

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**APLICAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO
COAGULANTE NO POLIMENTO FINAL PARA REMOÇÃO DE FÓSFORO EM
UNIDADES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

MÔNICA DA SILVA

ORIENTADORA: CRISTINA CELIA SILVEIRA BRANDÃO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL
E RECURSOS HÍDRICOS**

BRASÍLIA/DF: Setembro/2003

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

APLICAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA
COMO COAGULANTE NO POLIMENTO FINAL PARA REMOÇÃO DE
FÓSFORO EM UNIDADES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

MÔNICA DA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.

APROVADA POR:

Prof^ª. Cristina Celia Silveira Brandão, PhD (ENC-UnB)
(ORIENTADORA)

Prof. Marco Antonio Almeida de Souza, PhD (ENC-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

Prof. Ricardo Franci Gonçalves, D.Ing. (DHS-UFES)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 24 DE SETEMBRO DE 2003.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, MÔNICA da

Aplicação de Lodo de Estações de Tratamento de Água como Coagulante no Polimento Final para Remoção de Fósforo em Unidades de Tratamento de Esgoto.
[Distrito Federal] 2003.

xxi,177p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, M.Sc., Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2003).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------------------|---------------------|
| 1. Resíduos do tratamento de água | 4. Disposição final |
| 2. Polimento final | 5. Flotação |
| 3. Remoção de fósforo | 6. Sedimentação |
| ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Silva, M. (2003). Aplicação de Lodo de Estações de Tratamento de Água como Coagulante no Polimento Final para Remoção de Fósforo em Unidades de Tratamento de Esgoto. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM-062A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 175p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Mônica da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Aplicação de Lodo de Estações de Tratamento de Água como Coagulante no Polimento Final para Remoção de Fósforo em Unidades de Tratamento de Esgoto.

GRAU: Mestre

ANO: 2003

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Mônica da Silva

SQN 209 BL “E” apto 203

CEP 70854-050 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a execução desse trabalho, especialmente:

à CAESB e à Universidade de Brasília que, através de convênio firmado, possibilitaram a realização dessa pesquisa;

à Professora Cristina Celia Silveira Brandão, não só pela fundamental contribuição técnica enquanto coordenadora desse trabalho, mas pela dedicação e o entusiasmo com que desenvolve suas atividades;

aos demais professores do Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos: Koide, Marco Antonio, Nestor, Nabil, Oscar e Ricardo, por todos os conhecimentos transmitidos;

ao Professor Geraldo Boaventura e aos técnicos Renato e Fernando, do Departamento de Geoquímica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, pela preciosa colaboração nas análises do lodo;

aos colegas da CAESB que me forneceram as informações e o suporte necessário para o desenvolvimento desse trabalho, em especial a Ângela Biaggini, Marcelo Teixeira, Antônio Carlos, Maria do Carmo, Márcia, Cláudia, Luzia, Harada, Stefan e Raquel;

aos funcionários do Laboratório de Análise de Água: Boy, André e Aécio pela colaboração;

a todos os colegas de Mestrado, pelo companheirismo em todos os momentos que compartilhamos e que ainda compartilharemos;

aos meus pais, pelo exemplo de luta e perseverança que nos passam, e também, por todo o apoio logístico que nunca me faltou, na conciliação das tarefas de mãe e dona de casa com a vida profissional e acadêmica;

ao Ângelo, companheiro de todas as horas, às minhas filhas Carolina e Camila e, em especial, ao meu filho Gustavo, maior incentivador do meu retorno à Universidade;

sobretudo, a Deus, por estar sempre iluminando meu caminho.

RESUMO

APLICAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO COAGULANTE NO POLIMENTO FINAL PARA REMOÇÃO DE FÓSFORO EM UNIDADES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A presença de fósforo nos cursos d'água representa uma crescente preocupação ambiental devido à sua relação com o processo de eutrofização. Os despejos domésticos são importantes fontes de fósforo para nossos rios e lagos. Atualmente, uma alternativa que vem sendo cada vez mais empregada no polimento final para remoção de fósforo de efluentes do tratamento biológico de esgotos é a precipitação química com adição de sais de alumínio ou de ferro, seguida de flotação ou de sedimentação. Paralelamente a esse fato, diariamente a indústria do tratamento de água gera grandes quantidades de resíduos, ricos em alumínio ou ferro. Dentre as alternativas de disposição sustentável desse resíduo, destaca-se a utilização do seu potencial de coagulação.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade de coagulação do alumínio contido no lodo de ETAs, quando aplicado ao polimento final de efluentes de ETEs. Para tanto, foram desenvolvidos ensaios, em escala de laboratório, simulando-se as etapas de coagulação, floculação, sedimentação e flotação, utilizando-se o lodo de ETA e o sulfato de alumínio como coagulantes. Os ensaios incluíram o uso do lodo submetido ou não ao processo de acidificação para solubilização do alumínio. Foram utilizados os lodos desidratados gerados nas ETAs Pípiripau e Rio Descoberto e os efluentes secundários da ETE Brasília Sul e da ETE Samambaia, que apresentam características de qualidade da água bastante distintas. Todas essas unidades de tratamento estão localizadas no Distrito Federal.

Os resultados experimentais indicam que o uso do lodo acidificado da ETA Pípiripau como coagulante no polimento final de efluentes do tratamento de esgotos é tecnicamente viável, uma vez que o uso desse lodo promoveu eficiências de remoção de fósforo e de algas similares às obtidas com o uso do sulfato de alumínio. Além disso, o lodo gerado nos processos de sedimentação e de flotação com o uso do lodo acidificado mostrou-se menos volumoso e mais denso que no caso do uso de sulfato de alumínio. O processo de flotação parece ser o mais recomendado para a separação dos flocos do polimento físico-químico de esgotos, pois, além de gerar um menor volume de lodo, permite a adoção de taxas de aplicação cerca de 10 a 15 vezes maiores do que as de sedimentação.

ABSTRACT

THE USE OF ALUM SLUDGE FROM WATER TREATMENT AS A COAGULANT FOR PHOSPHORUS REMOVAL FROM SECONDARY EFFLUENT OF WASTEWATER TREATMENT

The presence of phosphorus in water bodies is an important environmental concern due to its relation to the eutrophication process. Domestic wastewater discharges are important phosphorus source to the water bodies. Presently, an alternative for phosphorous removal from effluents of biological treatment plants that has been frequently adopted is chemical precipitation, by addition of alum or iron salts, followed by flotation and sedimentation. At the same time, every day, the water treatment industry generates huge amount of residues rich in alum and iron. Among the sustentable disposal alternatives for this residue, the use of its coagulation potential stands out.

The objective of this work was to evaluate the alum sludge coagulation potential when applied to terciary wastewater treatment. For such, bench scale experiments were carried out to emulate coagulation, flocculation, sedimentation and flotation process, using alum sludge and aluminium sulphate as coagulants. Dewatered alum sludge from Descoberto and Pípiripau water treatment plants were used in the experiments. Secondary effluent from Brasilia Sul and Samambaia wastewater treatment plants, which present quite dissimilar water quality characteristics, were evaluated. All those plants are located in the Brazilian Federal District.

The experimental results suggest that the use of acidified alum sludge from Pípiripau WTP as coagulant in wastewater terciary treatment is technically viable, once the use of this sludge led to phosphorous and algae efficiencies removal similar to those achieved with the use of aluminium sulphate as coagulant. Additionally, the sludge produced in the sedimentation and flotation processes with the use of acidified alum sludge as coagulant was more bulky and dense than the one obtained using aluminium sulphate. Flotation process seems to be more recommended for separation of flocs from chemical precipitation, because it generates less sludge volume, as well as, it allows the use of flocculation velocity about 10 to 15 times larger than sedimentation velocity.

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS	4
2.1. - OBJETIVO GERAL	4
2.2. - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 - O USO DE COAGULANTES NO TRATAMENTO DE ESGOTOS	5
3.2 - REMOÇÃO DE FÓSFORO EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS	8
3.2.1 - Processos Biológicos.....	12
3.2.2 - Processos Químicos	13
3.3 - FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO	15
3.4 - FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE FLOTAÇÃO	19
3.4.1 - Variantes do processo de flotação	19
3.4.2 - FAD por pressurização.....	21
3.4.3 - Parâmetros de projeto.....	23
3.5 - RESÍDUOS SÓLIDOS DO TRATAMENTO DE ÁGUA	26
3.5.1 - Origem e caracterização dos resíduos sólidos de ETAs.....	27
3.5.2 - O alumínio presente no lodo de ETAs	32
3.5.3 - Tecnologias disponíveis para o tratamento do lodo	35
3.5.4 - Disposição final do lodo de ETAs	42
3.6 - APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ETAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS	44
4 - METODOLOGIA	49
4.1 - EFLUENTES UTILIZADOS NOS ENSAIOS.....	50
4.1.1 - Estação de Tratamento de Esgotos de Brasília - Sul.....	51
4.1.2 - Estação de Tratamento de Esgotos de Samambaia	53
4.2 - LODOS DE ETAS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	55
4.2.1 - Estação de Tratamento de Água Pípiripau	56
4.2.2 - Estação de Tratamento de Água do Rio Descoberto.....	57
4.3 - DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS	59
4.3.1 - 1ª Etapa: Testes Preliminares	59
4.3.2 - 2ª Etapa: Caracterização do Lodo de ETAs	62
4.3.3 - 3ª Etapa: Experimentos de flotação e de sedimentação	63
5 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	70
5.1 - Resultados dos testes preliminares	70
5.2 - Caracterização do lodo	77
5.3 - Resultados dos ensaios de flotação e de sedimentação - ETEB Sul	79
5.3.1 - Caracterização das amostras.....	80
5.3.2 - Ensaios de sedimentação	81
5.3.3 - Ensaios de flotação	87
5.4 - Ensaios de flotação e de sedimentação - ETE Samambaia	96
5.4.1 - Caracterização das amostras.....	96
5.4.2 - Análise dos resultados dos ensaios de sedimentação	97
5.4.3 - Ensaios de flotação.....	105
5.4 - Análise comparativa entre os processos de flotação e de sedimentação.....	113
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	116
APÊNDICE A - METODOLOGIA UTILIZADA NA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE LODO PARA LEITURA DE METAIS PESADOS	125

APÊNDICE B - RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES	126
APÊNDICE C - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLOTAÇÃO E DE SEDIMENTAÇÃO	131
C.1 - EXPERIMENTO 01 - ETEB SUL	131
C.1.1 - Ensaios de sedimentação	131
C.1.2 - Ensaios de flotação	133
C.1.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”	137
C.2 - EXPERIMENTO 02 - ETEB SUL	138
C.2.1 - Ensaios de sedimentação	138
C.2.2 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”	140
C.3 - EXPERIMENTO 03 - ETEB SUL	140
C.3.1 - Ensaios de sedimentação	141
C.3.2 - Ensaios de flotação	143
C.3.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”	144
C.4 - EXPERIMENTO 04 - ETEB SUL	145
C.4.1 - Ensaios de sedimentação	145
C.4.2 - Ensaios de flotação	147
C.5.2 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”	150
C.5 - EXPERIMENTO 05 - ETEB SUL	151
C.5.1 - Ensaios de flotação	152
C.5.2 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”	155
C.6 - EXPERIMENTO 01 - ETE SAMAMBAIA	156
C.6.1 - Ensaios de sedimentação	157
C.6.2 - Ensaios de flotação	159
C.6.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”	163
C.7 - EXPERIMENTO 02 - ETE SAMAMBAIA	164
C.7.1 - Ensaios de sedimentação	164
C.7.2 - Ensaios de flotação	166
C.7.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”	169
C.7 - EXPERIMENTO 03 - ETE SAMAMBAIA	170
C.7.1 - Ensaios de sedimentação	171
C.7.2 - Ensaios de flotação	173
C.7.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”	176

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esquema de FAD com pressurização de parte do efluente recirculado.....	21
Figura 3.2 - Etapas do Tratamento de água pelo processo de tratamento convencional, incluindo as etapas do tratamento dos resíduos sólidos.....	27
Figura 3.3 - Adensador mecânico de esteira.....	37
Figura 3.4 - Filtro prensa de placas	39
Figura 3.5 - Esquema de funcionamento do filtro a vácuo.....	40
Figura 4.1 - Diagrama de etapas dos ensaios.....	49
Figura 4.2 - Sistema de tratamento da ETEB Sul.....	52
Figura 4.3 - Sistema de tratamento da ETE Samambaia	53
Figura 4.4 - Foto da ETA pipiripau	56
Figura 4.5 - Sistema de tratamento de água da ETA Rio descoberto	58
Figura 4.6 - Foto do equipamento “Jartest” utilizado nos ensaios de sedimentação.....	60
Figura 4.7 - Esquema do “Flotateste”	65
Figura 4.8 - Foto do “Flotateste” em operação.....	66
Figura 5.1 - Testes preliminares: (a) Residuais de ortofosfato, (b) pH e turbidez, em função da dosagem de sulfato de alumínio.	72
Figura 5.2 - Testes preliminares: Residuais de ortofosfato e turbidez em função da dosagem de lodo não acidificado da ETA Rio Descoberto, (a) amostra 01 e (b) amostra 02.....	73
Figura 5.3 - Testes preliminares: Residuais de ortofosfato e turbidez em função da dosagem de lodo não acidificado da ETA Pipiripau, (a) amostra 01 e (b) amostra 02.	74
Figura 5.4 - Testes preliminares: Residuais de ortofosfato e turbidez em função da dosagem de lodo acidificado da ETA Rio Descoberto.....	74
Figura 5.5 - Testes preliminares: Residuais de ortofosfato e turbidez em função da dosagem de lodo acidificado da ETA Pipiripau.....	75
Figura 5.6 - Ensaios de sedimentação - ETEB Sul: Residuais de ortofosfato em função da dosagem (a) de sulfato de alumínio e (b) de LETA.....	81
Figura 5.7 - Ensaios de sedimentação - ETEB Sul: Dosagem ótima de coagulante.	82
Figura 5.8 - Ensaios de sedimentação – ETEB Sul: Residual de fósforo total, ortofosfato e turbidez em função da dosagem de sulfato de alumínio, observada nos experimentos (a) 01, (b) 02, (c) 03 e (d) 04.....	83
Figura 5.9 - Ensaios de sedimentação – ETEB Sul: Residual de fósforo total, ortofosfato e turbidez em função da dosagem de LETA, observada nos experimentos (a) 01, (b) 02, (c) 03 e (d) 04.	83
Figura 5.10 - Ensaios de sedimentação - ETEB Sul: (a) residuais de turbidez e (b) de ortofosfato em função da taxa de aplicação superficial, utilizando o sulfato de alumínio como coagulante; (c) residuais de turbidez e (d) de ortofosfato em função da taxa de aplicação superficial, utilizando o LETA como coagulante.....	85
Figura 5.11 - Ensaios de sedimentação - ETEB Sul: (a) Eficiência de remoção de turbidez e (b) de ortofosfato para taxa de aplicação superficial “ótima” e dosagem “ótima” de sulfato de alumínio e LETA	86
Figura 5.12 - Ensaios de flotação - ETEB Sul: Residuais de ortofosfato, fósforo total e turbidez em função da dosagem de sulfato de alumínio, observada nos experimentos (a) 01, (b) 04 e (c) 05.	88

Figura 5.13 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: Variação da concentração de ortofosfato em função da dosagem de LETA, observada nos experimentos (a) 01, (b) 04 e (c) 05.	89
Figura 5.14 - Ensaio de flotação - ETEB Sul - Dosagem ótima de coagulante	90
Figura 5.15 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: (a) Residuais de turbidez e (b) ortofosfato em função da variação da taxa de aplicação.	91
Figura 5.16 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: (a) Residuais de turbidez e (b) ortofosfato em função da variação da taxa de recirculação, adotando a dosagem “ótima” de LETA.	92
Figura 5.17 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: (a) Residuais de turbidez e (b) ortofosfato em função da variação do tempo de floculação e adotando a dosagem “ótima” de LETA.	93
Figura 5.18 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: Eficiência do processo em condições operacionais ótimas, observadas nos experimentos 04 (a) e 05 (b).	94
Figura 5.19 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Residual de ortofosfato em função da dosagem de (a) sulfato de alumínio e (b) LETA.	98
Figura 5.20 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Dosagem ótima de coagulante.....	99
Figura 5.21 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Residual de turbidez e de ortofosfato em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio, observados nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.....	100
Figura 5.22 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Correlação entre os residuais de turbidez e ortofosfato em função da dosagem de sulfato de alumínio, observada nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.	100
Figura 5.23 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Residuais de turbidez e de ortofosfato em função da variação da dosagem de LETA observados nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.	101
Figura 5.24 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Correlação entre os residuais de turbidez e ortofosfato em função da dosagem de LETA observada nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.	101
Figura 5.25 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Residual de (a) turbidez e (b) de ortofosfato em função da dosagem de sulfato de alumínio, para duas taxas de aplicação.	102
Figura 5.26 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia - Variação do residual de turbidez e da concentração de ortofosfato em função da variação da taxa de aplicação, (a) e (b) quando utilizou-se o sulfato de alumínio, (c) e (d) quando utilizou-se o LETA.	103
Figura 5.27 - Volume de lodo gerado no ensaio de sedimentação utilizando o sulfato de alumínio ($\Delta L1$) e o LETA ($\Delta L2$).	105
Figura 5.28 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Residuais de ortofosfato em função da dosagem de (a) sulfato de alumínio e (b) de lodo acidificado.	106
Figura 5.29 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Dosagem ótima de coagulante.....	106
Figura 5.30 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Residual de turbidez e ortofosfato e variação do pH em função da dosagem de sulfato de alumínio observados nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.....	107
Figura 5.31 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Residual de turbidez e ortofosfato e variação do pH em função da dosagem de LETA, observado nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.	107
Figura 5.32 - Resultados dos ensaios de flotação - ETE Samambaia: Residuais de ortofosfato em função da variação da taxa de aplicação.	108

Figura 5.33 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Residuais de ortofosfato em função da variação da taxa de recirculação	109
Figura 5.34 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia - Variação da concentração de ortofosfato residual em função da variação do tempo de floculação.	110
Figura 5.35 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Eficiência do processo de flotação em condições operacionais ótimas, observada nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.	111
Figura 5.36 - Lodo flotado a partir da coagulação com o sulfato de alumínio (direita) e com o LETA (esquerda).	113
Figura 5.37 - Fenômeno de ressuspensão do lodo observado nos ensaios de sedimentação utilizando o sulfato de alumínio (frasco à esquerda) e o lodo acidificado (frasco à direita).	115

