, AOV ao longo do ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. $TAS=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{mr}=2000 \text{ a } 7000 \text{ s}^{-1}$; $P_{sat}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_r=18 \text{ min}$; $G_r=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{ar} \cdot \text{m}^{-3}$)

A característica de tamponamento do RALEx foi observada pela análise de alcalinidade total e parcial. O valor médio de alcalinidade parcial ($162 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) no ES foi inferior ao valor obtido no efluente RALEx ($231 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$). O mesmo aconteceu para os valores médios de alcalinidade total no ES ($263 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$) e no efluente do RALEx ($349 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$). Esse efeito indica que a produção de ácidos ocasionada pelo processo de degradação anaeróbia não afetou o sistema, provavelmente pela geração de alcalinidade nas reações de decomposição (FORESTI, 1994; CHENICHARRO, 1997).

O aumento de alcalinidade total pelo RALEx é favorável ao pós-tratamento físico-químico que através do uso de coagulantes consomem alcalinidade. A FAD apresentou consumo médio de 44% (residual mínimo: $146 \text{ mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$) da alcalinidade total com

pH no floculador mínimo de 6,36. Desta maneira o sistema funcionou adequadamente sem necessidade do uso de alcalinizantes.

O valor médio dos ácidos orgânicos voláteis (AOVs) no efluente do RALEx foi 14,4 mg.L⁻¹ enquanto na alimentação do reator, o ES apresentou 39,6 mg AOV.L⁻¹. O reator anaeróbio manteve-se estável durante o ensaio de monitoramento.

A Figura 5.12 apresenta a eficiência de remoção aproximada de 23% de N-NH₄⁺ pela FFAD (residual máximo: 34,51 mg N-NH₄⁺.L⁻¹) do efluente do RALEx (valor máximo: 34,99 mg N-NH₄⁺.L⁻¹).

Figura 5.12. NTK e N-NH₄⁺ ao longo do ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. TAS=300 m³.m⁻².d⁻¹; G_{mr}=2000 a 7000 s⁻¹; P_{sat}=450±10 kPa; T_f=18 min; G_f=90 s⁻¹; G_p=308 s⁻¹; T_{fp}=18 min, R=15% (S*=12 g_{ar}.m⁻³)

Na remoção global do sistema o conjunto incorporou 23% de N-NH₄⁺ ao efluente sanitário. Quanto à concentração de NTK no efluente após FFAD (residual máximo: 23,78 mg NTK.L⁻¹), o sistema de pós-tratamento do RALEX removeu 59% da concentração de NTK do reator anaeróbio (valor máximo: 51,54 mg NTK.L⁻¹).

Conforme Tabela 5.15, as concentrações de metais no efluente do RALEx estavam elevadas, comprometendo a qualidade final do efluente mesmo após passar pelo tratamento físico-químico.

Tabela 5.15 - Análises de metais (Zn, Pb, Ni, Fe, Mn, Cu, Cr) ao longo do ENSAIO 7 com TAS=300 m³.m⁻².d⁻¹

Horário	Amostras	Metais (mg/L)						
		Zn	Pb	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr
11:00h	Esgoto Sanitário	0,17	0,13	0,35	6,95	0,14	0,04	1,62
	RALEx	0,12	0,04	1,8	17,38	0,37	0,05	18,98
	FAD	0,06	<0,02	0,59	5,41	0,2	0,03	2,6
	FFAD	0,07	<0,02	0,11	1,78	0,13	0,01	0,61
13:00h	Esgoto Sanitário	0,17	<0,02	0,5	5,82	0,17	0,04	1,9
	RALEx	0,12	<0,02	1,15	11,16	0,25	0,04	5,56
	FAD	0,09	0,03	0,73	10,23	0,26	0,04	4,22
	FFAD	0,07	<0,02	1,12	8,48	0,28	0,04	5,38

Altas concentrações de Fe (17,38 mg.L⁻¹) e Cr (18,98 mg.L⁻¹) estavam presentes no efluente do RALEx coletado às 11h. As 13h, as concentrações de Fe (11,16 mg.L⁻¹) e Cr (5,56 mg.L⁻¹) no efluente do RALEx continuavam elevadas, com valores de Cr acima do permitido pela Resolução CONAMA 357/05 que dispõe sobre o lançamento de efluentes.

Conforme constatado nos ensaios anteriores (ENSAIOS de 1 a 6), o tratamento físico-químico apresentou baixas eficiências de remoção para os metais Zn, Pb, Ni, Fe, Mn, Cu, Cr. Apenas na etapa de filtração foi verificado desempenho significativo (17,2% de remoção do efluente da FAD) para remoção de Fe, apresentando eficiências de remoção similares a apresentadas em Oliveira (2007). Pelo trabalho do autor, calcula-se 28% de eficiência de remoção pela filtração do efluente da FAD. Esse percentual foi calculado com base das análises realizadas em amostras compostas coletadas durante 27 horas de ensaio (TAS=300m³.m⁻².d⁻¹).

Figura 5.13. Variação de turbidez ao longo do leito filtrante durante ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. $TAS=300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{mr}=2000 \text{ a } 7000 \text{ s}^{-1}$; $P_{sat}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_f=18 \text{ min}$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$, $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{ar} \cdot \text{m}^{-3}$)

Às 13h o efluente da FAD apresentou valores de turbidez igual a 22,4 NTU. Pela Figura 5.13, observa-se que os altos valores de turbidez concentraram-se nos primeiros 20 cm da camada filtrante, indicando uma filtração com ação de superfície e não de profundidade.

O efeito do residual de polímero catiônico no efluente da FAD pode ter contribuído para a formação de ligações por pontes entre partículas na camada de superfície do filtro, acarretando aumento de turbidez e conseqüente perda de carga acelerada.