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Eficiência esperada para os diversos processos de remoção de fósforo.....	11
Tabela 3.2 - Parâmetros de projeto recomendados por diversos autores para o tanque de flotação no caso de FAD aplicado ao tratamento de águas residuárias.....	24
Tabela 3.3 - Faixas ótimas de desempenho dos principais parâmetros operacionais do processo de FAD aplicado ao polimento final de efluentes secundários de ETE.....	25
Tabela 3.4 - Variação dos parâmetros de projeto da FAD, adotados em unidades piloto de remoção de fósforo de efluentes secundário do tratamento de esgotos.	25
Tabela 3.5 - Características dos lodos gerados em ETAs.....	30
Tabela 3.6 - Concentração de metais presentes nos lodos de decantadores das ETAs situadas no Estado de São Paulo.	31
Tabela 3.7 - Características da água de lavagem de filtros (Coagulante primário: ETAs 1 e 2 - cloreto férrico; ETAs 3 e 4 - sulfato de alumínio).	31
Tabela 3.8 - Quadro comparativo da eficiência dos processos de desidratação aplicados ao lodo de ETAs que utilizam sais de ferro e alumínio	42
Tabela 4.1 - Limites máximos admissíveis para os parâmetros de qualidade da água do efluente do polimento final da ETEB Sul.	52
Tabela 4.2 - Características do efluente da Lagoa de maturação da ETE Samambaia.	55
Tabela 4.3 - Parâmetros e metodologias utilizadas nas análises físico-químicas.....	63
Tabela 4.4: Fases dos ensaios de sedimentação	69
Tabela 4.5: Etapa dos ensaios de flotação	69
Tabela 5.1 - Condições operacionais dos testes preliminares	72
Tabela 5.2 - Teste de reprodutibilidade de resultados para diferentes amostras de lodo acidificado da ETA Pipiripau e diferentes amostras do efluente secundário da ETE Norte.	76
Tabela 5.3 - Características físico-químicas das amostras de lodo utilizadas nos testes preliminares	78
Tabela 5.4 - Características físico-químicas do lodo utilizado na etapa de ensaios de sedimentação e flotação.....	79
Tabela 5.5 - Características das amostras do efluente secundário da ETEB Sul utilizadas nos experimentos.....	80
Tabela 5.6 - Ensaio de sedimentação - Experimento 04 - ETEB Sul: Características do afluente, do efluente e do lodo gerado no processo de sedimentação em condições operacionais “ótimas”.....	87
Tabela 5.7 - Ensaio de flotação - Experimentos 04 e 05 - ETEB Sul: Características da amostra bruta, do sobrenadante e do lodo gerado no processo de flotação, operando em condições “ótimas” e valores residuais esperados.	95
Tabela 5.8 - Características das amostras do efluente secundário da ETE Samambaia utilizadas nos experimentos.....	97
Tabela 5.9 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia - Resultados dos testes para as condições “ótimas” de operação.	104
Tabela 5.10 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia - Características do efluente e do lodo gerado após o polimento final pelo processo de flotação em	

condições operacionais “ótimas” e também características da amostra bruta e valores residuais esperados.	112
Tabela 5.11 - Resultados do experimento 04 da ETEB Sul e do experimento 02 da ETE Samambaia	114
Tabela B.1 - Teste preliminar 01 - Variação da dosagem de Sulfato de Alumínio.....	126
Tabela B.2 - Teste preliminar 02 - Variação da dosagem de Lodo da ETA Rio Descoberto.....	126
Tabela B.3 - Teste preliminar 03 - Variação da dosagem de Lodo da ETA Rio Descoberto.....	127
Tabela B.4 - Teste preliminar 04 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA Rio Descoberto	127
Tabela B.5 - Teste preliminar 05 - Variação da dosagem de Lodo da ETA Pípiripau.....	127
Tabela B.6 - Teste preliminar 06 - Variação da dosagem de Lodo da ETA Pípiripau.....	128
Tabela B.7 - Teste preliminar 07 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA Pípiripau.....	128
Tabela B.8 - Teste preliminar 08 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA Pípiripau.....	128
Tabela B.9 - Teste preliminar 09 - Variação da dosagem de lodo da ETA Pípiripau, aplicado em conjunto com o sulfato de alumínio.....	129
Tabela B.10 - Teste preliminar 10 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA RD.....	129
Tabela B.11 - Teste preliminar 11 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA Pípiripau.....	129
Tabela B.12 - Teste preliminar 12 - Análise da reprodutibilidade dos resultados obtidos para a “dosagem ótima” definida no teste preliminar 11, utilizando-se a mesma amostra de esgoto e a mesma suspensão de lodo.	130
Tabela B.13 - Teste preliminar 13 - Análise da reprodutibilidade dos resultados obtidos no teste preliminar 11, utilizando-se nova amostra de lodo da ETA Pípiripau.	130
Tabela C.1 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 23/09/2002 e utilizada no experimento 01	131
Tabela C.2 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas	131
Tabela C.3 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio	132
Tabela C.4 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado	132
Tabela C.5 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas	133
Tabela C.6 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação “ótima”	133
Tabela C.7 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.....	133
Tabela C.8 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação – Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio e lodo acidificado.	134
Tabela C.9 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Ajuste da dosagem “ótima” para o lodo acidificado	134
Tabela C.10 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	135

Tabela C.11 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de “taxa de aplicação ótima” para o lodo acidificado.....	135
Tabela C.12 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	135
Tabela C.13 - Experimento 01 - ETEB Sul - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (TR) “ótima”	136
Tabela C.14 - Experimento 01 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	136
Tabela C.15 - Experimento 01 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (TF) “ótimo”	136
Tabela C.16 - Experimento 01 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação e de flotação	137
Tabela C.17 - Experimento 01 - ETEB Sul - Análise do “ponto ótimo”	137
Tabela C.18 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 08/10/2002 e utilizada no experimento 02.....	138
Tabela C.19 - Experimento 02 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas.....	138
Tabela C.20 - Experimento 02 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio.....	138
Tabela C.21 - Experimento 02 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado	139
Tabela C.22 - Experimento 02 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas.....	139
Tabela C.23 - Experimento 02 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação (TA) ”ótima”	139
Tabela C.24 - Experimento 02 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação	140
Tabela C.25 - Experimento 02 - ETEB Sul - Análise do “ponto ótimo”	140
Tabela C.26 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 15/10/2002 e utilizada no experimento 03.....	140
Tabela C.27 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas	141
Tabela C.28 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio.....	141
Tabela C.29 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado	142
Tabela C.30 - Experimento 03 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas.....	142
Tabela C.31 - Experimento 03 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação “ótima”	143
Tabela C.32 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	143
Tabela C.33 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio e lodo acidificado	144
Tabela C.34 - Experimento 03 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação e de flotação	144
Tabela C.35 - Experimento 03 - ETEB Sul - Análise do “ponto ótimo”	145
Tabela C.36 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 22/10/2002 e utilizada no experimento 04.....	145

Tabela C.37 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas	145
Tabela C.38 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa do ensaio de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio	146
Tabela C.39 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado	146
Tabela C.40 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas	147
Tabela C.41 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa do ensaio de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação “ótima”	147
Tabela C.42 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa do ensaio de flotação - Condições operacionais adotadas	147
Tabela C.43 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio	148
Tabela C.44 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da dosagem ótima do Lodo acidificado	148
Tabela C.45 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	148
Tabela C.46 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (TA) “ótima” para o lodo acidificado	149
Tabela C.47 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	149
Tabela C.48 - Experimento 04 - ETEB Sul - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (TR) “ótima”	149
Tabela C.49 - Experimento 04 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	150
Tabela C.50 - Experimento 04 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (TF) “ótimo”	150
Tabela C.51 - Experimento 04 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação e de flotação	150
Tabela C.52 - Experimento 04 - ETEB Sul - Análise do “ponto ótimo”	151
Tabela C.53 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 10/11/2002 e utilizada no experimento 05	151
Tabela C.54 - Experimento 05 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	152
Tabela C.55 - Experimento 05 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio	152
Tabela C.56 - Experimento 05 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da dosagem “ótima” do Lodo acidificado	153
Tabela C.57 - Experimento 05 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	153
Tabela C.58 - Experimento 05 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (TA) “ótima” para o lodo acidificado	154
Tabela C.59 - Experimento 05 - ETEB Sul - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	154
Tabela C.60 - Experimento 05 - ETEB Sul - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (TR) “ótima”	154
Tabela C.61 - Experimento 05 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	155

Tabela C.62 - Experimento 05 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (TF) “ótimo”	155
Tabela C.63- Experimento 05 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de flotação	155
Tabela C.64- Experimento 05- ETEB Sul - Análise dos “pontos ótimos”	156
Tabela C.65 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETE Samambaia, coletada em 25/11/2002 e utilizada no experimento 01	156
Tabela C.66 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas	157
Tabela C.67 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa do ensaio de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio	157
Tabela C.68 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação. Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado	158
Tabela C.69 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas	158
Tabela C.70 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação (TA) “ótima”	159
Tabela C.71 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	159
Tabela C.72 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio	160
Tabela C.73 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da dosagem ótima do Lodo acidificado	160
Tabela C.74 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	161
Tabela C.75 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (TA) “ótima” para o lodo acidificado	161
Tabela C.76 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	161
Tabela C.77 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (TR) “ótima”	162
Tabela C.78 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas	162
Tabela C.79 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (TF) “ótimo”	162
Tabela C.80 - Experimento 01 - ETE Samambaia - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação e de flotação	163
Tabela C.81- Experimento 01 - ETE Samambaia - Análise do ponto “ótimo”	163
Tabela C.82 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETE Samambaia, coletada em 07/01/2003 e utilizada no experimento 02	164
Tabela C.83 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas	164
Tabela C.84 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio	164
Tabela C.85 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação. Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado	165
Tabela C.86 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas	165
Tabela C.87 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação (TA) “ótima”	166

Tabela C.88 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.....	166
Tabela C.89 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio.....	166
Tabela C.90 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da dosagem ótima do Lodo acidificado	167
Tabela C.91 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.....	167
Tabela C.92 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (TA) “ótima” para o lodo acidificado	167
Tabela C.93 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.....	168
Tabela C.94 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (TR) “ótima”.....	168
Tabela C.95 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.....	168
Tabela C.96 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (TF) “ótimo”	169
Tabela C.97 - Experimento 02 - ETE Samambaia - Condições operacionais “ótimas” dos processos de sedimentação e de flotação.....	169
Tabela C.98 - Experimento 02 - ETE Samambaia - Eficiência dos processos de flotação e de sedimentação nas condições operacionais “ótimas”	170
Tabela C.99 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETE Samambaia, coletada em 20/01/2003 e utilizada no experimento 03	170
Tabela C.100 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas.....	171
Tabela C.101 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa do ensaio de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio.....	171
Tabela C.102 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação. Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado	172
Tabela C.103 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas.....	172
Tabela C.104 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação (TA) “ótima”.....	172
Tabela C.105 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.....	173
Tabela C.106 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio.....	173
Tabela C.107 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da dosagem ótima do Lodo acidificado.....	174
Tabela C.108 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.....	174
Tabela C.109 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (TA) “ótima” para o lodo acidificado	174
Tabela C.110 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.....	175
Tabela C.111 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (TR) “ótima”	175

Tabela C.112 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.....	175
Tabela C.113 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (TF) “ótimo”	176
Tabela C.114 - Experimento 03 - ETE Samambaia - Condições operacionais “ótimas” dos processos de sedimentação e de flotação.....	176
Tabela C.115 - Experimento 03 - ETE Samambaia – Eficiência dos processos de flotação e de sedimentação nas condições operacionais “ótimas”	177

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
art	- Artigo
A/S	- Relação ar sólido
atm	- Atmosfera
°C	- Graus centígrados
CAESB	- Companhia de Saneamento do Distrito Federal
cm	- Centímetro
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
D	- Dosagem
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
EEA/ICP	- Espectrometria de emissão atômica com plasma
ETA	- Estação de Tratamento de Água
ETE	- Estação de Tratamento de Esgotos
ETEB	- Estação de Tratamento Brasília
EUA	- Estados Unidos da América
<i>f</i>	- Fração do ar dissolvido
FAD	- Flotação por ar dissolvido
g	- Grama
G	- Gradiente de velocidade
hab	- Habitante
h	- Hora
Kg	- Kilograma
Km	- Kilometro
kPa	- KiloPascoal
L	- Litro
LETA	- Lodo de estação de tratamento de água
m	- Metro
mm	- Milímetro
m ²	- Metro quadrado
m ³	- Metro cúbico
min	- Minuto
mg	- Miligrama
ml	- Mililitro
ML	- Mistura lenta
MR	- Mistura rápida
µm	- Micrômetros
NBR	- Norma Brasileira

OAP	- Organismo armazenador de fósforo
Orto	- Ortofosfato
P	- Fósforo
<i>P</i>	- Pressão absoluta
PA	- Para análise
PAC	- Policloreto de alumínio
ppm	- Partes por milhão
P_T	- Fósforo Total
Q	- Vazão
R	- Recirculação pressurizada
RD	- Rio Descoberto
r_{xy}	- Índice de correlação entre as variáveis x e y
s^{-1}	- por segundo
S_a	- Solubilidade do ar
SS	- Sólidos em suspensão
SSF	- Sólidos em suspensão fixos
SST	- Sólidos em suspensão totais
SSV	- Sólidos em suspensão voláteis
S_x	- Desvio padrão da variável x
S_{xy}	- Co-variança entre as variáveis x e y
S_y	- Desvio padrão da variável y
T_A	- Taxa de aplicação
T_C	- Tempo de coagulação
T_F	- Tempo de floculação
T_R	- Taxa de recirculação
TKN	- Nitrogênio Total Kjeldahl
ton	- Tonelada
UHE	- Unidade Hidroelétrica
V_s	- Velocidade de sedimentação
WTP	- Water Treatment Plant
WWTP	- Wastewater Treatment Plant
\bar{x}	- Média da variável x
\bar{y}	- Média da variável y

1 - INTRODUÇÃO

A presença de fósforo nos efluentes do tratamento de esgotos pode gerar impactos ambientais significativos, principalmente nos corpos receptores mais sensíveis como lagos e represas. O fósforo é um nutriente que geralmente funciona como fator limitante para o crescimento de plantas e de microorganismos em diversos ambientes aquáticos.

O aumento da concentração de nutrientes em ambientes aquáticos, fenômeno conhecido como eutrofização, leva a um crescimento desordenado de algumas espécies com conseqüente redução do oxigênio dissolvido, morte extensiva de peixes, redução da biodiversidade aquática, aumento da incidência de florações de microalgas e cianobactérias e perda das qualidades cênicas do local.

No Distrito Federal, a preocupação com a eficiência de remoção de fósforo em diversas unidades de tratamento de esgotos deve-se ao fato de grande parte de sua área urbana estar situada na bacia do lago Paranoá. Durante a década de 70, esse lago se encontrava em adiantado processo de eutrofização, provocado principalmente pelo despejo de águas residuárias sem tratamento ou com tratamento inadequado. A reversão desse processo se deu a partir da implantação de um programa de despoluição que incluía a implantação de unidades de tratamento a nível terciário, com remoção de nutrientes, para todos os despejos no Lago.

Recentemente, com a decisão do governo de implantar a UHE Corumbá IV, as soluções para o esgotamento sanitário de toda a região oeste do Distrito Federal, incluindo as cidades Taguatinga, Ceilândia, Samambaia, Águas Claras e Gama, também deverão adotar sistemas de tratamento com remoção de fósforo, já que todas essas regiões estão situadas na bacia de drenagem do reservatório dessa barragem.

A remoção de fósforo pode dar-se por processos químicos ou biológicos. O uso do tratamento físico-químico no polimento final de efluentes do tratamento biológico de esgotos vem se tornando uma prática cada vez mais comum. Nesse contexto, a precipitação química de fósforo com adição de coagulantes inorgânicos à base de alumínio e ferro, seguida da separação das fases sólido/líquido por meio dos processos de sedimentação ou

flotação, se apresenta como uma técnica que vem sendo aplicada em países da Europa, EUA, Canadá, Escandinávia, Austrália e também aqui no Distrito Federal.

Paralelamente ao fato de coagulantes à base de alumínio serem utilizados na remoção de fósforo de efluentes domésticos, diariamente a indústria do tratamento de água gera grandes quantidades de resíduos sólidos contendo significativa parcela de alumínio. Esses resíduos, na maioria das vezes, são despejados sem qualquer tratamento nos cursos d'água, em outros casos são desidratados e dispostos em aterros sanitários. Essas práticas estão sendo cada dia mais questionadas pelos órgãos ambientais devido ao risco que a concentração de alumínio no solo e na água pode representar para a saúde pública e para o meio ambiente.

Embora a Organização Mundial de Saúde não estabeleça limites de concentração de alumínio na água com base em riscos à saúde pública, diversos estudos associam o aumento da incidência de diversas doenças neurodegenerativas, como o Mal de Alzheimer e a demência senil, à presença de alumínio nas células do sistema nervoso. Quanto aos efeitos sobre o meio ambiente, estudos científicos têm mostrado que a descarga de lodos de estações de tratamento de água - ETAs, diretamente nos corpos d'água, pode interferir de maneira negativa no ecossistema aquático (AWWA, 1987).

Na busca de alternativas para a disposição adequada para esses resíduos, diversos estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de analisar as possibilidades de aplicação para os lodos de ETAs. Diferentemente dos lodos gerados em sistemas de tratamento de esgotos, a baixa concentração de matéria orgânica e de nutrientes no lodo de ETAs torna desinteressante o seu uso na agricultura. Dentre as várias alternativas de aplicação de lodos de ETAs que estão sendo propostas ao longo dos últimos anos, destaca-se o reúso do potencial de coagulação do alumínio presente no lodo, quando aplicado nas diversas etapas do tratamento de esgotos. No caso do DF, esse uso pode se dar, em especial, no polimento final para remoção de fósforo de efluente do tratamento secundário.

O reúso do alumínio presente no lodo de ETAs pode ocorrer a partir da regeneração das formas solúveis do coagulante via tratamento químico. No entanto, os processos de regeneração de coagulantes, além de representarem um custo adicional, perdem parte do coagulante que permanece como resíduo nesse processo. Bishop *et al.* (1987) citam que, no

processo de regeneração do alumínio de lodos desidratados em leitos de secagem, apenas 75% do alumínio pode ser recuperado.

Por outro lado, o afluente ao processo de polimento final é uma solução com baixa concentração de partículas, uma vez que essa massa líquida já passou, em geral, por dois processos de clarificação, nos decantadores primário e secundário. Para que o processo de remoção por sedimentação ou flotação seja bem sucedido, é fundamental que a etapa de floculação das partículas seja eficiente. A intensidade desse processo depende das oportunidades de contato entre as partículas, o que está diretamente relacionado com o número de partículas presentes no líquido. Portanto, o maior número de partículas presentes no lodo pode ter um efeito positivo no processo de floculação, podendo levar inclusive a uma redução na dosagem de coagulante.

Em pesquisas desenvolvidas na Universidade Federal do Espírito Santo, Gonçalves *et al.* (1999) constataram que 35 a 50% dos sólidos presentes no lodo de ETAs utilizados eram hidróxidos (formas precipitadas dos coagulantes utilizados no processo de tratamento). O hidróxido de alumínio promove a floculação, por ser um floco gelatinoso que sedimenta lentamente promovendo a agregação de outras partículas a ele durante o seu percurso. Conseqüentemente, a aplicação do lodo como coagulante pode se mostrar uma estratégia viável para o reúso do alumínio, seja pelo fato de eliminar os custos relativos aos processos de recuperação de alumínio, seja pela possibilidade de reutilizar toda a capacidade de coagulação do alumínio presente no lodo ou ainda pelo fato de seu maior número de partículas interferir de maneira positiva na eficiência do processo de floculação.

Esse estudo buscou avaliar, através de ensaios em escala de laboratório, a eficiência do processo de precipitação química de fósforo utilizando o lodo de ETAs como coagulante. Avaliou-se também a eficiência dos processos de flotação e de sedimentação aplicados à separação dos flocos do tratamento químico.

O presente documento descreve o trabalho desenvolvido em seis tópicos distribuídos da seguinte maneira: 1) Introdução; 2) Objetivos; 3) Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica; 4) Metodologia; 5) Resultados e Discussão; 6) Conclusões e Recomendações.

2 - OBJETIVOS

2.1. - OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é avaliar a possibilidade de utilização do lodo gerado em unidades de tratamento de água para abastecimento, como coagulante na etapa de polimento final para remoção de fósforo de efluentes secundários do tratamento biológico de esgotos.

2.2. - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar a viabilidade técnica da aplicação do lodo desidratado de ETAs que utilizam sulfato de alumínio como coagulante, na remoção de fósforo de efluentes de duas unidades de tratamento de esgotos do Distrito Federal.

- b) Comparar a eficiência dos processos de flotação e de sedimentação quando utilizados como etapa de separação dos sólidos gerados a partir da precipitação química de efluentes do tratamento biológico de esgoto, utilizando tanto o lodo de ETA como o sulfato de alumínio como coagulante.

Para o desenvolvimento do trabalho experimental foram utilizados os efluentes de duas unidades de tratamento biológico de esgotos que apresentam efluentes com características de qualidade da água bastante distintas, principalmente no que diz respeito à concentração de fósforo, a Estação de Tratamento de Esgotos Brasília Sul - ETEB Sul e a Estação de Tratamento de Esgotos de Samambaia - ETE Samambaia.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Busca-se, neste capítulo, apresentar os aspectos teóricos que justificam a proposição do tema desse trabalho que é a aplicação do lodo gerado nos processos físico-químicos de tratamento de água como coagulante no polimento final para remoção de fósforo dos sistemas de tratamento de esgotos.

Para tanto, serão apresentadas inicialmente, as diversas etapas do tratamento de esgotos onde o uso de coagulantes pode ocorrer para então abordar, de forma mais específica, a questão do uso de coagulantes na remoção de fósforo.

Nos processos físico-químicos de remoção de fósforo, a adição de coagulantes leva a formação de flocos que podem ser removidos da massa líquida pelos processos de sedimentação, flotação ou filtração. Nesse texto, serão analisados os aspectos mais relevantes dos processos de sedimentação e de flotação que, em geral, vêm sendo adotados nas unidades de tratamento de esgotos para a remoção do fósforo por precipitado quimicamente.

A partir daí, será apresentada uma breve discussão quanto aos diversos aspectos relativos aos resíduos gerados no tratamento de água para, em seguida, abordar as alternativas de disposição final e usos desses resíduos que estão sendo cotejadas na literatura técnica, em especial, as possibilidades de aplicação desses como coagulante no tratamento de esgotos.

3.1 - O USO DE COAGULANTES NO TRATAMENTO DE ESGOTOS

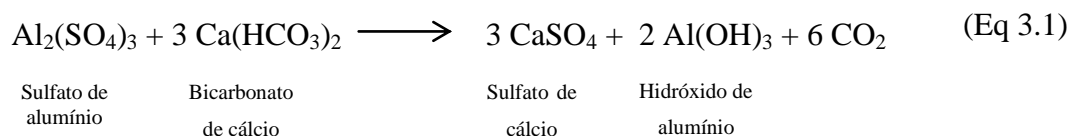
Nos processos de precipitação química de impurezas, adotados tanto nas unidades de tratamento de água como de esgoto, coagulantes são adicionados à massa líquida com o objetivo de promover a agregação de partículas, formando flocos de maiores dimensões que serão mais facilmente removidos nas unidades de separação de fases sólido/líquido.

Paralelamente ao significativo incremento na remoção de partículas que a adição de coagulantes no tratamento de água ou esgoto pode promover, o uso destes produtos está sempre associado a um substancial incremento no volume de resíduos gerados e aos custos operacionais adicionais envolvendo aquisição, armazenamento e aplicação dos produtos

químicos além das despesas com energia elétrica. Por esses motivos, nos sistemas de tratamento de esgotos, os processos químicos vêm sendo utilizados em conjunto com os processos biológicos para a remoção de contaminantes (Metcalf & Eddy, 1991)

Nos processos químicos de tratamento de água e esgotos, as substâncias tradicionalmente utilizadas como coagulante são os sais de alumínio e ferro na forma de sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato de ferro e sulfato ferroso, e ainda a cal. Essa última vem sendo cada vez menos adotada devido ao volume excessivo de resíduos gerados. Nesse trabalho será dado destaque aos aspectos relativos ao uso de sulfato de alumínio, que é o coagulante que está sendo utilizado nas unidades de tratamento de água e esgotos no Brasil e no Distrito Federal.

Nos processos químicos de remoção de impurezas da água atuam diversos mecanismos, sempre com o objetivo de agregar as partículas, tornando-as de maior dimensão e maior peso específico de modo a facilitar a sua remoção da massa líquida. Quando uma dosagem de sulfato de alumínio suficientemente alta para que haja a formação de hidróxidos, é adicionado a um efluente contendo alcalinidade de bicarbonato, ocorre a seguinte reação:



Segundo Metcalf & Eddy (1991), o hidróxido de alumínio é um floco gelatinoso que sedimenta lentamente promovendo a agregação de outras partículas a esse floco durante o seu percurso. Reações análogas podem ocorrer no caso da presença de bicarbonato de magnésio. Para águas com alcalinidade baixa, muitas vezes é necessária a adição de cal para que a reação descrita na equação 3.1 possa ocorrer.

O uso de coagulantes associado a processos biológicos de tratamento de esgotos pode ter diferentes objetivos, tais como: a) melhorar a eficiência da unidade de tratamento; b) otimizar o processo de espessamento e desidratação do lodo; c) remover fósforo.

O processo de precipitação química tem sido muito utilizado com o objetivo de melhorar a eficiência da remoção de matéria orgânica e de sólidos em suspensão nas etapas do

tratamento primário ou secundário dos sistemas biológicos de tratamento de esgotos, principalmente nos casos de variações temporárias de vazão ou de qualidade dos afluentes. Por exemplo, no Distrito Federal, a ETE Sobradinho opera atualmente pelo processo de lodos ativados com adição de coagulante no decantador primário, com objetivo de melhorar a eficiência da unidade uma vez que a população que contribui para essa unidade é, atualmente, significativamente maior que a vazão prevista inicialmente em projeto.

As taxas de remoção obtidas no tratamento primário são, em geral, da ordem de 30 a 40% para a DBO e de 50 a 70% para o caso de sólidos em suspensão, no caso da adição de coagulantes esses valores podem chegar a 70% para a DBO e 90% para os sólidos em suspensão. No decantador secundário, a adição de coagulantes pode elevar a eficiência de remoção de bactérias para até 90% (Metcalf & Eddy, 1991). O grau de remoção obtido irá depender da dosagem do produto químico adotada.

Os coagulantes também podem ser utilizados na etapa de condicionamento do lodo gerado no tratamento de esgotos com o objetivo de melhorar a eficiência dos processos de espessamento e desidratação. O condicionamento químico de lodos consiste na coagulação dos sólidos e liberação da água absorvida e pode ser utilizado na preparação do lodo para ser desidratado em sistemas naturais como lagoas ou leitos de secagem, ou em sistemas de desidratação mecânica como desidratação a vácuo, centrifugação ou filtros prensa. O item 3.5.3 apresenta uma breve discussão sobre as tecnologias disponíveis para a desidratação do lodo.

As substâncias químicas que podem ser utilizadas no condicionamento de lodos do tratamento de esgotos são os compostos de alumínio e ferro, a cal e os polímeros orgânicos. Esses últimos estão sendo cada vez mais utilizados devido aos recentes progressos no desenvolvimento e na fabricação de polímeros para o tratamento de águas residuárias e às diversas vantagens que estes apresentam em relação aos condicionadores inorgânicos. Dentre as vantagens do uso de polímeros podemos citar: menor volume de lodo gerado, redução dos problemas com operação e manutenção e o uso de polímeros não reduz a aptidão à combustão do lodo desidratado (Gonçalves *et al.*, 2001).

A dosagem de coagulante a ser adotada no condicionamento do lodo irá depender da origem do lodo, do pH, da alcalinidade e da concentração e das características dos sólidos da mistura.

O uso de coagulante para a remoção de fósforo será discutido no item que se segue.

3.2 - REMOÇÃO DE FÓSFORO EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Nos últimos anos tem-se observado uma crescente preocupação com a remoção de nutrientes nos sistemas de tratamento de esgoto, devido à possibilidade destes componentes acelerarem o processo de eutrofização, principalmente no caso de ambientes sensíveis como lagos e reservatórios.

A eutrofização de um lago é um fenômeno bastante complexo, mas que pode ser entendido como sendo o enriquecimento de suas águas provocado pelo aporte de nutrientes devido às diversas formas de ocupação e uso do solo. Esses nutrientes fertilizam a água favorecendo um crescimento exagerado de algas e de outros organismos que podem levar a situações de grave desequilíbrio ecológico, com o comprometimento de diversos usos dessa água

O fósforo e o nitrogênio são os mais importantes nutrientes presentes nos despejos domésticos. O fator limitante da maioria dos lagos tropicais da América Latina é o fósforo, (Salas e Martino, 1991 *apud* Von Sperling, 1996a). *Nutriente limitante* é aquele que, sendo essencial para determinada população, limita seu crescimento. Em baixas concentrações de nutriente limitante, o crescimento populacional é baixo. Um outro aspecto, é que existem algas com capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico e que estariam presentes no ambiente aquático, mesmo com o controle da carga de nitrogênio afluyente (Von Sperling, 1996a).

No Distrito Federal, a preocupação com a remoção de fósforo em suas unidades de tratamento deve-se ao fato de grande parte da área urbana existente estar situada na bacia de drenagem do Lago Paranoá. Este lago encontrava-se em um adiantado estado de eutrofização durante a década de 70, causado, principalmente, pelo lançamento de esgotos sem tratamento ou com tratamento inadequado em suas águas. Estudos desenvolvidos à época determinaram que o fósforo era o fator limitante de crescimento populacional nesse

lago. A reversão do processo de eutrofização está sendo alcançada com a implantação de um programa de coleta e tratamento a nível terciário de todos os efluentes que eram despejados no Lago. Fizeram parte deste programa as reformas das unidades de tratamento denominadas ETEB Norte e ETEB Sul, que passaram a adotar o sistema de lodos ativados com remoção biológica de nutrientes e remoção físico-química de fósforo, e a construção da ETE Riacho Fundo que trata seus efluentes pelo processo de lodos ativados por batelada com remoção biológica de nutrientes (Neder, 1996).

Recentemente, com a decisão dos governos do Distrito Federal e Goiás de implantar a Hidroelétrica Corumbá IV, as soluções para o esgotamento sanitário de toda a região oeste do Distrito Federal, incluindo as cidades Taguatinga, Ceilândia, Samambaia, Águas Claras e Gama, também deverão adotar sistemas de tratamento com remoção de fósforo, já que todas essas regiões estão situadas na bacia de drenagem do reservatório que será formado com a construção da futura barragem. Nessa região, encontra-se em fase final de construção as unidades denominadas ETE Melchior e ETE Gama, que irão tratar seus efluentes pelo processo de Lodos Ativados por batelada, seguido de polimento final para remoção química de fósforo.

As concentrações de fósforo nos esgotos urbanos são bastante variadas, sendo influenciadas pela presença de despejos industriais e cargas não pontuais. Nos esgotos domésticos, Sawyer *et al.* (1994) estimam uma concentração de fósforo de 2 a 3 mg/L para as formas inorgânicas e de 0,5 a 1 mg/L para as formas orgânicas, o mesmo autor adota uma contribuição diária de 1,5g de P/hab/dia.

No Distrito Federal existem registros de concentrações de fósforo total da ordem de 10 mg P/L nos efluentes domésticos, conforme apresentou Felizatto (2000) nos resultados operacionais da ETE Samambaia, realizados no período de Setembro/1996 a Setembro/2000. Esse fato pode estar associado ao baixo consumo de água naquela localidade, que é, segundo o mesmo autor, de 157 L/hab/dia, resultando em uma carga diária de 1,5g de P/hab/dia que é o limite máximo indicado por Sawyer *et al.* (1994).

No caso da ETEB Sul, que atende às localidades com maiores índices de consumo de água do Distrito Federal, chegando a mais de 500L/habitante/dia em alguns setores, a concentração de fósforo total nos efluentes domésticos, registrada no mês de outubro/2002,

foi de 7,4 mg P/L. Adotando-se um consumo médio de 350L/hab/dia, obtem-se uma contribuição *per capita* de 2,5 g P/habitante/dia.

Considerando que a contribuição de efluentes industriais para as unidades de tratamento de esgotos do Distrito Federal é insignificante, as grandes concentrações de fósforo nesses efluentes podem ter sua origem no uso indiscriminado de detergentes sintéticos contendo grande quantidade de fósforo na sua formulação. Segundo Von Sperling (1997), o uso de detergentes sintéticos pode ser responsável pela metade da carga de fósforo dos despejos domésticos. Sawyer *et al.* (1994) diz que, provavelmente, a concentração de fósforo inorgânico nos efluentes domésticos é hoje duas ou três vezes maior que antes dos detergentes sintéticos passarem a ser utilizados em grande escala. Cabe aqui, à luz da nova Lei de crimes ambientais - 9605/98, que admite o princípio do poluidor pagador, uma reflexão sobre a responsabilidade das indústrias de detergente na poluição de nossos rios e lagos e sobre a necessidade da sociedade cobrar dessas indústrias a busca de tecnologias menos poluentes.

Os compostos de fósforo presentes nos esgotos domésticos se encontram nas formas orgânicas e inorgânicas, sendo os compostos inorgânicos nas formas de ortofosfato e polifosfato os mais considerados. Para alguns efluentes industriais a parcela de fósforo orgânico também deve ser analisada. Os polifosfatos são gradualmente hidrolisados retornando à forma de ortofosfatos, essas reações ocorrem com maior intensidade para valores de pH baixos e temperaturas próximas do ponto de ebulição.

A remoção de fósforo de efluentes pode ser obtida através de processos físicos, químicos e biológicos. Aproximadamente 10% do total de fósforo presente nos despejos domésticos se encontram sob a forma de sólidos em suspensão e são removidos no decantador primário, o restante pode ser incorporado ao tecido celular dos microorganismos responsáveis pelo tratamento biológico de esgotos.

Os ortofosfatos estão diretamente disponíveis para o metabolismo celular e os polifosfatos precisam ser convertidos a ortofosfatos por mecanismos de hidrólise para que possam ser removidos por meio de tratamento biológico. Com exceção da parcela que é incorporada aos tecidos celulares dos microorganismos, a remoção de fósforo obtida nas demais etapas

dos sistemas de tratamento biológico de esgotos é mínima, uma vez que a parcela remanescente se encontra sob a forma solúvel (Metcalf & Eddy, 1991).

A Tabela 3.1 relaciona a eficiência esperada para os diversos processos de remoção de fósforo. Diante dos processos que se apresentam atualmente, é possível afirmar que os processos de remoção biológica de fósforo são os mais adequados, devido aos menores custos operacionais envolvidos e ao menor volume de lodo produzido (Kuba *et al.*, 1997). No entanto, muitas vezes o nível de remoção obtido no tratamento biológico de esgotos não é suficiente e necessita-se de um polimento químico para que o efluente se enquadre dentro dos padrões de qualidade da água exigidos para o lançamento do efluente num determinado corpo receptor.

Nos itens 3.2.1 e 3.2.2 são abordados os fundamentos dos principais processos de remoção de fósforo.

Tabela 3.1 - Eficiência esperada para os diversos processos de remoção de fósforo (Metcalf & Eddy, 1991- adaptada).

Processos	Remoção de fósforo esperada (%)
Tratamentos convencionais	
Primário	10 a 20
Lodos Ativados	10 a 25
Filtro Biológico	8 a 12
Biodisco	8 a 12
Remoção biológica de fósforo	70 a 90
Remoção biológica combinada de fósforo e nitrogênio	70 a 90
Remoção Química	
Precipitação com sais metálicos	70 a 90
Precipitação com cal	70 a 90
Remoção por processos físicos	
Filtração	20 a 50
Osmose Reversa	90 a 100
Adsorção em carbono	10 a 30

3.2.1 - Processos Biológicos

Segundo Kuba *et al.* (1997), quase todos os processos de remoção biológica de fósforo propostos nas últimas décadas baseiam-se em arranjos de zonas anaeróbias e aeróbias, por onde circulam os efluentes contendo grande concentração de microorganismos. A remoção biológica de fósforo envolve diversos organismos, muitos deles de taxonomia ainda desconhecida, que estão sendo objeto de pesquisas.

No trabalho ora apresentado, o processo de remoção biológica de fósforo será abordado de maneira simplificada, limitando-se apenas a justificar a necessidade da alternância de estágios aeróbios e anaeróbios no processo.

A *zona anaeróbia* é considerada um seletor biológico para os microorganismos armazenadores de fósforo (OAP). Essa zona propicia uma vantagem competitiva para os OAPs, já que, sob condições anaeróbias, esses organismos conseguem assimilar o substrato antes de outros microorganismos. Dentre os OAPs podemos destacar a *Acinetobacter*. Ainda na zona anaeróbia, o estresse bacteriano promove a liberação de fósforo das células para o meio líquido (Von Sperling, 1997).

Na *zona aeróbia* corre a oxidação dos produtos armazenados pelos OAPs na zona anaeróbia e o armazenamento de polifosfato nas células desses organismos é acelerado (Sedlak, 1991 *apud* Von Sperling, 1997). O fósforo incorporado às células sedimenta e é removido do processo junto com o lodo em excesso que é descartado.

A remoção de fósforo nos sistemas de tratamento de esgotos, normalmente ocorre combinada com a remoção de nitrogênio pelo processo de *nitrificação e desnitrificação*. Para isto, uma zona anóxica é introduzida entre as zonas anaeróbias e aeróbias onde ocorre a desnitrificação. Nas zonas anóxicas, o oxigênio disponível para o metabolismo bacteriano se encontra combinado com o nitrogênio na forma de nitrato (NO₃).

Dois grupos de bactérias são responsáveis pelo processo de nitrificação, as Nitrossomonas e as Nitrobactérias. As Nitrossomonas transformam a amônia presente no esgoto bruto em nitrito e as Nitrobactérias são responsáveis pela conversão do nitrito em nitrato. Essas bactérias são extremamente sensíveis às variações de pH e à presença de diversos agentes

inibidores, por isso a eficiência dos processos de nitrificação exige um controle rigoroso. A remoção do nitrogênio na forma de nitrato ocorre durante o processo de desnitrificação, onde o nitrato é convertido em nitrogênio gasoso e é liberado para a atmosfera. A nitrificação só ocorre na presença de oxigênio dissolvido, enquanto que a desnitrificação ocorre em condições anóxicas (Metcalf & Eddy, 1991).

3.2.2 - Processos Químicos

A remoção química de fósforo em sistemas de tratamento de esgotos é um processo largamente utilizado na Europa, EUA, Canadá e Escandinávia, e que vem sendo cada vez mais adotado na Austrália (Thomas *et al.*, 1996).

Os coagulantes mais utilizados na remoção de fósforo são os sais metálicos de alumínio e ferro. Os polímeros podem ser utilizados como auxiliares de coagulação e o uso da cal tem sido cada vez mais restrito devido ao maior volume de lodo gerado e aos problemas operacionais relativos ao transporte, armazenamento e preparo da cal.

Quando sais de alumínio ou de ferro são adicionados ao esgoto eles reagem com o ortofosfato produzindo um precipitado. O fósforo orgânico e o polifosfato são removidos através de reações mais complexas e pelo processo de adsorção.

Metcalf & Eddy (1991) classifica os processos de precipitação química do fósforo em três grupos:

Pré-precipitação: Quando o coagulante é adicionado antes do tratamento primário, e o fósforo é removido junto com o lodo do decantador primário.

Co-precipitação: O coagulante é adicionado ao efluente do reator biológico, o fósforo precipita junto com a biomassa no decantador secundário.