Ives (1970) recomenda o uso de filtros de areia como tratamento terciário para afluentes com SST até $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. O mesmo autor recomenda o uso de leitos com tamanho efetivo entre 1,0 e 2,5 mm, granulometria maior do que o utilizado nesta presente pesquisa (0,7 a 1,0 mm).

Oliveira (2007), que realizou a pesquisa na mesma unidade piloto desta pesquisa, em seu último ensaio com: TAS ($300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G_{mr} (2000 a 7000 s^{-1}); P_{sat} ($450 \pm 10 \text{ kPa}$); T_f (18 min); G_f (90 s^{-1}); R (15%), obteve 27 horas de carreira de filtração sobre leito filtrante com granulometria entre 0,7 e 1,0 mm. Quanto ao uso de coagulante obteve-se uma relação média de $0,25 \text{ mg Fe} \cdot \text{L}^{-1}$ / unidade de turbidez. O teor de SST e turbidez afluente ao filtro foi em média $11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e 19 NTU, respectivamente; enquanto nesta presente pesquisa o afluente ao filtro continha no máximo $22 \text{ mg SST} \cdot \text{L}^{-1}$ e 22,4 NTU. Portanto, a colmatação acelerada do leito filtrante durante ENSAIO 7 foi provavelmente ocasionada pelos efeitos sinérgicos sobre o leito, ao dosar $0,4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ do Polímero 8589.

Oliveira (2007) utilizou para as mesmas condições operacionais supracitadas (TAS= $300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), leito de areia entre 0,59 e 0,84 mm ($D_{10}=0,6 \text{ mm}$) e relatou 24 horas de carreira de filtração. A qualidade do afluente ao filtro apresentou em média $7 \text{ mg SST} \cdot \text{L}^{-1}$ e 5 NTU com picos de $24 \text{ mg SST} \cdot \text{L}^{-1}$ e 14 NTU.

Tebbutt (1971) investigou em escala plena, a utilização de etapa de filtração em areia com granulometria entre 0,5 e 1,0 mm, no pós-tratamento de efluente proveniente de um sistema de lodo ativado contendo em média $22,6 \text{ mg SST} \cdot \text{L}^{-1}$. A filtração ocorreu a TAS ($300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), o que acarretou 2 m de perda de carga em 7 horas em 0,6 m de profundidade de leito filtrante. Em média, a filtração removeu 70 % do SST e 48% da DQO. Segundo o autor, a taxa de filtração possui um pequeno efeito na eficiência de remoção de sólidos, conclusão confirmada em Oliveira (2007) que verificou o principal efeito do aumento da TAS na floto-filtração, foram nos tempos da carreira de filtração. No trabalho de Oliveira (2007), foram testadas três taxas de aplicação superficial com a tecnologia de floto-filtração, são elas: 200, 250 e $300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Como resultado, o autor constatou que em seus ensaios quanto mais elevada a TAS, maior a duração da carreira de filtração. Por limitações na capacidade de alimentação do RALEx com esgoto sanitário

pela bomba helicoidal presente na ETE não foi possível neste presente estudo pesquisar TAS maiores que $300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$.

Figura 5.14. Perda de carga medida nos pontos: 120cm, 100cm, 80cm, 60cm, 40cm, 20cm ao longo do leito filtrante durante ENSAIO 7 piloto entre 10h e 14h. TAS= $300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $G_{\text{m}}=2000$ a 7000 s^{-1} ; $P_{\text{sat}}=450 \pm 10 \text{ kPa}$; $T_{\text{f}}=18 \text{ min}$; $G_{\text{f}}=90 \text{ s}^{-1}$; $G_{\text{p}}=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{\text{fp}}=18 \text{ min}$; $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ gar} \cdot \text{m}^{-3}$)

A grande limitação do emprego de polímeros neste trabalho foi a elevada perda de carga no leito filtrante D_{10} (0,8 mm).

Pela Figura 5.14 constata-se que após 2 horas da partida do sistema o leito filtrante na altura de 40 cm tinha 1,07 m de perda de carga, um aumento de 1,01 m em relação ao início da operação (11h). A maior variação da perda de carga entre as camadas monitoradas do leito filtrante ocorreu entre os 20 cm e 40 cm, indicando que o acúmulo de impurezas aconteceu principalmente neste extrato do leito filtrante.

Um dos efeitos benéficos do uso de $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ de Polímero 8589 foi a boa capacidade de adensamento do lodo flotado sempre acima de 3% de ST, conforme Figura 5.15.

Figura 5.15. Teor de ST e SVT no lodo flotado coletado durante ENSAIO 7 em escala piloto entre 10h e 14h. $TAS=300 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$; $G_{mr}=2000 \text{ a } 7000 \text{ s}^{-1}$; $P_{sat}=450\pm10 \text{ kPa}$; $T_f=18 \text{ min}$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$; $G_p=308 \text{ s}^{-1}$; $T_{fp}=18 \text{ min}$, $R=15\%$ ($S^*=12 \text{ g}_{ar}.\text{m}^{-3}$)

Com as características do lodo gerado na FAD com utilização de polímeros constados nesta pesquisa, o lodo poderia ser destinado com maior facilidade para etapa posterior de adensamento ou até mesmo diretamente para o desaguamento. Cabe ressaltar, que não é apenas o teor de sólidos do lodo que determina o tipo e grau de adensamento que o lodo deverá ser submetido. Devem ser realizados testes de adensamento e desaguamento com o lodo a ser destinado para que se possam afirmar os benefícios do polímero em etapas posteriores à flotação.

5.6. Considerações gerais sobre os ENSAIOS 1 a 7

A utilização de polímeros como auxiliar de flotação e filtração em sistema piloto de floto-filtração é uma pesquisa inédita. Os efeitos do polímero em sinergia com material

sólido e com as microbolhas de ar são desconhecidos até o presente momento em filtros de areia.

Diversas pesquisas estudaram a filtração como tratamento terciário conforme apresenta a Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Comparação entre pesquisas que utilizaram filtração rápida como tratamento terciário de esgotos sanitários

	Característica	Unidade	ENSAIO 7	Oliveira (2007)	Aisse et al. (2007)	Tebbutt (1971)*
Valor médio	DCF _{média}	mg.L ⁻¹	45	58	65	0
	Polímero	mg.L ⁻¹	0,4	0	0	0
	TAS	m ³ .m ⁻² .m ⁻¹	300	300	200	300
	<u>Afluente ao Filtro</u>					
	SST	mg.L ⁻¹	14 (Máx)	11	71 ± 7	22,6
	Turbidez	NTU	22,4 (Máx)	19	9,3 ± 10,1	-
	Carga Hidráulica Disponível	m	3,19	3,2	1,7	2
	Leito Filtrante	mm	0,70 - 1,00	0,70 - 1,00	0,40 - 0,99	0,50 - 1,00
	Profundidade do leito	m	1,1	1,1	0,8	0,6
	Carreira de Filtração	h	4	27	6	7

*afluente ao filtro proveniente de lodos ativados sem adição de produtos químicos

O ENSAIO 7 obteve dentre as pesquisas apresentadas na Tabela 5.16 a carreira de filtração com menor duração (4 horas). Em contrapartida, Oliveira (2007) utilizando a mesma instalação experimental e mesmos critérios de operação, mas sem utilização de polímeros, obteve em seus ensaios 27 horas de carreira de filtração. Nas primeiras 4 horas do ensaio de Oliveira (2007) foi verificada perda de carga de aproximadamente 0,40 m.

De maneira geral as concentrações de metais (Zn, Pb, Ni, Fe, Mn, Cu, Cr) presentes nos efluentes do RALEx (Tabela 5.15) foram mais elevadas do que no esgoto sanitário, efluente da FAD e efluente da FFAD, com exceção do Fe que na maioria das vezes esteve de forma mais concentrada no efluente da FAD, devido a injeção de FeCl₃ no sistema.

A remoção de coliformes totais e fecais na ETE piloto não ultrapassou 2 log, ocasionada pelo tratamento físico-químico. Verificou-se uma queda no número de CF (10⁵ NMP.mL⁻¹) e CT (10⁶ NMP.mL⁻¹) nos efluentes da FFAD com menor concentração

de SST. Da mesma maneira, os efluentes do RALEx com menor concentração de SST apresentaram-se com uma concentração menor de coliformes fecais e totais, com valores próximos a 10^6 NMP.100 mL⁻¹.

Os ensaios com utilização de concentrações mais elevadas de polímero apresentaram maior concentração de ST no lodo flotado.

A utilização de polímero na ETE piloto ocasionou baixos tempos de funcionamento (4h) do sistema devido à colmatção do leito filtrante. Neste caso, seriam necessárias seis (6) lavagens diárias do leito filtrante. O volume de lodo diário produzido na retrolavagem do filtro seria de 12 m³. Uma alternativa para limpeza do filtro seria utilizar o efluente floto-filtrado produzido durante funcionamento da unidade de floto-filtração. Por dia seriam produzidos 131 m³ de efluente tratado. Portanto, aproximadamente 9,2% da produção bruta de efluentes tratados seriam gastos para retrolavagem do leito filtrante.

As diferenças operacionais na retrolavagem dos filtros e as características dos lodos gerados neste presente trabalho e na pesquisa de Oliveira (2007) estão descritas na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Características da etapa de retrolavagem dos filtros e dos lodos gerados na etapa de floto-filtração no ENSAIO 7 e no ensaio final de Oliveira (2007)

Características	Unidade	ENSAIO 7	Oliveira (2007)
TAS _{retrolavagem}	m ³ .m ⁻² .d ⁻¹	950	912
Tempo de retrolavagem	min	6	7
Número de retrolavagens	-	6 diárias	8 a cada 9 dias
Volume de lodo proveniente da retrolavagem	m ³	12,00	2,22
Concentração de ST no lodo flotado	%	3,6	-

Um estudo detalhado sobre os aspectos econômicos da utilização de polímero como auxiliar de floto-filtração não pode ser elaborado nesta presente pesquisa uma vez que não foram testadas diferentes condições operacionais, tais como: leito filtrante com T.E > 0,8 mm e TAS > 300 m³.m⁻².d⁻¹.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando as condições do presente trabalho, que utilizou nos ensaios de Flotatestes em escala de bancada: $V_f = 20,83 \text{ cm.min}^{-1}$, $T_f = 18 \text{ min}$; $R=15\%$; $G_f=90 \text{ s}^{-1}$ e $P_{sat}=450\pm10 \text{ kPa}$, dosagens de FeCl_3 e polímeros associados, ou não, para as variações máximas e mínimas de turbidez do efluente do RALEx, pôde-se concluir que:

- Para as variações mínima (59 NTU) e máxima (135 NTU) de turbidez ocorridas no efluente do RALEx, a utilização do polímero catiônico de alto peso molecular e altíssima densidade de carga (Polímero 8589), aplicado em dosagens entre 0,1 e 0,4 mg.L^{-1} , associado a 6,47 e 15,77 mg Fe.L^{-1} ($\text{DCF} = 18,81$ e $45,84 \text{ mg FeCl}_3.\text{L}^{-1}$), proporcionou o melhor desempenho dentre os polímeros testados, ao produzir em efluente após flotação com turbidez residual média de $8,60\pm1,65 \text{ NTU}$;
- A utilização em ensaios de flotatestes de dosagens variáveis de cloreto férrico respeitando a relação dosagem/turbidez próximas a **0,11 mg Fe.L⁻¹/unidade de turbidez**, associadas a dosagens fixas de polímero de alta densidade de carga entre 0,1 e 0,4 mg.L^{-1} , demonstrou ser satisfatória para qualquer variação do RALEx estudada, ao obter efluente após flotação com turbidez residual média $< 10 \text{ NTU}$;