Pós-precipitação: O coagulante é adicionado ao efluente do decantador secundário e o fósforo é removido na unidade de polimento final, o decantador ou flotador terciário.

A dosagem de coagulante utilizada no processo irá depender da concentração de fósforo no afluente e da eficiência de remoção desejada. Outros fatores como pH, alcalinidade, e interferências de outras substâncias também devem ser consideradas. Devido às diversas variáveis existentes no processo é impossível definir a dosagem ótima de coagulante baseado em cálculos estequiométricos. Para isso são utilizados ensaios em escala de laboratório, em escala piloto, ou em escala real.

Thomas *et al.* (1996) desenvolveram estudos com o objetivo de avaliar a eficiência do processo de co-precipitação de fósforo aplicado a uma estação de tratamento de esgotos pelo processo de lodos ativados, utilizando sais de alumínio e ferro. Para isso foram realizados ensaios de laboratório, utilizando-se equipamento de “Jartest”, ensaios em unidades piloto e ainda ensaios em escala real. Os resultados mostraram que, na unidade de tratamento analisada, para dosagens de 1 a 2 mg Al/L, a co-precipitação do fósforo produziu efluentes finais com concentração de ortofosfato abaixo de 0,01 mg P/L e fósforo total em torno de 0,5 mg P/L. Antes da adição de coagulantes, as concentrações de ortofosfato e de fósforo total dos efluentes da ETE chegavam a 3 e 4 mg de P/L respectivamente. Nesse estudo, no entanto, não foi feita nenhuma referência ao incremento do volume de lodo gerado na ETE após a introdução do tratamento químico, esse pode ser um aspecto negativo da co-precipitação.

Pinto Filho (1999), em estudos em escala de laboratório, avaliou a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido aplicado à separação dos flocos gerados na pós-precipitação de fósforo com sulfato de alumínio. Nesse estudo foram avaliados os efluentes de estação de Lodos Ativados com remoção biológica de fósforo, reator UASB e de Lagoa de Alta Taxa. Os resultados desse estudo indicam eficiências de remoção de ortofosfato superiores a 90% para o efluente secundário da estação de Lodos Ativados e superior a 99% para os demais casos.

O efluente de sistemas de lagoas, além da grande concentração de fósforo e de nitrogênio, apresenta, também, altas concentrações de SS, que são compostos principalmente de algas. Mara (1995, apud Von Sperling, 1996a) indica que 60% dos SS do efluente de lagoas facultativas é formado por algas.

Essa grande concentração de SS nos efluentes de lagoas impõe serias restrições ao potencial de reutilização desses efluentes (Queiroz, 2001). Não se pode, portanto, falar em pós-tratamento de efluentes de lagoas para remoção de fósforo, sem avaliar-se o potencial desse processo na remoção de algas.

Os processos de precipitação química, avaliados ao longo desse trabalho para a remoção de fósforo, também constituem alternativas de eficiência já comprovada, para a remoção de algas de efluentes de lagoas. Rocha *et al.* (1998), desenvolveram ensaios de sedimentação em escala de laboratório, onde diversos tipos de coagulantes foram aplicados no processo de remoção de algas de efluentes de lagoas, dentre eles o lodo regenerado de ETAs sendo utilizado em conjunto com policloreto. Nesses estudos, utilizando 60 mg/L de lodo regenerado e 40 mg/L de policloreto, Rocha *et al.* (1998), alcançaram valores de SS abaixo de 30 mg/L.

Nos estudos desenvolvidos por Pinto Filho (1999), em ensaios de flotação em escala de laboratório, para dosagens de sulfato de alumínio variando entre 12,6 e 18,9mgAl/L, aplicados à pós-precipitação de efluentes de Lagoa de Alta Taxa, obteve-se uma remoção de clorofila a equivalente a 96%.

Por esse motivo, nos ensaios desenvolvidos no presente trabalho envolvendo efluentes de lagoas, além do comportamento do fósforo, foi avaliado o comportamento da clorofila a, parâmetro adotado para representar a concentração de algas.

3.3 - FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO

A sedimentação é a operação física de separação de partículas sólidas com densidade superior à do líquido circundante. Em um tanque onde a velocidade do escoamento de água é baixa, as partículas tendem a ir para o fundo sob a influência da gravidade (Von Sperling, 1996b).

Nos sistemas de tratamento de água e esgoto, as unidades dimensionadas para operar por sedimentação são os decantadores, caixas de areia, adensadores e lagoas de sedimentação, no entanto o processo de sedimentação ocorre, em menor escala, em diversas outras unidades do tratamento.

Os decantadores podem ser retangulares de fluxo horizontal, ou circulares com alimentação central. Os primeiros são mais utilizados no tratamento de água e os últimos são de aplicação mais freqüente nos processos de tratamento de esgoto e de adensamento de lodo.

De acordo com a concentração de sólidos em suspensão no líquido a ser clarificado e com a tendência dessas partículas de se agregarem, o processo de sedimentação pode ser classificado em quatro tipos (Metcalf & Eddy, 1991):

A) Sedimentação discreta: As partículas conservam suas características de forma, tamanho e densidade durante toda a sua trajetória, não ocorre aglutinação de partículas durante o processo de sedimentação o que torna a velocidade de sedimentação da partícula constante. Este tipo de sedimentação só ocorre nas caixas de areia.

B) Sedimentação Floculenta: Nesse caso ocorre a aglutinação das partículas durante o seu trajeto provocando a variação da velocidade de sedimentação. É o que ocorre nos decantadores do tratamento de água e, no caso de tratamento de esgotos, nos decantadores primários, na parte superior dos decantadores secundários e nos decantadores do processo de polimento final.

C) Sedimentação Zonal: Ocorre no caso de grande concentração de partículas, quando é possível observar uma nítida interface entre as fases líquida e sólida durante a trajetória das partículas no processo de sedimentação. Esse tipo de sedimentação também é conhecido como sedimentação de manta de lodo. Nesse caso a velocidade de sedimentação adotada é a velocidade de sedimentação da interface. Esse tipo de sedimentação ocorre nos decantadores secundários do tratamento de esgotos.

D) Sedimentação por compressão: Quando a concentração de sólidos é ainda maior o acúmulo de partículas no fundo dos decantadores começa a provocar a compressão da estrutura das partículas provocando a remoção de parte da água incorporada ao floco. É o que ocorre no fundo dos decantadores secundários e nos adensadores por gravidade.

Durante as operações de sedimentação é comum ocorrer mais de um tipo de sedimentação simultaneamente, entretanto para cada situação é possível identificar aquele que é predominante. Nesse estudo optou-se por abordar apenas os fundamentos do processo de sedimentação flocculenta, que é o processo predominante no caso dos decantadores utilizados na remoção de flocos do tratamento químico de esgotos, objeto desse trabalho. Nesses decantadores, como mencionado, a flocculação ocorre ao longo do processo de sedimentação, alterando as características de sedimentação iniciais dessas partículas.

O principal parâmetro de projeto de unidades de sedimentação é a taxa de aplicação superficial, ou velocidade de sedimentação (V_s) da partícula flocculenta, que corresponde à vazão por unidade de área superficial do tanque de sedimentação. Segundo Metcalf & Eddy (1991), no caso da remoção de flocos formados a partir da adição de sais de alumínio ou ferro, recomenda-se que a taxa de aplicação adotada em projetos de decantadores esteja compreendida entre 24 e 48m³/m²/dia.

Ao contrário do que ocorre no caso de sedimentação de partículas discretas, no processo de sedimentação flocculenta a profundidade do tanque e o tempo de sedimentação interfere diretamente na eficiência do processo, uma vez que afetam as características da partícula flocculada e, portanto, a velocidade de sedimentação dessas partículas.

A intensidade do processo de flocculação irá depender das oportunidades de contato entre essas partículas, que é função da vazão, da profundidade da unidade, do gradiente de velocidade, da concentração de partículas e do tamanho médio dessas partículas. O efeito da interação dessas variáveis no processo de sedimentação é obtido preferencialmente por meio de ensaios de laboratório em colunas de sedimentação.

As colunas de sedimentação podem ser de diâmetro variável mas devem ter a altura igual à profundidade do tanque de sedimentação. Para Metcalf e Eddy (1991), resultados satisfatórios são obtidos em colunas com 150mm de diâmetro e 3m de altura.

As colunas de sedimentação devem ser dotadas de agitadores, que têm a função de dispersar o coagulante no meio líquido além de promover a flocculação. É recomendável que a temperatura seja mantida constante ao longo do ensaio para impedir a formação de correntes convectivas (Metcalf & Eddy, 1991). A coluna deverá ser dotada de vários

pontos de amostragem, de onde serão coletadas amostras em diferentes intervalos de tempo. Para cada amostra será feito o ensaio para determinação da concentração de sólidos em suspensão. Os resultados serão apresentados na forma de curvas de isoefficiência, mostrando a percentagem de remoção de partículas em determinada profundidade e tempo.

Camp (1946, *apud* Di Bernardo, 1993) propõe uma metodologia simplificada para os ensaios de sedimentação, onde são utilizados equipamentos de teste de jarros. Esse equipamento, muito utilizado no controle operacional de unidades de tratamento físico-químico de água, consiste em seis agitadores de velocidade variável que operam em paralelo e seis recipientes dotados de dispositivos para coleta de amostras, localizado a cerca de 7 cm abaixo do nível da água.

Nos ensaios de sedimentação utilizando o equipamento de “Jartest” deve-se encher os recipientes com a amostra a ser analisada, adicionar o coagulante e acionar os agitadores de modo a simular o tempo e o gradiente de velocidade da mistura rápida, em seguida reduzir o gradiente para o da etapa de mistura lenta e, após o período de floculação, desligar os agitadores e coletar as amostras em diferentes tempos de sedimentação. A partir da análise das características das amostras também é possível traçar as curvas de isoefficiência.

Recentemente, Clark e Stephenson (1999) desenvolveram uma metodologia para a utilização de ensaios de “Jartest” na otimização dos parâmetros operacionais de coprecipitação química de fósforo em sistemas de tratamento de esgotos pelo processo de lodos ativados. Segundo a metodologia proposta pelos autores, a despeito da heterogeneidade dos efluentes do tratamento biológico foi possível alcançar uma condição ótima para os principais parâmetros do processo de precipitação química de fósforo a partir dos resultados de apenas vinte ensaios de “Jartest”. Para fazer a análise dos dados obtidos foi utilizado um modelo estatístico.

Ao longo desse texto estão descritos outros estudos recentes, desenvolvidos para a avaliação da eficiência dos processos de precipitação química de contaminantes em águas residuárias, onde os ensaios de “Jartest” também foram utilizados na simulação dos processos de coagulação, flotação e sedimentação.

3.4 - FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE FLOTAÇÃO

Os fundamentos teóricos sobre o processo de flotação apresentados no presente trabalho basearam-se nos textos de Lacerda (1997) e Pinto Filho (1999), exceto nos casos em que são citadas referências específicas.

A flotação é um processo físico, no qual as partículas suspensas em meio líquido apresentam movimento ascendente, devido à aderência de bolhas de ar às mesmas, tornando-as de menor massa específica que o meio onde se encontram. Essa menor densidade leva ao aumento da força de empuxo do aglomerado, que flutua até a superfície da massa líquida, onde se acumula na forma de um lodo flotado a ser removido.

Segundo Di Bernardo (1993), o contato entre as bolhas de ar e as partículas resultam dos seguintes mecanismos: a) colisão da bolha com a partícula devido à turbulência ou a atração entre ambas; b) aprisionamento das bolhas de ar nos flocos ou contato entre flocos sedimentados e bolhas de ar em ascensão; c) crescimento das bolhas de ar entre os flocos.

Para garantir a eficácia desses mecanismos, fatores como tamanho da bolha formada e a capacidade de aderência entre partícula e bolha, são parâmetros importantes do processo. O tamanho e as características da bolha estão relacionados com a técnica utilizada no processo de formação dessas bolhas. De acordo com essa técnica, podemos classificar os processos de flotação em três grupos que estão descritos na seção seguinte.

3.4.1 - Variantes do processo de flotação

De acordo com a técnica utilizada na formação de bolhas, podemos destacar três variantes do processo de flotação:

a) Flotação por ar disperso ou induzido: A formação de bolhas ocorre a partir de forte agitação da massa líquida, obtida usualmente através de rotores que promovem, simultaneamente, a dispersão e a aeração da massa líquida. Agentes tensoativos e escumantes são utilizados no processo, o primeiro devido às suas características hidrofóbicas que facilitam a agregação das partículas às bolhas de ar e o último para promover a redução das bolhas e produzir uma espuma mais estável.

A flotação por ar disperso é muito utilizada nos processos de extração de metais, no entanto apresenta inúmeras desvantagens nos processos de tratamento de água e de esgotos. As principais desvantagens são: o alto grau de turbulência empregado no processo provoca a quebra dos flocos formados; o excessivo tamanho das bolhas; a baixa concentração de sólidos totais no lodo flotado e, para o caso de tratamento de águas para abastecimento, a contaminação causada pela adição de agentes tensoativos e escumantes.

b) Flotação Eletrolítica ou Eletroflotação: No processo de eletroflotação, dois eletrodos são introduzidos em meio aquoso, produzindo um campo de corrente de baixa voltagem que leva a formação de bolhas de hidrogênio e oxigênio a partir da quebra das moléculas de água. Esse processo mais indicado para a remoção de flocos frágeis e de baixa densidade, uma vez que produz bolhas de pequeno diâmetro (em torno de 30 μ m) e provoca pouca turbulência.

As desvantagens dos processos eletrolíticos são os custos operacionais com energia elétrica, que é agravado pelo fato da água e do esgoto apresentarem baixa condutividade e por isso exigirem maiores consumos de energia elétrica, e os custos com limpeza e reposição freqüente dos eletrodos. No caso de tratamento de água para abastecimento existe ainda o risco de contaminação por metais oriundos da dissolução dos eletrodos.

c) Flotação por ar dissolvido - FAD: A formação de bolhas ocorre devido à redução da pressão a que está submetida a água saturada com ar. O diâmetro das bolhas geradas pode variar de 40 a 100 μ m. A forma como é feita a redução da pressão a que está submetida a água leva a classificação de três tipos de flotação por ar dissolvido: a flotação à vácuo, a microflotação e a flotação sob pressão.

A *flotação a vácuo* é um processo intermitente onde uma determinada massa líquida saturada de ar está inicialmente submetida à pressão atmosférica e em seguida é conduzida a uma câmara com pressão negativa, com essa redução de pressão ocorre a formação de microbolhas. Na *microflotação* o líquido é conduzido até o fundo de um poço com cerca de 10m de profundidade onde é injetado ar até a concentração de saturação. À medida que o líquido flui para a superfície, microbolhas de ar vão se desprendendo da massa líquida devido a despressurização gradativa que ocorre ao longo do percurso.

Na *flotação sob pressão* a massa líquida é saturada com ar em uma câmara de pressurização e, posteriormente, é encaminhada para a outra câmara a pressão atmosférica, onde ocorre a formação das microbolhas. A flotação por ar dissolvido sob pressão é o processo mais utilizado no tratamento de água e esgoto e será discutido no próximo item. Nos processos de microflotação e de flotação a vácuo a variação de pressão fica limitada a uma atmosfera o que se apresenta como a maior desvantagem de ambos os processos.

3.4.2 - FAD por pressurização

Como foi descrito anteriormente, no processo de FAD por pressurização, uma corrente líquida é encaminhada a uma câmara de pressurização, onde, sob pressão superior a atmosférica, é promovida a dissolução do oxigênio na massa líquida. Quanto maior a pressão no interior da câmara de saturação, maior será a quantidade de ar que será dissolvida na água. Quando essa massa líquida saturada com ar é encaminhada para outra câmara que se encontra sob a pressão atmosférica, ocorre a despressurização, nesse processo ocorre liberação de microbolhas de ar.

Existem três tipos de FAD por pressurização: a) com pressurização total do afluente ao tanque de flotação; b) com pressurização parcial do afluente; c) com pressurização parcial do efluente, que é recirculado para a unidade de FAD. Esse último, apresentado na Figura 3.1, é o mais recomendado tanto para o tratamento de águas para abastecimento como de águas residuárias.

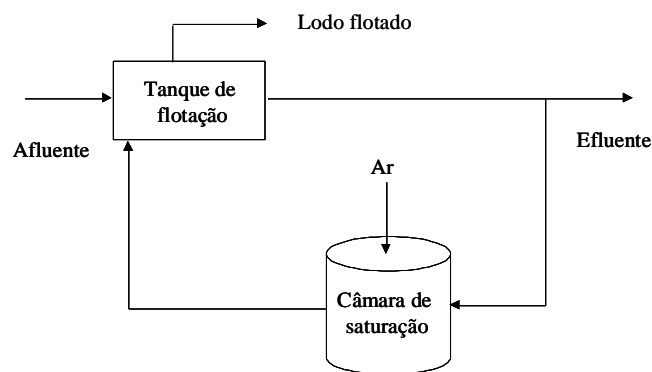


Figura 3.1 - Esquema de FAD com pressurização de parte do efluente recirculado.

No sistema FAD, apresentado na Figura 3.1, parte do efluente clarificado é recirculado para uma câmara pressurizada, onde a água é saturada de ar, retornando para o tanque de flotação, onde a redução de pressão promove a liberação de microbolhas de ar.

A entrada do afluente é feita pelo fundo do tanque de flotação onde ocorre a mistura desse efluente a ser clarificado com a vazão de recirculação. Imediatamente antes desse ponto de mistura, a água da recirculação é despressurizada bruscamente a partir de dispositivos tipo registro de agulha ou bocais especiais, provocando o aparecimento de grande quantidade de microbolhas de ar na água. O lodo é então acumulado na superfície do flotor de onde é removido por meio de raspadores superficiais. No fundo da unidade, normalmente é previsto um volume para armazenamento da parcela de sólidos que por ventura venha a sedimentar (Reali *et al.*, 1999).

A maior vantagem desse processo para o tratamento de água e esgoto está na redução da quebra dos flocos já formados nos processos de coagulação e floculação que precedem as unidades de FAD, uma vez que, nesse caso, o líquido pressurizado é o efluente clarificado no qual, teoricamente, os flocos já foram removidos. A pressurização parcial dos efluentes também implica na utilização de equipamentos de menor porte, tornando a implantação e a operação do processo menos onerosa.

Fazendo-se uma análise comparativa entre os processos de sedimentação e flotação, a FAD apresenta maiores custos operacionais que a sedimentação, principalmente, no que diz respeito ao consumo de energia elétrica, contudo, várias vantagens da FAD destacam-se no caso de separação de partículas de baixa densidade, dentre elas: a) o processo de FAD emprega altas taxas de aplicação superficial, reduzindo as dimensões das unidades de flotação, o que implica na redução de custos de implantação; b) o fato de não haver necessidade de formação de flocos grandes, implica tanto na redução do tempo de floculação quanto no menor consumo de coagulantes e polieletrólitos; c) menores custos operacionais também podem ser obtidos com a disposição do lodo flotado, uma vez que este é mais concentrado; d) no processo de FAD também ocorre remoção de compostos orgânicos voláteis, devido à introdução de ar que ocorre no processo.

3.4.3 - Parâmetros de projeto

Os principais parâmetros de projeto do processo de FAD, são:

Taxa de aplicação superficial: Também conhecida como taxa de carregamento hidráulico ou velocidade de flotação dos sólidos, a taxa de aplicação superficial representa a vazão de líquido por área de unidade de flotação ($m^3/m^2/s$). A definição da taxa de aplicação a ser adotada irá depender da concentração de sólidos da mistura e do grau de remoção desejado.