Considerando as condições do presente trabalho, que utilizou nos ensaios com a Estação Piloto de Tratamento de Esgotos, composta por RALEx seguido de floto-filtração e que trabalhou com as seguintes características operacionais: $TAS = 300 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, $T_f = 18 \text{ min}$; $R=15\%$ ($S^=12 \text{ g}_{ar}.\text{m}^{-3}$); $G_f=90 \text{ s}^{-1}$ e $P_{sat}=450\pm10 \text{ kPa}$, dosagens variáveis de FeCl_3 , associadas, ou não, a dosagens fixas de polímero sintético catiônico de alto peso*

molecular e alta densidade de carga, leito filtrante com tamanho efetivo (D_{10}). = 0,8 mm, pôde-se concluir que:

- A unidade piloto de floto-filtração apresentou o melhor desempenho dentre as condições estudadas ao ser aplicada dosagem de cloreto férrico variável respeitando a relação de dosagem de 0,15 mg Fe.L⁻¹/unidade de turbidez associada a dosagem fixa de 0,4 mg.L⁻¹ de polímero na remoção média de turbidez (94%), cor aparente (91%), P-PO₄³⁻ (94%), DQO_{bruta} (77%), SST (93%) do efluente do RALEx. Dentre os fatores limitantes, estão a baixa remoção de N-NH₄⁺ (média: 31%), CF (média: 1 log), CT (média: 1 log). Nestas condições, a ETE piloto constituída de RALEx seguido de floto-filtração apresentou eficiência global de remoção de turbidez (99%), cor aparente (99%), P-PO₄³⁻ (99%), DQO_{bruta} (93%) e SST (>99%);
- A perda de carga máxima (3,19m) foi alcançada no leito filtrante com tamanho efetivo (D_{10}) = 0,8 m, com areia uniforme (C.U. = 1,13) e profundidade de 1,10 m, após **4 horas** de ensaio sob TAS (300 m³.m⁻².d⁻¹) ao aplicar 0,4 mg.L⁻¹ de polímero catiônico de alto peso molecular e altíssima densidade de carga associado a 15,49 mg Fe.L⁻¹. A qualidade do efluente da FAD, afluente ao filtro de areia, apresentou ao longo do ensaio com residuais máximos de 13,75 mg SST.L⁻¹ e 22,4 NTU;
- A utilização de 0,4 mg.L⁻¹ em associação ao cloreto férrico favoreceu o adensamento do lodo flotado (ST >3%). O ensaio com a mesma relação de dosagem Fe/turbidez (0,15), mas isento de polímero apresentou ST ≈ 2%;

A partir dos resultados e conclusões apresentados neste trabalho, recomenda-se a investigação dos seguintes aspectos:

- Sugere-se investigar a relação entre periodicidade de retirada de lodo da câmara de sedimentação e elevatória do RALEx, com a qualidade do efluente do reator anaeróbio;

- A partir dos resultados de elevada perda de carga no leito filtrante com D_{10} igual a 0,8 mm, propõe-se utilizar dosagens de polímeros menores que $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ associadas com cloreto férrico;

- É recomendável a utilização de leitos filtrantes com maiores granulometrias do que a utilizada nesta pesquisa ($D_{10}=0,8 \text{ mm}$), acarretando provavelmente em tempos maiores para colmatção do leito filtrante para uma mesma qualidade de afluente ao leito filtrante. Sugere-se investigar o aumento das dosagens de coagulantes, para que a qualidade do efluente final não seja prejudicada pelo aumento da granulometria do leito filtrante.

- Na presente pesquisa, a lavagem do leito filtrante foi realizada de acordo com as recomendações propostas por Di Bernardo e Dantas (2005). Entretanto, a confirmação da efetividade da limpeza era apenas pela medida da perda de carga no leito após lavagem. A utilização de polímeros em ensaios consecutivos pode ter favorecido a formação de “bolas de lodo” no leito, dificilmente removidas na lavagem, impactando nas linhas de fluxo no leito e provavelmente no aumento da perda de carga no leito. Contudo, sugere-se a instalação de dispositivo de verificação visual (placa de acrílico) do leito filtrante após lavagem. Propõe-se a instalação de ponto de coleta do efluente da lavagem, possibilitando medir variáveis que comprovem a remoção a níveis satisfatórios de sólidos suspensos do leito filtrante.

- Recomenda-se a determinação dos residuais de polieletrólitos nos seguintes pontos: no efluente coletado logo acima da superfície do filtro, nos efluentes coletados ao longo do leito filtrante e no efluente coletado na saída do leito filtrante. Deste modo,

poderão ser correlacionados os valores de turbidez, perda de carga e concentração residual de polímero.

- Em virtude de os polímeros catiônicos de alto peso molecular e altíssima densidade de carga apresentarem grandes quantidades de sítios ionizáveis, a acelerada colmatção do filtro pode estar relacionada à elevada quantidade de cargas positivas disponíveis sobre o leito filtrante, que formariam pontes sobre a superfície do leito com os flocos residuais da FAD. Portanto, sugere-se uma investigação dos potenciais elétricos nos pontos de coleta da floto-filtração. É também pertinente a investigação da utilização de polímeros catiônicos com menores densidades de carga na floto-filtração.

- As concentrações de N-NH_4^+ no efluente final da floto-filtração utilizando polímeros foi outro fator limitante deste processo. Com residuais entre 18,31 e 34,51 mg $\text{N-NH}_4^+ \cdot \text{L}^{-1}$ sugere-se a realização de uma instalação experimental complementar para remoção deste nutriente através de resinas de troca iônica. A utilização de zeólitas – minerais de silício e alumínio – é recomendada para esta função, devido à grande disponibilidade destes produtos no Brasil.

- Outra investigação experimental recomendada na floto-filtração para remoção de N-NH_4^+ é a utilização de agentes coagulantes que atuem em pH elevado, favorecendo a formação de NH_3 (arraste por *stripping* na FAD) no balanço químico entre $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$.

- O lodo resultante da FAD e da lavagem dos filtros era encaminhado à rede coletora de esgoto sanitário. É recomendável uma instalação experimental de condicionamento e desaguamento do lodo, investigando a tecnologia mais adequada ao lodo gerado pela FAD associado ou não ao lodo biológico. Sugere-se também a recirculação do efluente de lavagem para a elevatória do RALEx, cabendo avaliação do impacto desse ciclo no reator biológico.

A unidade piloto utilizada nesta pesquisa presente dentro dos limites da área I da EESC-USP possui instalações com dimensões representativas, sendo um instrumento capaz de realizar a transição entre pesquisas científicas em escala de bancada e as aplicações em escala real. Para maior esclarecimento da aplicação da tecnologia de floto-filtração como pós-tratamento de reatores anaeróbios, recomenda-se um fluxograma de tratamento, apresentado na Figura 6.1, que possui a possibilidade de funcionamento contínuo durante semanas na área I da EESC-USP.

Vale lembrar que esta pesquisa deu início as investigações do uso de polímeros na tecnologia de floto-filtração aplicada ao pós-tratamento de reatores anaeróbios tratando esgotos sanitários, cabendo às pesquisas subseqüentes esclarecer os problemas relativos a curta duração da carreira de filtração.

Figura 6.1. Fluxograma sugerido de ETE experimental piloto para investigação de tecnologia de pós-tratamento de reatores anaeróbios por floto-filtração seguida de remoção de nitrogênio e desinfecção.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISSE, M. M.; JÜRGENSEN, D.; REALI, M. A. P.; PENETRA, R. G.; FLORENCIO, L.; ALÉM SOBRINHO, P. Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios por Sistema de Flotação. In: CHERNICHARO, C. A. L. Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: FINEP (Projeto PROSAB), 2001. Capítulo 6, p. 333-376.

AISSE, M. M.; BONA, A.; JÜRGENSEN, D. Filtração rápida no polimento de efluentes de processo físico-químico com flotação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, XXIV. Belo Horizonte: ABES, 2007.

ALÉM SOBRINHO, P.; JORDAO, E. P. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios - uma análise crítica. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Org.). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Segrac Editora e Gráfica, 2001. Capítulo 9. p. 491-513.

AMATO, T.; EDZWALD, J.K.; TOBIASON, J.E.; DAHIQUIST, J.; HEDBERG, T. An integrated approach to dissolved air flotation. *Water Science Technology*, 2001. vol. 43, n.8, p. 19-26.

APHA. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21. ed. Washington: WEF, 2005.

BAUER, M. J.; BAYLEY, R.; CHIPPS, M. J.; EADES, A.; SCRIVEN, R. J.; RACHWAL, A. J. Enhanced Rapid Gravity Filtration and Dissolved Air Flotation for Pre-Treatment of River Thames Reservoir Water. *Water Science Technology*. 1998. vol. 37, n. 2, p. 35-42.

BOLTO, B. A. Soluble polymers in water-purification. *Progress in Polymer Science*, 1995. vol. 20, n. 6, p. 987-1041.

BOLTO, B. A.; DIXON R. D.; GRAY S. R.; CHEE, R.; HARBOUR, P. J.; LE NGOC; WARE, A. J. The use of soluble organic polymers in waste treatment. *Water Science Technology*, 1996. vol. 34, n. 9, p. 117-124.

BRAGA, G. A. Emprego da flotação por ar dissolvido no pré-tratamento de efluentes líquidos de uma indústria cítrica. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União. Brasília, DF.

BUENO, F.B.A. Tratamento de água de abastecimento contendo cianobactérias e microcistina em sistema constituído por etapas de pré-cloração, coagulação/floculação, flotação e adsorção em carvão ativado . Dissertação (Mestrado

em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

BUISINE, F.; OEMCKE, D. Seasonal Influence of Waste Stabilization Pond Effluent on DAF/F (Dissolved Air Flotation/Filtration) Process Operation. *Water Science Technology*, 2003. vol. 48, n. 2, p. 357-364.

CAMPOS, J. R. & PEREIRA, J. A. R. Reator Anaeróbio de leito expandido/fluidificado. In: CAMPOS, J. R. (coordenador). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: FINEP (Projeto PROSAB), 1999. p. 464.

CARVALHO, M. E. Flotação de alta taxa aplicada ao pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CENTURIONE FILHO, P. L. Desenvolvimento e operação de uma instalação de flotação de bancada para águas de abastecimento. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CHERNICHARO, C.A.L. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 1997. v.5, p.245.

CHERNICHARO, C.A.L.; VAN HAANDELL, A. C.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. In: CHERNICHARO, C.A.L. (Org.) Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: FINEP (Projeto PROSAB), 2001. Capítulo 1, p.19-34.

COELHO, E.R.C. Estudo da taxa de aplicação superficial em uma instalação piloto de flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento de água para abastecimento. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

CONSTANZI, R. N. Estudos de tratamentos físicos-químicos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

CROSSLEY, I. A.; VALADE, M. T. (2001). A review of the technological developments of dissolved air flotation. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*. vol. 55, n. 7-8, p. 479-491.

DI BERNARDO, L. e DANTAS, A. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2 ed. São Carlos: Rima, 2005. p.1584.

DOMBROSKI, S.A.G. Influencia das condições de floculação na eficiência da flotação por ar dissolvido de alta taxa aplicada ao tratamento de águas de abastecimento. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

EADES, A.; BRIGNALL, W. J. Counter-Current Dissolved Air Flotation/Filtration. *Water Science Technology*, 1995. vol. 31, n. 3-4, p. 173-178.

FERGUSON, C.; LOGSDON, G. S.; CURLEY, D. Comparison of Dissolved Air Flotation and Direct Filtration. *Water Science Technol*, 1995. vol. 31, n. 3-4, p. 113-124.