Pressão de saturação: É a pressão que ocorre na câmara de saturação.

Taxa de recirculação: Representa a parcela do efluente que é recirculada no processo.

Razão ar/sólido: Este é o principal parâmetro para o dimensionamento de unidades de flotação e está diretamente relacionado com a eficiência do processo. É definido como a massa de ar liberada no tanque de flotação por unidade de tempo, dividido pela massa de sólidos introduzida nesse mesmo tanque, por unidade de tempo. É possível variar essa relação alterando a pressão no interior da câmara de saturação e/ou a taxa de recirculação. Em sistemas de FAD com pressurização da recirculação, a relação ar/sólido (A/S) em mg/mg, é dada por:

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3S_a(f \cdot P - 1)R}{S_s \cdot Q} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Onde: S_a = solubilidade do ar (ml/L); f = fração do ar dissolvido à pressão P ; P = pressão absoluta (atm); S_s = sólidos em suspensão (mg/L); R = recirculação pressurizada (m^3/dia); Q = vazão do líquido afluente (m^3/dia).

O fator 1,3 refere-se ao peso, em mg, equivalente a 1ml de ar, e o termo -1 que aparece entre parênteses, se aplica para os casos em que o sistema é operado sob condições atmosféricas. A solubilidade do ar é função da temperatura, para temperaturas de 20° , $S_a = 18,7\text{ml/L}$ e para temperatura de 30° , $S_a = 15,7\text{ ml/L}$. O fator f adotado em geral é de 0,5.

A Tabela 3.2 apresenta os valores dos principais parâmetros de projeto da FAD recomendados por diversos autores para o tanque de flotação no processo de FAD aplicado a sistemas de tratamento de esgotos.

Tabela 3.2 - Parâmetros de projeto recomendados por diversos autores para o tanque de flotação no caso de FAD aplicado ao tratamento de águas residuárias

Autores	Aplicação	TAS (m ³ /m ² /h)	P (kPa)	A/S	T _R (%)
Metcalf & Eddy (1991)	Projeto em escala real	0,48 a 9,6	-	-	-
Van Vuuren <i>et al.</i> (1985, apud Offringa, 1995)	Unidade piloto	7,5 a 10,4	-	0,04 a 0,12	5 a 10
Ødegaard (1995)	Projeto em escala real	5 a 7	300 a 600	-	6 a 10
Ødegaard (1995)	Unidade piloto	4 a 10	500	-	15 a 20
Projeto da ETEB Sul - Brasília	Projeto em escala real	6 a 9	700	-	10
Pinto Filho	Ensaio de laboratório	8 a 16,2	500	-	10 a 20
Reali <i>et al.</i> (1999)	Projeto em escala real	-	400 a 600	-	-
Offringa (1995)	Projeto em escala real	-	350 a 450	-	10

A eficiência dos processos de flotação depende das características das partículas de impureza a serem removidas e também de aspectos relativos às bolhas de ar formadas no processo de despressurização. Esses, são fatores de difícil controle e mensuração o que torna complexa a definição dos parâmetros de projeto por critérios analíticos. Por isso, é comum a determinação dos parâmetros de projeto da FAD e das etapas de pré-tratamento do processo por meio de ensaios em escala de laboratório ou em unidades piloto.

Experimentos em escala de laboratório desenvolvidos por Pinto Filho (1999) com o objetivo de avaliar o potencial da FAD como pós-tratamento de efluentes de diferentes sistemas de tratamento de esgotos do Distrito Federal, definiram as faixas ótimas de trabalho de alguns parâmetros do processo de FAD, incluindo os parâmetros das etapas do pré-tratamento. Os resultados obtidos nesses experimentos estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Faixas ótimas de desempenho dos principais parâmetros operacionais do processo de FAD aplicado ao polimento final de efluentes secundários de ETE.

(Pinto Filho, 1999 - adaptado)

Parâmetros	Efluente secundário do processo de Lodos Ativados	Efluente de reator UASB	Efluente de Lagoa de Alta Taxa
SS afluente	40 mg/L	62 mg/L	260 mg/L
ortofosfato afluente	0,15 a 0,75 mg P/L	9 a 11 mg P/L	3 a 5 mg P/L
Remoção de ortofosfato	Acima de 90%	99%	99%
Clorofila-a afluente	-	-	2400-3950 g/L
Remoção de clorofila-a	-	-	96%
Dosagem de coagulante	3,9 a 5,5mg Al/L	9,5 a 14,2mg Al/L	12,6 a 18,9mg Al/L
Tempo de Floculação	15 min	10 min	10 min
Taxa de Aplicação	Até 389 m ³ /m ² .dia ⁻¹	Até 194m ³ /m ² .dia ⁻¹	Até 389 m ³ /m ² .dia ⁻¹
Taxa de Recirculação	10 a 20%	10 a 20%	10 a 20%
Pressão de saturação	500 kPa	500 kPa	500 kPa
Relação ar/sólido	0,137	0,088	0,020

Legenda: SS: sólidos em suspensão

Van Vuuren *et al.* (1995, *apud* Offringa, 1995), em experimentos em escala piloto, testaram a FAD no processo de remoção de fósforo de efluentes do tratamento secundário de esgotos e obtiveram bons resultados operando com os parâmetros de projeto variando conforme descrição na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Variação dos parâmetros de projeto da FAD, adotados em unidades piloto de remoção de fósforo de efluentes secundário do tratamento de esgotos.

(Van Vuuren *et al.* 1985, *apud* Offringa, 1995 - adaptada)

Parâmetros	Unidade	Faixa de variação
Fósforo total afluente	mg P/L	3 a 5
Remoção de fósforo obtida	%	85 a 94
Dosagem de coagulante	mg Al/L	6,3 a 15,8
Taxa de Aplicação	m ³ /m ² .dia ⁻¹	130 a 250
Taxa de Recirculação	%	5 a 10%
Relação Ar/Sólido	mg/mg	0,04 a 0,12

Analisando-se os resultados apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4 observa-se que Pinto Filho (1999) alcançou eficiências de remoção de ortofosfato superiores a 90% operando com a FAD com taxas de aplicação superficial de até $389 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$, enquanto VanVuuren *et al.* (1985, *apud* Offringa, 1995) utilizaram taxa de aplicação máxima de $250 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$. Esse fato pode ter sido compensado pelas taxas de recirculação adotadas por Pinto Filho (1999) que foram superiores às aquelas adotadas por VanVuuren *et al.* (1985, *apud* Offringa, 1995).

Nos resultados apresentados pelos dois autores, nota-se que a relação ar/sólido aumenta para afluentes com menor concentração de sólidos e a eficiência de remoção de fósforo diminui para concentrações menores de fósforo no afluente. Essas variações eram esperadas uma vez que quanto menor o número de partículas na água menores são as chances de colisão entre as partículas e as microbolhas de ar que promovem a flotação.

3.5 - RESÍDUOS SÓLIDOS DO TRATAMENTO DE ÁGUA

Os processos de tratamento de água geram uma grande variedade de resíduos, incluindo compostos orgânicos e inorgânicos, nas formas líquidas, sólidas e gasosas. De acordo com a NBR-10.004 (ABNT, 1989) os lodos gerados em decantadores são classificados como resíduos sólidos e, portanto, não podem ser lançados nas redes coletoras de esgotos e nem tão pouco despejados nos cursos d'água. Ainda de acordo com a NBR 10.004, os resíduos de ETAs podem ser classificados como classe I - Resíduos perigosos ou classe II - Resíduos inertes, dependendo, principalmente, da concentração de alumínio e ferro nesses resíduos.

No Brasil, do ponto de vista de pesquisa, a maior preocupação tem sido com os resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos - ETEs e pouco se tem discutido sobre os lodos gerados nas Estações de Tratamento de Água - ETAs que, na sua maioria, lançam tais resíduos nos cursos d'água, ferindo a Lei 6938/81 que estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente (Cordeiro, 1999). Segundo o art 3º dessa lei, será enquadrado como poluidor aquele que provocar a degradação da qualidade do meio ambiente, afetando condições estéticas e lançando materiais em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

A composição dos lodos das ETAs varia de acordo com a qualidade da água tratada, com os processos envolvidos, e com os produtos químicos utilizados no tratamento. No Brasil, a tecnologia mais utilizada para o tratamento de água para abastecimento, é a que envolve as etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração rápida, além da desinfecção. Esses sistemas, em geral, são denominados pela literatura nacional de unidades de tratamento convencional ou de ciclo completo.

Os itens 3.5.1 a 3.5.4 apresentam informações gerais sobre a origem e a caracterização dos resíduos gerados no processo de tratamento convencional de água e também sobre as tecnologias disponíveis para o tratamento e a disposição final desses resíduos.

3.5.1 - Origem e caracterização dos resíduos sólidos de ETAs

A Figura 3.2 apresenta as principais etapas do tratamento convencional de água para fins de abastecimento incluindo as fases do tratamento dos resíduos gerados no processo.

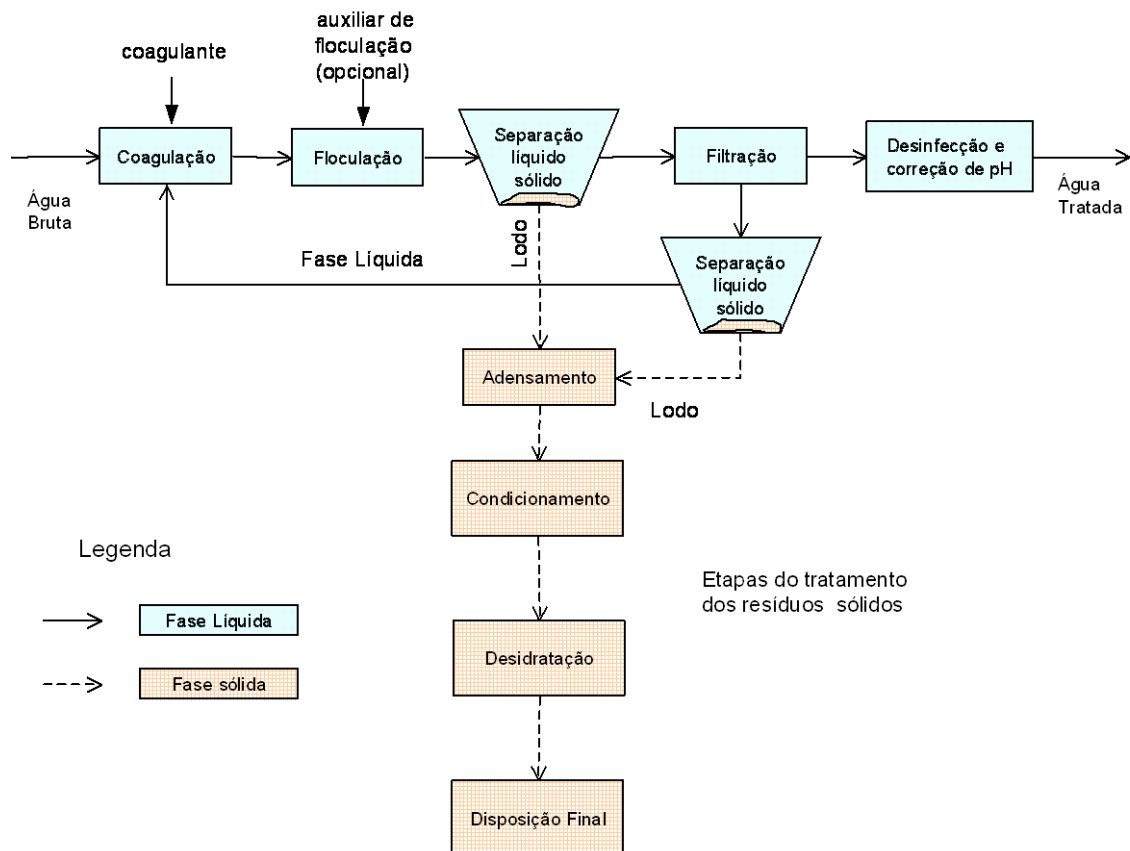


Figura 3.2 - Etapas do Tratamento de água pelo processo de tratamento convencional, incluindo as etapas do tratamento dos resíduos sólidos.

As estações de tratamento convencional são tradicionalmente utilizadas para remover turbidez e organismos patogênicos, mas também podem ser utilizados na remoção de cor, sabor e odor de águas para abastecimento (ASCE, 1996).

O tamanho das partículas de impureza presentes na água, podem variar de 10^{-10} m (1 Angstrom), para as partículas dissolvidas, até 10^{-4} m (100µm) para as partículas em suspensão. A sedimentação por gravidade, que geralmente acompanha os processos de remoção dessas partículas, pode ocorrer em um período de poucos minutos, para as partículas maiores, podendo levar anos no caso das partículas dissolvidas. Para viabilizar a remoção das partículas menores pelo processo de sedimentação, é necessário agregação de diversas partículas formando flocos maiores. Esse processo de agregação é denominado de *coagulação/floculação* (Weber Jr, 1972).

Nos processos de remoção físico-química de impurezas, a formação de flocos inicia-se com os processos de desestabilização iônica das partículas. Sabe-se que as partículas coloidais, substâncias húmicas e microorganismos em geral, apresentam-se com carga negativa na água, impedindo a aproximação das mesmas (Di Bernardo, 1993). A adição de íons de carga contrária altera esta condição de repulsão entre as partículas, permitindo a aglutinação das mesmas. Os *sais de ferro* (Fe^{+3}) e *de alumínio* (Al^{+3}) são os coagulantes utilizados com maior frequência nos sistemas de tratamento de água, por outro lado, cresce o interesse pela aplicação dos policloreto de alumínio - PACs, que são coagulantes pré-hidrolisados que apresentam algumas vantagens sobre o sulfato de alumínio, incluindo a redução do volume de lodo gerado e das concentrações de alumínio residual na água tratada (Gregory e Dupont, 2001). O processo de coagulação ocorre nas unidades de *mistura rápida* onde é promovida a dispersão rápida e homogênea do coagulante.

Após a desestabilização das partículas é necessário promover o transporte e a colisão das mesmas para a formação dos flocos. Esse processo, conhecido como *floculação*, ocorre nas unidades de *mistura lenta* ou flocladores. Nessas unidades, dispositivos mecânicos ou hidráulicos promovem um movimento errático que favorece a colisão das partículas. Esse movimento deve ser controlado para não provocar a quebra dos flocos que já se formaram. É freqüente o uso de *polímeros* como auxiliares de floculação. Os polímeros são compostos orgânicos de cadeia longa que favorecem a formação de flocos mais resistentes.

Após a formação do floco é necessária a separação das fases líquida e sólida, o que pode ocorrer pelos processos de sedimentação ou de flotação, conforme já mencionado.

A *filtração rápida* é o processo final de remoção de material em suspensão no tratamento convencional. Nesse processo o líquido é forçado a passar através de um meio poroso onde as partículas de impureza ficam retidas devido à ação de diversos mecanismos de transporte e aderência. Após algum tempo de operação é necessário promover a lavagem dos filtros. Essa lavagem pode ser feita com água ou com ar e água. O intervalo entre as lavagens e a forma como é feita essa lavagem, influencia diretamente no volume e na qualidade dos resíduos gerados. Em unidades onde é adotada a lavagem com ar e água, além da redução do volume de resíduos gerados, a maior concentração de sólidos em suspensão do lodo gerado melhora as condições de tratabilidade desse lodo.

Em função da qualidade da água bruta, a etapa de sedimentação pode ser eliminada e todo o processo de separação sólido-líquido ocorrer então nos filtros. Essas unidades de tratamento, também largamente utilizadas, são denominadas *sistemas de filtração direta* e incluem a filtração direta ascendente, filtração direta descendente, com ou sem floculação prévia, e a dupla filtração.

O maior problema dos tratamentos físico-químicos, além do incremento dos custos operacionais com os produtos químicos, está no volume de resíduos gerados. Quando adicionamos produtos químicos no processo de remoção de impurezas, a concentração total de sólidos na água é aumentada de maneira significativa. Gonçalves *et al.* (1999) cita que cerca de 35 a 50% dos sólidos presentes no lodo são hidróxidos, cuja origem está no coagulante utilizado no processo de tratamento da água.

Os principais resíduos gerados nas ETAs têm sua origem nos lodos dos decantadores ou flotores na água de lavagem dos filtros e nos rejeitos de limpeza dos tanques de produtos químicos. As características dos resíduos dos decantadores/flotores são bem diferentes das características da água de lavagem de filtros, como mostram as Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7.

Os resíduos do tratamento de água caracterizam-se por possuírem grande umidade, estando, de maneira geral, sob a forma fluída. O objetivo do tratamento dos lodos de ETAs é, em primeiro lugar, a redução do volume desses resíduos de modo a facilitar o seu

transporte e possibilitar uma disposição final adequada para esses rejeitos e, adicionalmente, permitir que a água de lavagem dos filtros seja recuperada. Por esse motivo todos os sistemas de tratamento de resíduos de ETAs baseiam-se em mecanismos de separação das fases sólido/líquido.

As características desses resíduos são fortemente influenciadas pela qualidade da água bruta, dosagens e tipo de produtos químicos utilizados na coagulação, forma de limpeza dos filtros e decantadores, entre outros fatores. As tabelas 3.5, 3.6 e 3.7 mostram os resultados das análises físico-químicas apresentada por alguns autores com relação às características qualitativas dos lodos estudados. Pode-se observar, pelos dados apresentados nessas Tabelas, que existe uma grande variação das características dos os gerados em diferentes estações de tratamento de água, o que implica na necessidade de um tratamento quase individualizado para cada situação.

Tabela 3.5 - Características dos lodos gerados em ETAs
(Cordeiro, 1993).

Autor/Ano	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	ST (mg/l)	SV (mg/L)	SS (% ST)
Neubauer (1968)	30 a 150	500 a 15.000	6,0 a 7,6	1.100 a 16.000	20% a 30%	-
Sutherland (1969)	100 a 232	669 a 1.100	7,0	4.300 a 14.000	25%	80%
Bugg (1970)	380	1.162 a 15.800	6,5 a 6,7	4.380 a 28.580	20%	-
Albrecht (1972)	30 a 100	500 a 10.000	5,0 a 7,0	3.000 a 15.000	20%	75%
Culp (1974)	40 a 150	340 a 5000	7,0	-	-	-
Nilsen (1974)	100	2.300	-	10.000	30%	-
Singer (1974)	30 a 300	30 a 5.000	-	-	-	-
Cordeiro (1981)	320	5.150	6,5	81.575	20,7%	-
Vidal (1990)	449	3.487	6,0 a 7,4	21.972	15%	-
Vidal (1990)	173	1.776	6,7 a 7,1	6.300	73%	-
Cordeiro (1993)	-	5.600	6,4	30.275	26,3%	-

Tabela 3.6 - Concentração de metais presentes nos lodos de decantadores das ETAs situadas no Estado de São Paulo.

(Cordeiro, 1993 - adaptada).

Metais (mg/L)	ETA 01	ETA 02	ETA 03	Limite Resolução CONAMA 020/86
Alumínio	3.965	391	325	-
Bário	-	0,22	0,18	5,0
Cádmio	0,14	0,02	0,02	0,2
Cálcio	142	-	0,08	-
Chumbo	2,32	0,20	0,30	0,5
Cloreto	-	35	36,3	-
Cobre	1,47	0,12	0,20	1,0
Cromo Total	3,82	0,06	0,09	-
Ferro Total	3.381	129	166	-
Ferro solúvel	-	6,14	0,12	15
Magnésio	27	2,87	1,38	-
Manganês	1,86	7,8	3,44	-
Manganês Solúvel	-	4,57	1,00	1,00
Mercúrio	-	-	-	0,01
Níquel	2,7	0,14	0,12	2,0
Potássio	49,97	7,37	7,55	-
Sódio	311	29,3	63	-
Zinco	2,13	0,7	0,98	5,0

Tabela 3.7 - Características da água de lavagem de filtros (Coagulante primário: ETAs 1 e 2 - cloreto férrico; ETAs 3 e 4 - sulfato de alumínio).