FORESTI, E. Fundamentos do processo de digestão anaeróbia. In: VIÑAS, M.; SOUBES, M.; BORZACCONI, L.; MUXI, L. (Org.). Tratamento Anaeróbio. Montevideo: Universidad de la Republica, 1994. p.97-110.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 7027: Water Quality – Determination of turbidity. 3 ed. Genebra, Suíça, 1999.

IVES, K. J. Rapid Filtration. *Water Research*, 1970. vol. 4, p.201-223.

JEWELL, W. J.; SWITZENBAUM, M. S.; MORRIS, J. W. (1981). Municipal Wastewater –Treatment with Anaerobic Attached Microbial Film. *Journal Water Pollution Control Federation*, 1981. vol. 53, n. 4, p. 482-490.

KIURU, H. J. Development of Dissolved Air Flotation Technology from the First Generation to the Newest (third) one (DAF in Turbulent Flow Conditions). *Water Science Technology*, 2001. vol. 43, n.8, p.1-7.

KROFTA, M.; MISKOVIC, D.; BURGESS, D.; FAHEY, E. The Investigation of the Advanced Treatment of Municipal Wastewater by Modular Flotation-Filtration Systems and Reuse for Irrigation. *Water Science Technology*, 1996. vol. 33, n. 10-11, p. 171-179.

LAINÉ, S.; POIJOL, T.; DUFAY, S.; BARON, J.; ROBERT, P. (1998). Treatment of stormwater to bathing water quality by dissolved air flotation, filtration and ultraviolet disinfection. *Water Science Technol*, 1998. vol. 38, n. 10, p. 99-105.

LIMA, M.R.A. Emprego de flotação por ar dissolvido no tratamento de águas residuárias de uma indústria de papel visando a recuperação de fibras. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MARCHETTO, M. Estudo de uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de águas residuárias. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MARCHETTO, M. Remoção de nutrientes do efluente de reator anaeróbio utilizando reatores microaeróbio e com aeração intermitente seguidos de flotação por ar dissolvido. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

MARCHIORETTO, M. M. Ozonização seguida de coagulação/floculação e flotação como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio com chicanas tratando

esgoto sanitário. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MENDONÇA, L. C. Microbiologia e cinética de sistema de lodos ativados como pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expandido. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: treatment and reuse. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 2003. p. 1334.

MINAS GERAIS, Comissão de Política Ambiental. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de águas, e dá outras providências. Deliberação Normativa nº 10, de 16 de dezembro de 1986. Diário Executivo de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 10 de jan. 1987, art. 5, item 1, lei nº 7772.

MONTIEL, A.; WELTÉ, B. Preozonation coupled with flotation filtration: successful removal of algae. *Water Science Technology*, 1998. vol. 37, n. 2, p. 65-73.

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

MORETTI, R. C. Emprego da flotação lamelar de alta taxa e convencional como pós-tratamento do efluente de sistema constituído de reator anaeróbio seguido de reator aeróbio tratando esgoto sanitário. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MORUZZI, R. B. Tratamento de água de abastecimento, contendo ácido húmico complexado com ferro e manganês, utilizando a flotação por ar dissolvido conjugada a oxidação química. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MORUZZI, R. B. Avaliação da influência da distribuição de tamanho de partículas e do binômio velocidade/tempo de detenção na zona de reação no desempenho da flotação como utilização de sonda ultra-sônica e técnica de análise por imagem. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

NICIURA, C. L. Avaliação do uso da banda de rodagem de pneus inservíveis triturada como suporte ao desenvolvimento de biofilmes em um reator anaeróbio de leito expansível. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de

Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

NOYOLA, A. Tratamiento anaerobico de aguas, sistemas industriales. In: II-UNAM. Mexico, 1993.

ODEGAARD, H. Optimization of flocculation/flotation in chemical wastewater treatment. *Water Science Technology*, 1995. vol. 31, n. 3-4, p. 73-82.

OFFICER, J.; OSTROWSKI, J. A.; WOOLLARD, P. J. The desing and operation of conventional and novel flotation systems on a number of impounded water types. *Water Science Technology; Water Supply*, 2001. vol. 1, n. 1, p. 63-69.

OLIVEIRA, A. L. Floto-filtração como pós-tratamento do efluente do reator anaeróbico tratando esgoto sanitário. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PÁDUA, V. L.; SALES, M. V.; FREIRE, R.E. Influencia do pré-tratamento químico no desempenho de unidades de flotofiltração e de filtração direta descendente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, XXI . João Pessoa: ABES, 2001.

PATRIZZI, L. J. Redução do volume de lodo gerado em decantadores de estações de tratamento de água tradicionais utilizando espessamento por flotação, e por gravidade seguidos de centrifugação. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

PATRIZZI, L. J. Remoção de ferro, manganês e substâncias húmicas de água para abastecimento utilizando unidade de flotação por ar dissolvido de alta taxa e oxidação química. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PENETRA, R. G. Pós-tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB). Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

PENETRA, R. G. Flotação aplicada ao pós-tratamento do efluente de reator anaeróbico de leito expandido tratando esgoto sanitário. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

PEREIRA, J. A. R. Concepção, construção e operação de reator anaeróbico de leito expandido, em escala real, para tratamento de esgoto sanitário. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

PIRES, L. C. Potencialidade da utilização de resíduos orgânicos removidos por flotação de efluentes líquidos de indústrias de alimentos como fonte nutritiva para

bovinos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

PORTO, T. G. Tratamento avançado de esgoto sanitário em sistema seqüencial composto por processo biológico anaeróbio, flotação, filtração em areia e em membranas. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

REALI, M. A. P. Aplicação da Flotação por Ar Dissolvido ao Tratamento de Águas de Abastecimento. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.

REALI, M. A. P. Concepção e Avaliação de um Sistema Compacto para Tratamento de Águas de Abastecimento utilizando o Processo de Flotação por Ar Dissolvido e Filtração com Taxa Declinante. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

REALI, M. A. P. & CAMPOS, J. R. Projeto de Câmaras de Saturação de Sistemas de Flotação por Ar Dissolvido com Recheios de Anéis de PVC. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XVII. La Habana, Cuba: AIDIS, 1992.

REALI, M. A. P.; CAMPOS, J. R.; PENETRA, R. G. Sewage treatment by anaerobic biological process associated with dissolved air flotation. *Water Science Technology*, 1999. vol.43, n°.08, p. 91-98.

REALI, M. A. P.; PENETRA, R. G.; CARVALHO, M. E. Técnica da flotação com adição de coagulante e polímeros sintéticos aplicada ao pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Coletâneas de trabalhos técnicos. Belo Horizonte: FINEP (Projeto PROSAB), 2000. p.173-180.

REALI, M. A. P.; PENETRA, R. G.; CAMPOS, J. R. Dissolved-air flotation associated with na anaerobic reactor, as applied to sewage treatment. *International Journal Environmental and Pollution*, 2007. vol. 30, n. 2, p. 174-192.

RIPLEY, L. E; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Journal WPCF*, 1986. vol. 58, n. 5, p. 406- 411.

SANTOS, S.P. Estudo de uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento vertical entre placas, aplicada a remoção de algas em águas de abastecimento. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

SARTORI, L. Influência do uso de polímeros sintéticos no desempenho da flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento de água de abastecimento. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

SCRIVEN, R. J.; OUKI, S. K.; DOGGART, A. S.; BAUER, M. J. The Impact of Physico-Chemical Water Treatment on a Novel Flotation/Filtration Process. *Water Science Technology*, 1999. vol. 39, n. 10-11, p. 211-215.

STAINBACH, S.; HAARHOF J. A simplified method for assessing the saturation efficiency at full-scale dissolved air flotation plants. *Water science and technology*, 1998. vol. 38, n. 6, p. 303-310.

TEBBUTT, T. H. Y. An Investigation into Tertiary Treatment by Rapid Filtration. *Water Research*, 1971. vol. 5, p. 81-92.

TOBIASON J. E.; JOHNSON G. S.; WESTERHOFF P. K.; VIGNESWARAN B. Particle Size And Chemical Effects On Contact Filtration Performance. *Journal of Environmental Engineering*, 1993. vol. 119, n. 03, p. 520-539.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, EPA 180.1: Determination of Turbidity by Nephelometry. Cincinnati, 1993.

VIANNA, M. R. Hidráulica Aplicada às Estações de Tratamento de Água, 3 ed. Belo Horizonte: Imprimatur, 1997. p. 576.

8. ANEXOS

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 357, DE 17 MARÇO DE 2005

CAPÍTULO IV

DAS CONDIÇÕES E PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES

Art. 24. Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedecem às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.

Parágrafo único. O órgão ambiental competente poderá, a qualquer momento:

I - acrescentar outras condições e padrões, ou torná-los mais restritivos, tendo em vista as condições locais, mediante fundamentação técnica; e II - exigir a melhor tecnologia disponível para o tratamento dos efluentes, compatível com as condições do respectivo curso de água superficial, mediante fundamentação técnica.

Art. 25. É vedado o lançamento e a autorização de lançamento de efluentes em desacordo com as condições e padrões estabelecidos nesta Resolução.

Parágrafo único. O órgão ambiental competente poderá, excepcionalmente, autorizar o lançamento de efluente acima das condições e padrões estabelecidos no art. 34, desta Resolução, desde que observados os seguintes requisitos:

I - comprovação de relevante interesse público, devidamente motivado;

II - atendimento ao enquadramento e às metas intermediárias e finais, progressivas e obrigatórias;

III - realização de Estudo de Impacto Ambiental-EIA, às expensas do empreendedor responsável pelo lançamento;

IV - estabelecimento de tratamento e exigências para este lançamento; e

V - fixação de prazo máximo para o lançamento excepcional.

Art. 26. Os órgãos ambientais federal, estaduais e municipais, no âmbito de sua competência, deverão, por meio de norma específica ou no licenciamento da atividade ou empreendimento, estabelecer a carga poluidora máxima para o lançamento de substâncias passíveis de estarem presentes ou serem formadas nos processos produtivos, listadas ou não no art. 34, desta Resolução, de modo a não comprometer as metas progressivas obrigatórias, intermediárias e final, estabelecidas pelo enquadramento para o corpo de água.

§ 1º No caso de empreendimento de significativo impacto, o órgão ambiental competente exigirá, nos processos de licenciamento ou de sua renovação, a apresentação de estudo de capacidade de suporte de carga do corpo de água receptor.

§ 2º O estudo de capacidade de suporte deve considerar, no mínimo, a diferença entre os padrões estabelecidos pela classe e as concentrações existentes no trecho desde a montante, estimando a concentração após a zona de mistura.

§ 3o Sob pena de nulidade da licença expedida, o empreendedor, no processo de licenciamento, informará ao órgão ambiental as substâncias, entre aquelas previstas nesta Resolução para padrões de qualidade de água, que poderão estar contidas no seu efluente.

§ 4o O disposto no § 1o aplica-se também às substâncias não contempladas nesta Resolução, exceto se o empreendedor não tinha condições de saber de sua existência nos seus efluentes.

Art. 27. É vedado, nos efluentes, o lançamento dos Poluentes Orgânicos Persistentes-POPs mencionados na Convenção de Estocolmo, ratificada pelo Decreto Legislativo no 204, de 7 de maio de 2004.

Parágrafo único. Nos processos onde possa ocorrer a formação de dioxinas e furanos deverá ser utilizada a melhor tecnologia disponível para a sua redução, até a completa eliminação.