(Di Bernardo *et al.* 1999b - Adaptada)

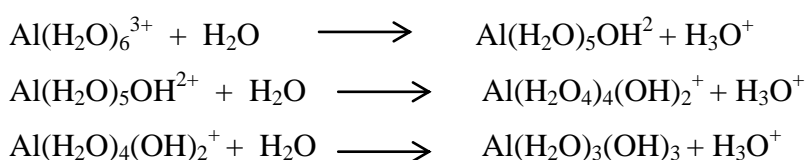
Parâmetro	ETA 01	ETA 02	ETA 03	ETA 04
Turbidez (uT)	130	171	58	76
Cor aparente (uC)	200	2690	310	400
DQO (mg/L)	40,8	52	35	48
pH	7,1	8,0	6,9	7,3
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	37	-	17	12,6
Dureza (mg/L CaCO ₃)	40,8	-	12	-
Condutividade (µS/cm)	95	-	38	37,1
Sólidos Totais (mg/L)	367	-	88	130
Sólidos Sedimentáveis (mg/L)	157	-	65	-
Nitrogênio total (mg/L)	-	-	4,0	-
Fosfato (mg/L)	0,037	-	0,022	-
Carbono orgânico total (mg/L)	11,8	-	6,3	6,4
Coliformes totais (NMP/100ml)	241920	17329	1640	1095
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100ml)	17820	20	72	3
Ferro (mg/L)	700	170	6,9	6,5
Alumínio (mg/L)	-	-	0,030	0,80
Manganês (mg/L)	2,19	1,17	0,10	0,10
Zinco (mg/L)	2	0,10	0,64	-

Na Tabela 3.6 observa-se que as concentrações de alguns metais pesados presentes no lodo de ETAs ultrapassaram os limites máximos estabelecidos no art 21 da Resolução CONAMA 020/86, para despejos de qualquer fonte poluidora. Como era de se esperar, os metais que aparecem em maior quantidade são o alumínio ou o ferro cuja origem esta no coagulante adicionado no processo de tratamento. Segundo a AWWA (1987), a origem de grande parte dos demais componentes tóxicos do lodo de ETAs (além do alumínio que é considerado a parte) tem sua origem nas impurezas contidas no sulfato de alumínio comercial utilizado no processo de tratamento.

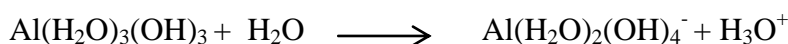
Atualmente, no Distrito Federal, todas as unidades de tratamento de água em operação utilizam coagulantes à base de sais de alumínio, por esse motivo nossas análises se restringirão a esse metal. O item seguinte analisa a questão da toxicidade do alumínio presente nos resíduos dos tratamentos físico-químicos.

3.5.2 - O alumínio presente no lodo de ETAs

O alumínio se apresenta na água basicamente sobre a forma hidrolisada. Quando sais complexados de alumínio, como é o caso dos coagulantes utilizados em ETAs, são adicionados à água, ocorrem, entre outras, as seguintes reações de hidrólise:



Para valores de pH mais altos, aumenta-se a taxa de formação do íon $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{OH})_4^-$ que parece ser o limite de solubilidade do alumínio, já que as formas (-2) e (-3) não são citadas na bibliografia (AWWA, 1987).



Para concentrações de sais de alumínio acima do limite de solubilidade inicia-se a formação de espécies precipitadas de alumínio. O pH da solução e a presença de outras substâncias orgânicas e inorgânicas que podem reagir com o alumínio são fatores que interferem no limite de solubilidade (AWWA, 1987). Segundo Weber Jr (1972), as

dosagens de sais de alumínio e ferro, normalmente adotadas nos processos de tratamento de água, são suficientes para exceder os limites de solubilidade do alumínio e do ferro, portanto os hidróxidos precipitados são os maiores responsáveis pelos processos de desestabilização das partículas presentes na água pela adição de sais metálicos. O hidróxido de alumínio é um floco gelatinoso que sedimenta lentamente promovendo a agregação de outras partículas a esse floco durante o seu percurso (Metcalf & Eddy, 1991), esse mecanismo de remoção é conhecido como “varredura”.

A adição de sulfato de alumínio no tratamento de águas para o abastecimento deixa resíduos tanto na água tratada quanto nos lodos gerados no processo de tratamento. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de avaliar os efeitos epidemiológicos e os impactos ambientais negativos relacionados à ingestão de alumínio e a concentração de alumínio no meio ambiente.

No que se refere à saúde humana, de acordo com a Organização Mundial de Saúde - OMS (WHO, 1996), o problema da ingestão de alumínio tem sido associado à ocorrência de doenças neurodegenerativas, sempre relacionado com outras deficiências do organismo. Além da parcela de alumínio residual presente na água tratada, o alumínio pode existir naturalmente no ar, na água bruta e nos alimentos e ainda ser incorporado aos alimentos cozidos em panelas de alumínio ou pela adição de conservantes. Parcela significativa de alumínio também pode ser ingerida pelo uso de medicamentos contendo alumínio.

O Mal de Alzheimer é uma das doenças onde a alta concentração de alumínio no cérebro é apontada como um dos prováveis fatores de deteriorização das atividades mentais dos pacientes. Estudos desenvolvidos por Stauber *et al.* (1999) indicaram que do total de alumínio ingerido por um homem adulto na Austrália, menos de 2% tem sua origem na água tratada. Concluiu-se, nesse estudo, que para o caso de indivíduos saudáveis e com funções renais normais, o alumínio presente na água tratada não era mais facilmente absorvido pelo sangue que qualquer outra forma de alumínio ingerida pelo homem, o que torna pouco provável que o uso de coagulantes à base de alumínio esteja contribuindo para o aumento da incidência do mal de Alzheimer. No entanto, Pagliardini (1998 *apud* Cordeiro, 1999a), cita que, na França, a Comunidade Européia, por meio de uma resolução de 16 de junho de 1986, recomendou um controle particular do alumínio em águas

utilizadas em sistemas de hemodiálise devido aos riscos a que estariam sujeitos os pacientes.

Bourgigot *et al.* (1988 *apud* Cordeiro, 1999a) citam diversos trabalhos que relacionam as taxas de alumínio do organismo com casos de encefalopatias crônicas e deficiências renais. Segundo os autores, as pesquisas têm mostrado que a concentração de alumínio não é crítica em nível de células renais, uma vez que estas permitem uma rápida eliminação desse elemento, através das excreções. No entanto, quando essas células não funcionam bem, existe a possibilidade de o alumínio se concentrar em outras células, como por exemplo, as cerebrais e cardíacas, afetando de maneira altamente nociva o funcionamento dessas células.

Apesar de toda essa discussão quanto à toxicidade do alumínio, é necessário ressaltar, que a OMS não admite que existam evidências para que se estabeleça um limite máximo para o residual de alumínio na água de consumo com base em risco à saúde. As limitações vigentes estão relacionadas à prevenção de problemas de deposição de hidróxido de alumínio nos sistemas de distribuição.

Quanto aos efeitos sobre o meio ambiente, estudos científicos têm mostrado que a descarga de lodos de ETAs, diretamente nos corpos d'água, pode interferir de maneira negativa no ecossistema aquático. Lamb and Bailey (1981 *apud* AWWA, 1987) analisando os efeitos da aplicação de alumínio em lago eutrofizado, com o objetivo de promover a precipitação química de fósforo, observaram que o aumento da concentração de alumínio no lago provocou o aumento da taxa de mortalidade de organismos bentônicos, representados pela espécie *T. dissimilis*. Os pesquisadores não atribuem esse efeito à toxicidade direta do alumínio e sim à concentração de outros materiais tóxicos nos sedimentos do lago, induzida pela presença de alguma forma de alumínio, provavelmente o íon $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{OH})_4^-$. Outro aspecto levantado pelos pesquisadores é que a mortalidade dos organismos tenha ocorrido devido ao soterramento dos ovos e à perda da mobilidade das pupas provocado pelos flocos mais pesados presentes nos sedimentos.

Roberts e Diaz (1985 *apud* AWWA, 1987) avaliaram as alterações na produtividade de fitoplâncton ao longo de rios, provocadas pela variação na concentração de alumínio devido ao despejo de resíduos de ETAs. Os rios observados eram rasos e de pequenas

velocidades, situados em Newport News, Va. Foi constatada uma redução na produção de fitoplâncton nas proximidades dos despejos das ETAs onde a concentração de alumínio era maior. A causa dessa redução foi atribuída à redução da de luminosidade disponível, devido a grande quantidade de sólidos em suspensão nessa região. Concluiu-se nesses estudos que ainda que não fosse constatado nenhum efeito tóxico para o alumínio, a simples alteração da turbidez da água já seria suficiente para justificar a necessidade de cessarem os despejos de lodo naquele curso d'água. Hall *et al.* (1985 *apud* AWWA, 1987) apontam significativas alterações das características físicas, químicas e biológicas da água devido à adição de alumínio. Foram registradas alterações relativas à distribuição, abundância e diversidade da comunidade bentônica, alterações no ciclo dos nutrientes e redução da tensão superficial com conseqüente alteração da biota aquática.

No Brasil, Cordeiro (1993 *apud* Cordeiro 1999a) monitorou as alterações das características físico-químicas de qualidade da água ao longo do córrego Monjolinho que recebe o despejo da ETA-São Carlos, no Estado de São Paulo, e constatou bruscas mudanças nos parâmetros DQO, sólidos totais, sólidos sedimentáveis e cor nas proximidades do despejo dos resíduos da ETA.

Na busca de outras alternativas para a destinação final dos resíduos de ETAs, o primeiro passo está na redução de volume de lodo, que é alcançada removendo-se ao máximo a parcela de água incorporada ao lodo, de modo a viabilizar o seu transporte e disposição adequada. A seção seguinte trata das técnicas mais utilizadas no desaguamento de lodos de ETAs.

3.5.3 - Tecnologias disponíveis para o tratamento do lodo

O tratamento do lodo de ETAs resume-se basicamente na separação das fases líquida e sólida, aumentando a concentração dos sólidos no material sedimentado ou filtrado de modo que a parte líquida retorne para o processo, reduzindo as perdas da unidade, e a parte sólida tenha uma disposição adequada como resíduo sólido que é. Esse tratamento pode ser analisado em três etapas distintas: espessamento, condicionamento e desidratação.

Espessamento do lodo

O *espessamento do lodo* é a primeira etapa de remoção de umidade do lodo, pode ser feito através dos processos de decantação ou de flotação. Essa etapa influencia diretamente a eficiência do processo de desidratação e o consumo de produtos para o condicionamento químico do lodo. Segundo Reali e Patrizzi (1999), em termos de percentagem em massa, o lodo obtido em sistemas de espessamento por gravidade pode chegar à concentração de sólidos da ordem de 6 a 9%, para o caso de ETAs que utilizam o sulfato de alumínio condicionado com cal, e de 2 a 5%, para o caso de ETAs que utilizam alumínio ou ferro, condicionados com polímeros.

Nos *sedimentadores, ou espessadores por gravidade*, o espessamento do lodo ocorre devido à ação da gravidade sob as partículas de impureza com densidade maior que a da água. O uso desse tipo de decantador é mais antigo e mais comum. A alimentação pode ser feita de maneira contínua ou intermitente (por batelada) dependendo do tipo de operação dos filtros e dos decantadores da ETA. Podem ser circulares ou retangulares, sendo os circulares os mais utilizados nos processos de adensamento de lodo.

O lodo também pode ser adensado pelo processo de *flotação por ar dissolvido*. Essas unidades, de aplicação mais recente, apresentam algumas vantagens em relação aos espessadores de lodo por gravidade para alguns tipos de lodo. Essas vantagens são: maiores taxas de aplicação, maiores concentrações de sólidos no lodo espessado e maior flexibilidade operacional devido à possibilidade de controle da quantidade de ar fornecida para flotação (Reali e Patrizzi, 1999).

Ainda de acordo com Reali e Patrizzi (1999) os *adensadores mecânicos de esteira* surgiram recentemente no mercado. Trata-se de um equipamento simples que vem sendo muito utilizado para o adensamento de lodos de ETEs. Seu esquema está apresentado na Figura 3.3. Nesse tipo de adensador após a adição de polímero sintético na região de condicionamento de lodo, o lodo é lançado diretamente em uma esteira constituída de material poroso. À medida que o lodo vai se movendo ao longo da esteira a água vai sendo drenada por gravidade, sendo o filtrado resultante e o lodo espessado coletados por dispositivos próprios. Com o uso deste tipo de adensadores é possível obter um lodo espessado com concentração de sólidos da ordem de 2,5 a 4,5% (ASCE, 1996).

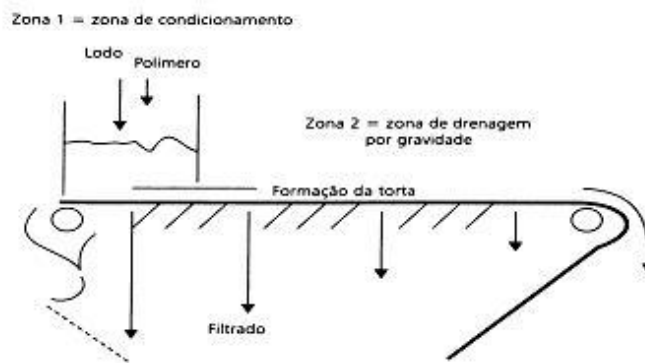


Figura 3.3 - Adensador mecânico de esteira
(Teixeira, 1999, *apud* Reali e Patrizzi 1999)

Condicionamento do lodo

A etapa de condicionamento consiste na preparação do lodo de modo a garantir a eficiência dos processos de desidratação e de espessamento. O condicionamento pode ser feito através da adição de produtos químicos como: sais de alumínio ou ferro, cal ou polímeros, ou através de mecanismos físicos de condicionamento térmico (ASCE, 1996).

O tipo de condicionamento adotado é função das características do lodo e do tipo de adensamento ou desidratação a que será submetido o lodo. A dosagem de produtos químicos utilizados no condicionamento de lodos, em geral polímeros, é normalmente expressa em Kg de polímero aplicado por tonelada de sólidos totais secos presentes no efluente. A dosagem ótima desses condicionadores químicos no processo de desidratação, é obtida através de ensaios de laboratório ou em escala real utilizando o próprio equipamento de desidratação.

Desidratação do lodo

Após o espessamento, em geral, o lodo é encaminhado para a etapa final de desidratação por meio de sistemas de bombeamento. A desidratação pode ser feita por *processos naturais*, sempre que houver disponibilidade de área e condições favoráveis de clima e de solo. Caso contrário, a desidratação do lodo por processos mecanizados é recomendada.

Os *leitos de secagem* constituem o processo natural mais utilizado para a desidratação de lodos de ETEs nos EUA (Cordeiro, 1999c). No entanto, segundo ASCE (1996), para o caso de lodos de ETAs, o uso de leitos de secagem é mais efetivo quando o coagulante utilizado no processo de tratamento da água é a cal, o lodo com residual de alumínio possui uma consistência gelatinosa que torna muito difícil a sua desidratação natural. Já Dharmappa *et al.* (1997) conseguiu bons resultados na desidratação de lodos de ETAs que utilizam coagulantes metálicos, adicionando polímeros no processo de condicionamento do lodo antes da sua disposição em leito de secagem.

O leito de secagem consiste em um tanque preparado com uma camada suporte composta de brita e areia de granulometria grossa, assentada sobre um sistema de drenagem localizado no fundo do tanque. O lodo é lançado sobre essa camada suporte, em camadas de 20 a 30 cm. Uma nova camada somente será lançada após a secagem total do lodo (Cordeiro, 1999c). O lodo seco é removido para disposição final sendo esta a etapa mais trabalhosa da operação desses sistemas.

Nessas unidades o processo de desidratação ocorre devido aos mecanismos de evaporação e de drenagem da fase líquida que percorre o leito de areia. Os leitos de secagem podem ser cobertos para proteção contra água de chuva ou neve (ASCE, 1996). A eficiência da desidratação em leitos de secagem está associada à temperatura, umidade do ar, viscosidade do lodo, ventilação do local e ao fato de serem ou não coberto.

Assim como os leitos de secagem, as *lagoas de lodo* também constituem método bastante popular para a desidratação de lodos de ETAs e de ETEs, sempre que houver disponibilidade de área. As lagoas podem ser naturais, quando aproveitam depressões existentes do terreno, ou construídas por meio de taludes e escavações. Nas lagoas a desidratação ocorre, principalmente, pelos mecanismos de sedimentação e compressão, ASCE (1996). O principal problema associado à utilização de lagoas para a desidratação de lodo de ETAs é a possibilidade de contaminação do lençol freático com metais pesados. Nas lagoas não é possível o reaproveitamento da água removida durante o processo de desidratação do lodo, como acontece nos leitos de secagem

Segundo ASCE (1996) a eficiência dos processos de desidratação em lagoas depende do método de operação empregado. No caso de resíduos de ETAs que utilizam coagulantes

metálicos, é possível obter um lodo desidratado com uma concentração de sólidos da ordem de 6 a 10% adotando-se tempo de retenção na lagoa pelo período de 1 a 3 meses (ASCE, 1996). Neubauer (1968 *apud* Cordeiro, 1999a) apresentou resultados de operação de lagoa de lodo de ETA nos EUA, onde a concentração de sólidos do lodo acumulado no fundo da lagoa era de 14%. Os parâmetros de projeto de lagoas de lodo variam em função das características do solo e das condições climáticas. Recomenda-se que a profundidade da lagoa varie entre 0,7 e 1,4m e devem ser adotadas no mínimo duas lagoas no projeto (Cordeiro, 1999a).

Para a *desidratação mecânica* de lodos utilizam-se os processos de filtração forçada e de centrifugação. Os sistemas mecânicos de remoção de umidade do lodo por meio de *filtração forçada* podem ser do tipo filtro prensa de placas, filtro a vácuo ou prensa desaguadora.

A Figura 3.4 apresenta um esquema de *filtro prensa de placas*. Esse filtro é constituído por uma câmara em estrutura metálica, onde são colocadas diversas placas ou telas de filtragem em paralelo. O lodo é introduzido nessa câmara e forçado a passar pelo meio filtrante através de mecanismos hidráulicos que pressionam uma placa contra a outra. Desta maneira a parte líquida é expulsa da câmara, restando uma mistura com alto teor de sólidos, denominada "torta" (Cordeiro, 1999b).

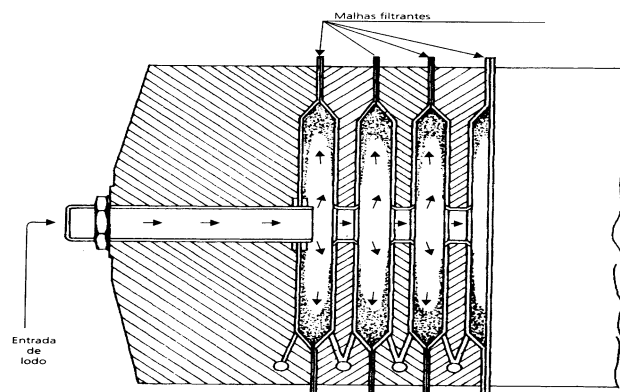


Figura 3.4 - Filtro prensa de placas
(Cordeiro1999b)

As placas podem ser de ferro, alumínio, aço inox ou de fibras sintéticas especiais. Como meio filtrante são utilizados tecidos de fibras orgânicas sintéticas como nylon e propileno. A abertura das tramas e a espessura dos filamentos devem ser selecionadas de acordo com

as características do lodo a ser desidratado, e têm influência direta sobre a eficiência do processo de desidratação.