Art. 28. Os efluentes não poderão conferir ao corpo de água características em desacordo com as metas obrigatórias progressivas, intermediárias e final, do seu enquadramento.

§ 1o As metas obrigatórias serão estabelecidas mediante parâmetros.

§ 2o Para os parâmetros não incluídos nas metas obrigatórias, os padrões de qualidade a serem obedecidos são os que constam na classe na qual o corpo receptor estiver enquadrado.

§ 3o Na ausência de metas intermediárias progressivas obrigatórias, devem ser obedecidos os padrões de qualidade da classe em que o corpo receptor estiver enquadrado.

Art. 29. A disposição de efluentes no solo, mesmo tratados, não poderá causar poluição ou contaminação das águas.

Art. 30. No controle das condições de lançamento, é vedada, para fins de diluição antes do seu lançamento, a mistura de efluentes com águas de melhor qualidade, tais como as águas de abastecimento, do mar e de sistemas abertos de refrigeração sem recirculação.

Art. 31. Na hipótese de fonte de poluição geradora de diferentes efluentes ou lançamentos individualizados, os limites constantes desta Resolução aplicar-se-ão a cada um deles ou ao conjunto após a mistura, a critério do órgão ambiental competente.

Art. 32. Nas águas de classe especial é vedado o lançamento de efluentes ou disposição de resíduos domésticos, agropecuários, de aquicultura, industriais e de quaisquer outras fontes poluentes, mesmo que tratados.

§ 1o Nas demais classes de água, o lançamento de efluentes deverá, simultaneamente:

I - atender às condições e padrões de lançamento de efluentes;

II - não ocasionar a ultrapassagem das condições e padrões de qualidade de água, estabelecidos para as respectivas classes, nas condições da vazão de referência; e III - atender a outras exigências aplicáveis.

§ 2o No corpo de água em processo de recuperação, o lançamento de efluentes observará as metas progressivas obrigatórias, intermediárias e final.

Art. 33. Na zona de mistura de efluentes, o órgão ambiental competente poderá autorizar, levando em conta o tipo de substância, valores em desacordo com os estabelecidos para a respectiva classe de enquadramento, desde que não comprometam os usos previstos para o corpo de água.

Parágrafo único. A extensão e as concentrações de substâncias na zona de mistura deverão ser objeto de estudo, nos termos determinados pelo órgão ambiental competente, às expensas do empreendedor responsável pelo lançamento.

Art. 34. Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água desde que obedeçam as condições e padrões previstos neste artigo, resguardadas outras exigências cabíveis:

§ 1º O efluente não deverá causar ou possuir potencial para causar efeitos tóxicos aos organismos aquáticos no corpo receptor, de acordo com os critérios de toxicidade estabelecidos pelo órgão ambiental competente.

§ 2º Os critérios de toxicidade previstos no § 1º devem se basear em resultados de Ensaios ecotoxicológicos padronizados, utilizando organismos aquáticos, e realizados no efluente.

§ 3º Nos corpos de água em que as condições e padrões de qualidade previstos nesta Resolução não incluam restrições de toxicidade a organismos aquáticos, não se aplicam os parágrafos anteriores.

§ 4º Condições de lançamento de efluentes:

I - pH entre 5 a 9;

II - temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C na zona de mistura;

III - materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

IV - regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor, exceto nos casos permitidos pela autoridade competente;

V - óleos e graxas:

1 - óleos minerais: até 20mg/L;

2- óleos vegetais e gorduras animais: até 50mg/L; e

VI - ausência de materiais flutuantes.

§ 5o Padrões de lançamento de efluentes:

TABELA X - LANÇAMENTO DE EFLUENTES

TABELA X – LANÇAMENTO DE EFLUENTES	
PADRÕES	
PARÂMETROS INORGÂNICOS	VALOR MÁXIMO
Arsênio total	0,5 mg/L As
Bário total	5,0 mg/L Ba
Boro total	5,0 mg/L B
Cádmio total	0,2 mg/L Cd
Chumbo total	0,5 mg/L Pb
Cianeto total	0,2 mg/L CN
Cobre dissolvido	1,0 mg/L Cu
Cromo total	0,5 mg/L Cr
Estanho total	4,0 mg/L Sn
Ferro dissolvido	15,0 mg/L Fe
Fluoreto total	10,0 mg/L F
Manganês dissolvido	1,0 mg/L Mn
Mercúrio total	0,01 mg/L Hg
Níquel total	2,0 mg/L Ni
Nitrogênio amoniacal total	20,0 mg/L N
Prata total	0,1 mg/L Ag
Selênio total	0,30 mg/L Se
Sulfeto	1,0 mg/L S
Zinco total	5,0 mg/L Zn
PARÂMETROS ORGÂNICOS	VALOR MÁXIMO
Clorofórmio	1,0 mg/L
Dicloroeteno	1,0 mg/L
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,5 mg/L C ₆ H ₅ OH
Tetracloreto de Carbono	1,0 mg/L
Tricloroeteno	1,0 mg/L

Art. 35. Sem prejuízo do disposto no inciso I, do § 1o do art. 24, desta Resolução, o órgão ambiental competente poderá, quando a vazão do corpo de água estiver abaixo da vazão de referência, estabelecer restrições e medidas adicionais, de caráter excepcional e temporário, aos lançamentos de efluentes que possam, dentre outras consequências:

I - acarretar efeitos tóxicos agudos em organismos aquáticos; ou II - inviabilizar o abastecimento das populações.

Art. 36. Além dos requisitos previstos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis, os efluentes provenientes de serviços de saúde e estabelecimentos nos quais haja despejos infectados com microorganismos patogênicos, só poderão ser lançados após tratamento especial.

Art. 37. Para o lançamento de efluentes tratados no leito seco de corpos de água intermitentes, o órgão ambiental competente definirá, ouvido o órgão gestor de recursos hídricos, condições especiais.