Os *filtros a vácuo*, conforme mostra a Figura 3.5, consistem em tambores suspensos, revestidos com telas filtrantes, que giram em recipientes de lodo. Seções do tambor são submetidas à sucção e pressões positivas alternadamente, durante cada evolução. O movimento dos tambores é lento, variando de 1 a 1/8 de volta por minuto e a superfície do tambor é dividida em 3 seções. A primeira, quando submersa no tanque de lodo sofre uma pressão negativa de modo que os sólidos ficam aderidos à parte externa do tambor e a parte líquida é recolhida para o interior do tambor. Na seção seguinte a sucção é mantida para manter os sólidos aderidos à superfície do tambor durante o período de secagem do lodo, na última seção a pressão passa a positiva expulsando os sólidos para que sejam descarregados dando início a um novo ciclo.

Segundo Cordeiro (1996b), vários autores têm demonstrado restrições quanto à utilização desses equipamentos para desidratação de lodos de ETAs que utilizam o sulfato de alumínio como agente coagulante devido à natureza gelatinosa do lodo. O condicionamento do lodo nestes casos, demanda uma grande quantidade de polímeros tornando seu custo operacional pouco competitivo.

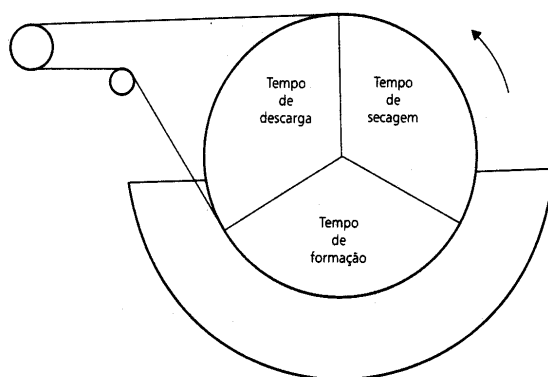


Figura 3.5 - Esquema de funcionamento do filtro a vácuo.
(Cordeiro 1996b)

O *filtro prensa de correia* é um equipamento que funciona com o lodo sendo introduzido entre duas correias, onde uma delas é um meio filtrante. Essas correias deslocam-se entre roletes que promovem a compressão do lodo expulsando a água em excesso. Quando se

usa este tipo de desidratação, o espessamento do lodo também é feito em esteiras por gravidade, esses dois processos podem ocorrer no mesmo equipamento (Cordeiro, 1996b).

A *centrifugação* é uma operação de separação de fases que segue os mesmos princípios da sedimentação, porém no caso da centrifugação as partículas são submetidas ao campo de forças centrífugo que pode ser milhares de vezes maior que o campo de força gravitacional. A força centrífuga F_c é definida pela equação 3.3:

$$F_c = m.(2\pi f)^2 \cdot r \quad (\text{Eq 3.3})$$

Onde m é a massa da partícula em Kg; f é a frequência de rotação em rps; e r é o raio da trajetória percorrida em m. Segundo Realli *et al.* (1999), as centrífugas usualmente encontradas no mercado para a desidratação de lodos, são capazes de produzir um campo de forças de até 6000 vezes a força da gravidade.

Nas centrífugas a mistura é introduzida em um tambor cilíndrico, que gira em torno de um eixo, forçando-a contra as paredes do tanque, separando as fases sólido/líquido em função da diferença de massa específica. A torta de sólidos que fica aderida às paredes do tambor é o líquido clarificado são então removidos do tanque (ASCE, 1996). Todos os princípios discutidos para os processos de sedimentação também se aplicam para os processos de centrifugação.

No Distrito Federal as duas unidades de tratamento de água que possuem sistemas de desidratação, ETA do Rio Descoberto e ETA Pípiripau, utilizam centrífugas nesse processo. Segundo Barbosa (1997), que observou a operação do sistema de desidratação de lodo da ETA do Rio Descoberto durante o período de abril a junho de 1997, o sistema apresenta bons resultados com a concentração de sólidos do lodo desidratado sempre superior a 30%, atingindo frequentemente concentrações da ordem de 35%.

A Tabela 3.8 apresenta uma análise comparativa entre os resultados dos diversos processos de desidratação em função do teor de sólidos obtido no lodo desidratado.

Tabela 3.8 - Quadro comparativo da eficiência dos processos de desidratação aplicados ao lodo de ETAs que utilizam sais de ferro e alumínio
Cornwell *et al.*, (1987 *apud* ASCE, 1996)

Processo de desidratação	Concentração de sólidos (%)
Espessamento por gravidade	3-4
Centrifugação	20-30
Filtro prensa de correia	20-25
Filtro a vácuo	25-35
Filtro prensa de placas	35-45
Leitos de secagem	20-25
Lagoas	7-15

3.5.4 - Disposição final do lodo de ETAs

Após a desidratação do lodo, a etapa seguinte consiste na disposição final dos resíduos sólidos gerados. Além da alternativa de disposição em aterros, diversos usos benéficos estão sendo adotados como oportunidade de aumento de receita e solução ambientalmente mais adequada para a disposição final do lodo em outros países (Tsutiya e Hirata, 2001; Copeland *et al.*, 1995). A seguir relacionamos as vantagens e desvantagens associadas a alguns desses usos.

Disposição no solo: A aplicação do lodo de ETAs no solo pode contribuir para a melhoria estrutural do solo, o ajuste do pH, a adição de traços de minerais, o aumento da capacidade de retenção de água e a melhoria das condições de aeração do solo. Por este motivo o lodo das ETAs vem sendo cada vez mais utilizado para o *cultivo de grama* e para o *preparo de solo comercial* para ser utilizado em vasos (Tsutiya e Hirata, 2001; Copeland *et al.*, 1995).

No entanto quando aplicado ao solo, o alumínio presente no lodo de ETAs reage com o fósforo presente no solo, tornando esse nutriente indisponível para as plantas (Tsutiya e Hirata, 2001; Copeland *et al.*, 1995). Esse mesmo fato foi observado por Lucas (1994) em experimentos desenvolvidos com plantio de grama em estufas. O autor constatou que a deficiência de fósforo, após a adição do lodo contendo alumínio ao solo, interferiu no crescimento das plantas.

Copeland *et al.* (1995) dizem que a fitotoxicidade do alumínio é dependente da solubilidade desse metal, o que não é problema para solos com pH variando entre 6 e 6,5. Tsutiya e Hirata (2001) citam também o problema da fitotoxicidade do alumínio quando o solo apresenta pH acima de 6,5 e. O acúmulo de metais pesados também deve ser analisado para cada caso.

No caso de *solos agrícolas*, a baixa concentração de matéria orgânica e de nutrientes no lodo de ETAs, torna desinteressante o seu uso na agricultura, exceto no caso de cultivo de frutas cítricas. Nos Estados Unidos, devido à deficiência de ferro dos solos destinados ao *cultivo de plantas cítricas*, o lodo de ETAs vem sendo misturado ao solo com o objetivo de repor essa substância vital para o desenvolvimento de culturas de cítricos Tsutiya e Hirata, (2001). Esse reuso só é válido nos casos em que o coagulante utilizado no processo de tratamento da água é o sulfato férrico.

Aplicação em ETAs: Os lodos de ETAs podem ser aplicados no tratamento de águas com baixa turbidez, com o objetivo de melhorar a sedimentabilidade dessas águas. Experimentos desenvolvidos por Cordeiro *et al.* (1981 *apud* Tsutiya e Hirata, 2001) utilizando o lodo gerado em decantadores como auxiliares de coagulação e floculação em casos de água com baixo índice de turbidez, constataram que essa aplicação melhora a sedimentabilidade dos flocos, diminui a quantidade de produtos químicos utilizados, obtendo-se, por consequência, a redução nos custos de tratamento de água. No entanto, faz-se necessário uma avaliação dos riscos de contaminação microbológica da água antes de se lançar mão dessa prática.

Fabricação de cimento: Segundo Tsutiya e Hirata (2001) durante a fabricação do cimento são adicionados sílica, ferro e alumínio. Os lodos de ETAs normalmente contêm todos esses elementos e por isso são introduzidos nos processos de fabricação do cimento, na fase de pré-homogeneização das matérias primas. A presença de óxidos de potássio e de sódio no lodo, diminui significativamente as concentrações de alcali no cimento reduzindo os problemas de expansão e fissuras nas estruturas de concreto. No entanto, a presença de algumas substâncias no lodo de ETAs pode ser prejudicial à qualidade do cimento, estas substâncias são: altas concentrações de matéria orgânica, antracito ou carvão ativado, sulfato, permanganato de potássio e metais pesados.

Fabricação de tijolos: O lodo de ETAs apresenta propriedades físicas e químicas muito parecidas com as da argila natural e do xisto utilizados na produção de tijolos, o que torna viável a sua utilização na fabricação de tijolos. No entanto a presença de cal, alto teor de areia e de carvão ativado do lodo podem comprometer a qualidade do tijolo e inviabilizar sua utilização. O lodo pode ser aplicado diretamente na jazida de argila ou durante o processo de fabricação do tijolo a depender dos teores de umidade do lodo e das condições operacionais da fábrica de tijolo (Tsutiya e Hirata, 2001).

Huang *et al.* (2001) avaliaram a possibilidade de se utilizar os resíduos do tratamento de água associados a sedimentos de barragem como matéria prima na fabricação de tijolos. Os resultados dessa pesquisa concluíram que o tijolo produzido a partir desses materiais pode ser utilizado com segurança na construção civil.

Co-compostagem: Dados de pesquisas recentes têm demonstrado que a adição de lodos de ETAs no processo de compostagem em leiras, juntamente com restos vegetais, resíduos sólidos domésticos e biossólidos, têm apresentado benefícios como ajuste da umidade, fornecimento de minerais, ajuste de pH e aumento do volume de composto (Tsutiya e Hirata, 2001). Silva e Fernandes (1998) avaliaram a evolução de misturas contendo biossólidos, lodo de ETA e resíduos de poda de árvores e concluíram que a combinação desses resíduos permitiu um excelente desempenho da atividade biológica no processo de compostagem e ainda foi observada a total eliminação dos ovos de helmintos no composto. Os níveis de metais pesados observados também ficaram abaixo dos limites fixados por normas para uso agrícola de biossólidos.

Outra aplicação que vem sendo adotada em países da Europa, Ásia e Estados Unidos é a aplicação do lodo de ETAs como coagulante no processo de tratamento de esgotos. Este tema, por ser o tema de nossa pesquisa, será abordado com mais detalhes no item seguinte.

3.6 - APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ETAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Um método alternativo para a disposição dos resíduos gerados nas ETAs, que vem sendo adotado em países da Europa e dos Estados Unidos, é seu lançamento em ETEs. Esse lançamento pode ser via rede coletora de esgotos, ou por meio de transporte em caminhão

após o processo de desidratação. Esse procedimento está associado a efeitos de aumento substancial na eficiência das ETEs no que diz respeito à remoção de coliformes fecais, *Echerichia coli*, DQO, nitrogênio, fósforo e cor (Di Bernardo, 1999). No entanto, segundo ASCE (1996) é necessária uma análise consistente dos efeitos positivos e negativos desse procedimento, considerando a capacidade hidráulica da ETE e das redes coletoras, o volume de lodo gerado adicionalmente, as interferências dos resíduos químicos na digestão e na disposição final do lodo da ETE.

No caso de lodos de ETAs que utilizam os sais de ferro como coagulante, Tsutiya e Hirata (2001) citam que a aplicação desse lodo em unidade de tratamento de esgotos pode controlar a produção de sulfeto de hidrogênio (H_2S). O H_2S é um gás de odor ofensivo quando em concentrações acima de 0,1 ppm, podendo causar a paralisação do nervo responsável pelo olfato quando atinge a concentração de 150ppm e é letal para concentrações acima de 500 ppm. Historicamente, o cloreto férrico tem sido utilizado para o controle de H_2S , porém pesquisas desenvolvidas na Holanda e na Alemanha, têm mostrado que os lodos de ETAs contendo ferro, podem ser tão ou mais efetivos no controle da produção do gás sulfídrico (Tsutiya e Hirata, 2001).

Outra alternativa de uso do lodo de ETAs que vem se apresentando técnica e economicamente viável é o reúso do potencial de coagulação do alumínio, presente nos lodos sob a forma de hidróxidos, quando aplicado nos processos de polimento final de efluentes do tratamento biológico de esgotos. O afluente do processo de polimento final é uma solução com baixa concentração de partículas, uma vez que essa massa líquida já passou por dois processos de clarificação, nos decantadores primário e secundário. A intensidade do processo de floculação irá depender das oportunidades de contato entre as partículas, o que está diretamente relacionada ao número de partículas presentes no líquido. Portanto o maior número de partículas do lodo, pode ter um efeito positivo no processo de floculação.

Chu (2001) desenvolveu experimentos para testar a eficiência da utilização do lodo de ETAs contendo alumínio, quando aplicados como coagulantes no processo de remoção de cor. Os experimentos foram desenvolvidos em laboratório, utilizando equipamento de “Jartest”. Foram selecionados dois tipos de corantes comerciais, um contendo partículas coloidais hidrófilicas e outro contendo partículas hidrófobas. A conclusão do estudo foi

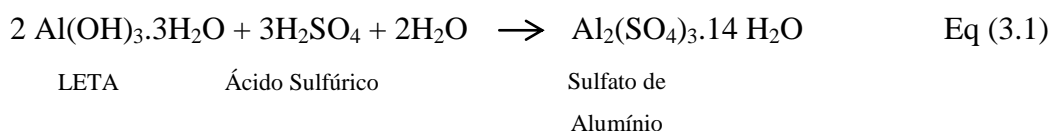
que o uso do lodo se mostrou eficiente para o caso de remoção de corantes hidrófobos, quando aplicado em conjunto com o sulfato de alumínio, representando uma redução de mais de 30% no consumo de coagulante. No entanto o uso do lodo não se revelou efetivo para o caso de corantes hidrofílicos.

Em experimentos anteriores, também realizados em escala de laboratório, Chu (1999) constatou que a aplicação de lodo de ETA como coagulante na etapa de polimento final do tratamento de efluentes industriais, promoveu eficiente remoção de metais pesados. Nesse estudo, observou-se ainda que o armazenamento do lodo por longos períodos também não interferiu na eficiência do processo de remoção.

Em análise experimental utilizando equipamento de teste de jarros, Galarneau e Gehr (1997) constataram que é possível obter uma excelente remoção de fósforo a partir da adição de lodo do tratamento de água aos efluentes do tratamento de esgotos primário ou secundário. Segundo os resultados apresentados nessa pesquisa, para a dosagem de 8 moles Al/mol P a eficiência de remoção obtida foi de mais de 95% para ortofosfato e polifosfato e de 40% para o fósforo orgânico. Observou-se ainda que o lodo gerado a partir desse tratamento, possuía melhores características de desidratação que o lodo do tratamento biológico.

Ao contrário do que observou Chu (2001), Galarneau e Gehr (1997) relatam que o tempo de armazenamento do lodo interferiu negativamente na eficiência de remoção de fósforo do lodo quando aplicado como coagulante.

Outra alternativa de reúso do alumínio contido no lodo de ETAs é a *regeneração de coagulantes*. Dentre as alternativas de recuperação de coagulantes, a que vem sendo mais aplicada é a regeneração pela via ácida (Gonçalves *et al.*,1999). Nesse caso, com a adição de doses suficientes de ácido sulfúrico ao lodo, o hidróxido de alumínio é dissolvido retornando à forma solúvel de sulfato de alumínio. Essa reação pode ser descrita conforme consta na equação 3.1:



Nesse processo de regeneração, após a acidificação do lodo deve ser procedida a separação das fases sólido/líquido para a remoção dos sólidos remanescentes. Antes da disposição desses sólidos residuais em aterros, é necessária a correção do pH que normalmente se encontra em torno de 2.

O sulfato de alumínio, recuperado a partir da acidificação do lodo, pode ser reutilizado como coagulante nos processos de tratamento de água ou de esgotos. Esse procedimento vem ganhando cada dia mais espaço tanto pela necessidade de se reduzir o volume de sólidos gerados como no sentido de viabilizar uma disposição ambientalmente adequada para esses resíduos Bishop *et al.* (1987).

Quando o coagulante regenerado é reutilizado na própria unidade de tratamento de água, os custos com a implantação e a operação da unidade de regeneração podem ser compensados com a redução dos custos de aquisição de sulfato de alumínio, que é da ordem de 28%, e ainda com uma redução de 35 a 40% do volume de sólidos desidratados a serem dispostos, é o que concluí os estudos desenvolvidos por Bishop *et al.* (1987), no caso de alcançar uma completa dissolução do hidróxido de alumínio presente no lodo.

Brandão (1998) testou a aplicação de coagulantes regenerados pela via ácida, no tratamento físico-químico dos seguintes efluentes e águas: esgoto bruto, efluente de lagoa facultativa, efluente de indústria têxtil, efluente de usina de beneficiamento de minério de ferro, efluente de lagoa facultativa, efluente de oficina de manutenção de locomotivas, efluente de lavanderia industrial, água com cor elevada e água com turbidez elevada. Os resultados obtidos mostraram que a eficiência apresentada pelo coagulante regenerado nos ensaios de laboratório utilizando equipamento de “Jartest” foi similar à do sulfato de alumínio comercial.

Por outro lado, Hawkins (1972 *apud* Chu, 2001) cita que o acúmulo de dureza magnesiana na água, provocado pelo reuso de coagulante reciclado, pode levar a significativas alterações nas características de filtrabilidade da água, inviabilizando a reutilização do alumínio regenerado no tratamento de água. No entanto, Bishop *et al.* (1987) não detectaram nenhum efeito adverso quando reutilizou o coagulante regenerado no tratamento de água 1 ou 2 vezes, ou ainda quando utilizou o sulfato de alumínio regenerado combinado com o sulfato de alumínio comercial.

No tratamento de esgoto, Bishop *et al.* (1987) não constataram alterações significativas na eficiência da aplicação de alumínio para remoção de fósforo, quando utilizaram o sulfato de alumínio comercial ou regenerado. Nesse experimento os autores testaram também a aplicação do lodo acidificado antes da separação das fases líquido/sólido, como coagulante no tratamento de esgotos. Os resultados dos experimentos indicaram que o lodo também pode ser aplicado dessa maneira.

4 - METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram realizados ensaios, em escala de laboratório, simulando o processo de precipitação química de fósforo em efluentes do tratamento secundário de esgotos, seguido de flotação e sedimentação. Como coagulantes foram utilizados lodos desidratados gerados em unidades de tratamento de água e também o sulfato de alumínio.

Os ensaios foram desenvolvidos em três etapas sendo: a) testes preliminares b) caracterização do lodo; c) ensaios de flotação e sedimentação. O diagrama apresentado na Figura 4.1 resume a seqüência dessas etapas.

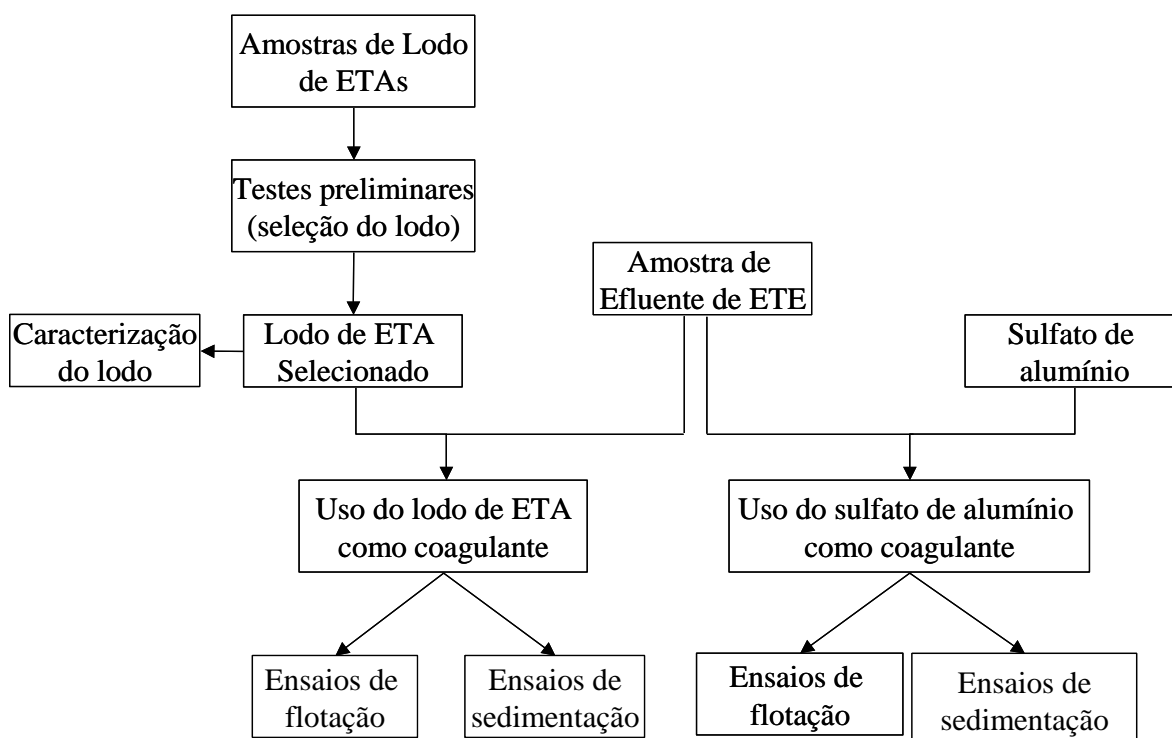


Figura 4.1 - Diagrama de etapas dos ensaios

As amostras de lodo do tratamento de água e de efluentes do tratamento de esgoto utilizadas nesses ensaios foram obtidas em unidades de tratamento que se encontram em operação no Distrito Federal. Os pontos de amostragem selecionados bem como os sistemas de tratamento adotados em cada uma dessas unidades estão descritos nos itens 4.1 e 4.2.

Os ensaios de sedimentação simplificados foram realizados em equipamento do tipo “Jartest”, metodologia largamente utilizada no controle operacional e na definição de parâmetros de projeto de processos químicos. Já os ensaios de flotação foram realizados em colunas de flotação por ar dissolvido, equipamento conhecido como “Flotateste”, seguindo a metodologia descrita por Pinto Filho (1999). Uma descrição da rotina desses experimentos bem como dos equipamentos utilizados é apresentada no item 4.3.

4.1 - EFLUENTES UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Os efluentes selecionados para o desenvolvimento desse trabalho foram: o efluente do decantador secundário da ETEB Sul e o efluente da lagoa de maturação da ETE Samambaia.

O efluente da ETEB Sul foi selecionado porque essa unidade já opera com um sistema de polimento final para remoção de fósforo pelo processo de precipitação química com sulfato de alumínio seguida de flotação. Os dados operacionais desse sistema serviram de referência para nossas avaliações. Adicionalmente, Pinto Filho (1999) desenvolveu, também em escala de laboratório, trabalho experimental que avaliou a influência dos diferentes parâmetros operacionais e de projeto na eficiência da flotação por ar dissolvido aplicada a esse efluente. Os resultados dessa pesquisa serviram de referencial para a verificação da eficiência do uso de lodo de ETA como coagulante nesse processo.

Já no caso do efluente da ETE Samambaia, esse foi selecionado pelo fato de apresentar características bem distintas do efluente da ETEB Sul, o que permitiu avaliar o espectro de aplicabilidade tanto do lodo como do processo de flotação por ar dissolvido. Além disso, encontra-se em fase de construção na ETE Samambaia, um sistema de polimento final para remoção de algas e de fósforo pelo processo de precipitação química seguido de flotação. Dessa maneira, os resultados dessa pesquisa poderão contribuir para a definição dos parâmetros operacionais do sistema de polimento final que se encontra em construção.

A seguir, é apresentada uma breve descrição dos processos de tratamento de esgotos adotado em cada uma dessas unidades, com base nos dados obtidos no relatório SIESG (CAESB, 2001b).

4.1.1 - Estação de Tratamento de Esgotos de Brasília - Sul

A Estação de Tratamento de Esgotos de Brasília Sul - ETEB Sul, foi projetada para tratar uma vazão de 1500L/s e operou durante o ano de 2001 com uma vazão média de 936L/s. A população atendida no mesmo período foi de 370.000 habitantes distribuídos pelas cidades de Brasília (área central e asa sul), Núcleo Bandeirante, Guará I e II, Cruzeiro (incluindo Área Octogonal e Setor Sudoeste), Candangolândia, parte do Lago Sul e quadra 1 do Riacho Fundo I. A ETEB Sul despeja seus efluentes tratados diretamente no Lago Paranoá, o que implica na necessidade de tratamento a nível terciário com remoção de nutrientes para não provocar a aceleração do processo de eutrofização do lago.

O sistema de tratamento da fase líquida dos efluentes da ETEB Sul é composto de tratamento preliminar em caixa de areia e gradeamento, seguido de decantador primário, tratamento biológico com remoção de nutrientes pelo processo Phoredox seguido de decantador secundário e polimento químico para remoção de fósforo.

Phoredox é um processo de lodos ativados, modificado de modo a promover a remoção biológica de fósforo e nitrogênio combinada com a remoção da matéria orgânica carbonácea.

Os mecanismos de remoção do processo Phoredox ocorrem em cinco estágios de tratamento: no primeiro, em condições anaeróbias, a energia necessária para promover o metabolismo bacteriano é obtida a partir da hidrólise dos polifosfatos contidos nos tecidos celulares dos microorganismos. Dessa forma, fósforo é liberado para a massa líquida na forma de polifosfatos solúveis. O segundo e o quarto estágio do tratamento ocorrem em zona anóxica, quando na ausência de oxigênio dissolvido livre, bactérias heterotróficas convertem o nitrato a nitrogênio gasoso. No terceiro e no quinto estágio, em condições aeróbias, ocorre a nitrificação, conversão da amônia em nitrato e a absorção dos polifosfatos em quantidade superior à liberada na zona anaeróbia. A zona aeróbia final é responsável pela remoção do nitrogênio gasoso residual, além de evitar a liberação de fósforo pelos microorganismos.

O fósforo remanescente no efluente do decantador secundário é removido na etapa de polimento final pelo processo de precipitação química com adição de sulfato de alumínio

seguido da separação de fases por flotação. Após o polimento final, as características do efluente devem atender aos limites estabelecidos em projeto e apresentados na Tabela 4.1.

O tratamento da fase sólida é feito em digestores aeróbios e anaeróbios. A Figura 4.2 mostra uma representação esquemática do sistema de tratamento adotado na ETEB-Sul.

Tabela 4.1 - Limites máximos admissíveis para os parâmetros de qualidade da água do efluente do polimento final da ETEB Sul.

Parâmetros	Valores
DBO (mg/L)	10
DQO (mg/L)	45
SS (mg/L)	10
TKN (mg N/L)	4
P _T (mg P/L)	0,3
Ortofosfato (mg P/L)	0,1

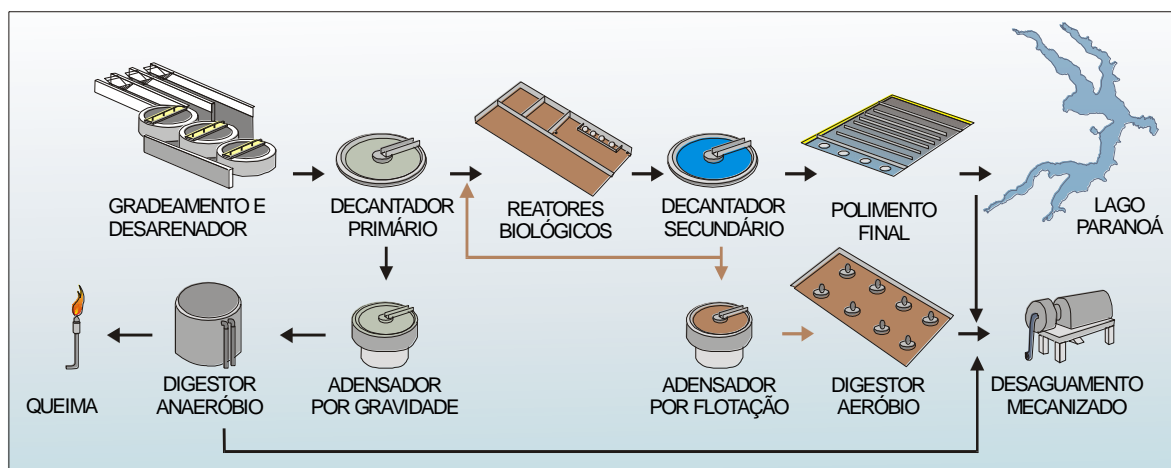


Figura 4.2 - Sistema de tratamento da ETEB Sul (SIESG - CAESB, 2001b)

A ETE Norte, que opera atualmente com uma vazão de 430 L/s, utiliza-se do mesmo processo de tratamento da ETE Sul na fase líquida, diferenciando-se desta apenas no tratamento da fase sólida pela ausência da digestão aeróbia.

No desenvolvimento dos testes preliminares do presente estudo foi utilizado o efluente da ETE Norte e nas demais etapas o efluente da ETE Sul.

Nessas estações, a coleta das amostras de esgotos para o desenvolvimento dos ensaios de laboratório, foi feita no canal de saída do decantador secundário, antes do ponto onde ocorre a adição do sulfato de alumínio para início do processo de polimento final.

4.1.2 - Estação de Tratamento de Esgotos de Samambaia

A ETE Samambaia, projetada para tratar uma vazão média de 284 L/s, atende atualmente uma população de cerca de 177.495 habitantes, residente na cidade de Samambaia. Durante o ano de 2001 a vazão média de operação dessa unidade foi de 158 L/s. Essa área pertence à bacia do Rio Melchior, afluente do Rio Corumbá.

A Figura 4.3 apresenta o esquema do sistema de tratamento da ETE Samambaia que é composto de tratamento preliminar por gradeamento e desarenação, seguido de tratamento biológico composto de três etapas: “Sistema Samambaia”, lagoa de alta taxa e lagoa de maturação.

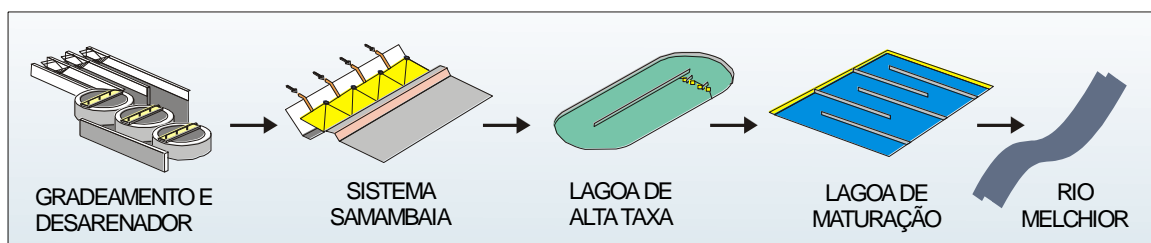


Figura 4.3 - Sistema de tratamento da ETE Samambaia
SIESG (CAESB, 2001b)

O “Sistema Samambaia” é composto de reatores anaeróbios de fluxo ascendente instalados na entrada da lagoa facultativa. A digestão anaeróbia, primeira etapa desse processo de tratamento, pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microorganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexada em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas.

Na lagoa facultativa, a estabilização da matéria orgânica ocorre em três zonas distintas: uma zona aeróbia, localizada na camada superior do meio líquido, onde a matéria orgânica dissolvida ou finamente particulada é estabilizada por bactérias aeróbias. O oxigênio fornecido para essas reações de estabilização é proveniente da aeração da interface água/ar e também pelos processos de fotossíntese realizados pelas algas presentes no ambiente aquático. A matéria orgânica em suspensão tende a sedimentar e no fundo da lagoa (zona anaeróbia) as bactérias anaeróbias promovem a digestão desse lodo. Na zona intermediária da lagoa (zona facultativa) o consumo de oxigênio muitas vezes é maior que a capacidade de produção das algas, desse modo, são as bactérias do grupo facultativas que atuam na estabilização da matéria orgânica nessa zona, na ausência de oxigênio livre esses organismos utilizam outros aceptores de elétrons como nitratos sulfatos e CO_2 .

Na etapa seguinte, com o objetivo de acelerar o processo de oxidação da matéria orgânica remanescente, agitadores mecânicos são instalados na superfície das lagoas de alta taxa, introduzindo uma constante agitação da superfície da água. Essa agitação além de promover uma maior aeração da superfície da água, também permite que um maior número de algas possa competir pelo uso da luz solar, intensificando assim o processo de fotossíntese. A maior produtividade das algas se reflete na maior eficiência de remoção de DBO e também no aumento do pH do líquido, o que, junto com a maior exposição aos raios ultravioletas do sol, contribuem para uma maior taxa de inativação dos organismos patogênicos e remoção de nutrientes.

Na lagoa de maturação ocorre a desinfecção do efluente com remoção de até 99,99% dos coliformes. A lagoa de maturação possui chicanas que melhoram o fluxo hidráulico e a eficiência do processo.

O efluente tratado dessa unidade é lançado no Rio Melchior, afluente do Rio Corumbá a montante da futura barragem de Corumbá IV. A eficiência de remoção de fósforo que ocorre nesse sistema, da ordem de 30%, é, segundo estudos desenvolvidos por CAESB/SEECLA (2000), insuficiente para prevenir um processo de eutrofização acelerada no lago que será formado a partir da construção dessa barragem. Por esse motivo, encontra-se em andamento as obras para implantação do sistema de polimento final para remoção de fósforo do efluente da ETE Samambaia que irá operar pelo processo de precipitação química de fósforo seguida de flotação.

A Tabela 4.2 apresenta as características média do efluente da lagoa de maturação da ETE Samambaia, segundo monitoramento realizado por Felizatto (2000) no período de Setembro/1996 a Setembro/2000.

Tabela 4.2 - Características do efluente da Lagoa de maturação da ETE Samambaia.
(Felizatto, 2000)

Parâmetros	Valores
DBO ₅ (mg/L)	29
DQO (mg/L)	206
SST (mg/L)	105
TKN (mg N/L)	25,8
P _T (mg P/L)	7,33
Ortofosfato (mg P/L)	5,22
Clorofila A (µg/L)	1698

Como observado na Tabela 4.2, o efluente da ETE Samambaia, além da grande concentração de fósforo e de nitrogênio, apresenta também altas concentrações de SS, que são compostos principalmente de algas. Como já foi dito anteriormente os procesos adotados no polimento de efluentes de lagoas não podem deixar de remover algas, por isso, nos ensaios onde foi utilizado o efluente da ETE Samambaia, analisou-se também o comportamento da clorofila-a, com o objetivo de verificar a eficiência dos processos testados na remoção de algas.

4.2 - LODOS DE ETAS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

Consoante com os objetivos desse trabalho, optou-se por utilizar-se o lodo desidratado das estações de tratamento de água. Atualmente, apenas duas unidades de tratamento de água do Distrito Federal operam com sistemas de desidratação de lodo, a ETA Pípiripau e a ETA Rio Descoberto.

Na etapa de testes preliminares, foram coletadas amostras dos lodos dessas duas unidades para caracterização e análises com o objetivo de selecionar o mais adequado sob os

critérios de eficiência de remoção de fósforo e de facilidade de dissolução desse lodo, já que em algumas amostras a consistência do lodo era bastante gelatinosa.

A seguir, apresenta-se uma breve descrição dos processos de tratamento da ETA Pípiripau e da ETA Rio Descoberto, com base nos dados obtidos no relatório SIAGUA (CAESB, 2001a) e em informações da CAESB.

4.2.1 - Estação de Tratamento de Água Pípiripau

A ETA Pípiripau trata as águas das Captações dos Rios Pípiripau, Fumal e Brejinho que apresentam valores de turbidez variando entre 2 a 8 uT, com valor médio de 3uT e pH próximo de 7.

Essa ETA foi projetada para tratar uma vazão de até 640L/s pelo processo de dupla filtração, ou seja, filtração direta ascendente seguida de filtração descendente. Opera atualmente com uma vazão média de 165L/s.

O filtro ascendente é formado por uma camada suporte em pedregulho com 85cm de espessura e a camada filtrante de areia com 1,6m de espessura. Já o filtro descendente possui camada suporte de 45cm de espessura e camada simples de areia de 70cm. A Figura 4.4 apresenta uma foto dessa unidade de tratamento.



Figura 4.4 - Foto da ETA pípiripau

Nessa ETA, a água bruta passa inicialmente por um tanque de contato, onde pode ser realizada a pré-cloração, no caso de necessidade, e posteriormente segue para uma tubulação onde é adicionado o coagulante. Essa tubulação é dotada de uma grade que permite a mistura adequada do coagulante. O coagulante utilizado no processo é o sulfato de alumínio, com adição de cal para correção do pH. A dosagem do coagulante nessa ETA gira em torno de 6 a 12mg de $AL_2(SO_4)_3/L$.

Após a adição do coagulante, a água segue diretamente para as unidades de filtração onde ocorre a filtração. O processo de dupla filtração é realizado em seis baterias de filtros, com câmaras de carga independentes. A água filtrada é então submetida à desinfecção, fluoretação e correção de pH no tanque de contato.

A lavagem dos filtros é feita com ar e água, sendo a lavagem dos filtros ascendentes realizada a cada 48hs e a dos descendentes a cada 100hs. A água de lavagem dos filtros é acumulada em um adensador por gravidade, de onde o sobrenadante retorna para o início do processo de tratamento e o lodo prossegue nas demais etapas do tratamento da fase sólida.

O tratamento da fase sólida compreende ainda as etapas de condicionamento com polímero aniônico de baixa carga e desidratação em centrífuga. A torta produzida é disposta em aterro localizado a mais de 100km da ETA. A produção mensal de torta da ETA Pípiripau varia de 20 a 25 ton.

4.2.2 - Estação de Tratamento de Água do Rio Descoberto

A ETA Rio Descoberto trata a água proveniente da captação do Lago do Rio Descoberto, reservatório artificial com capacidade de armazenamento de até 102,3 hm³, formado a partir da construção da barragem de concreto com 265m de comprimento e 133m de altura.

A ETA Rio Descoberto é a maior unidade de tratamento de água do DF, projetada para tratar 6000L/s pelo processo de filtração direta, opera atualmente com a vazão média de 3.474L/s. A Figura 4.5 apresenta o esquema de tratamento dessa unidade.

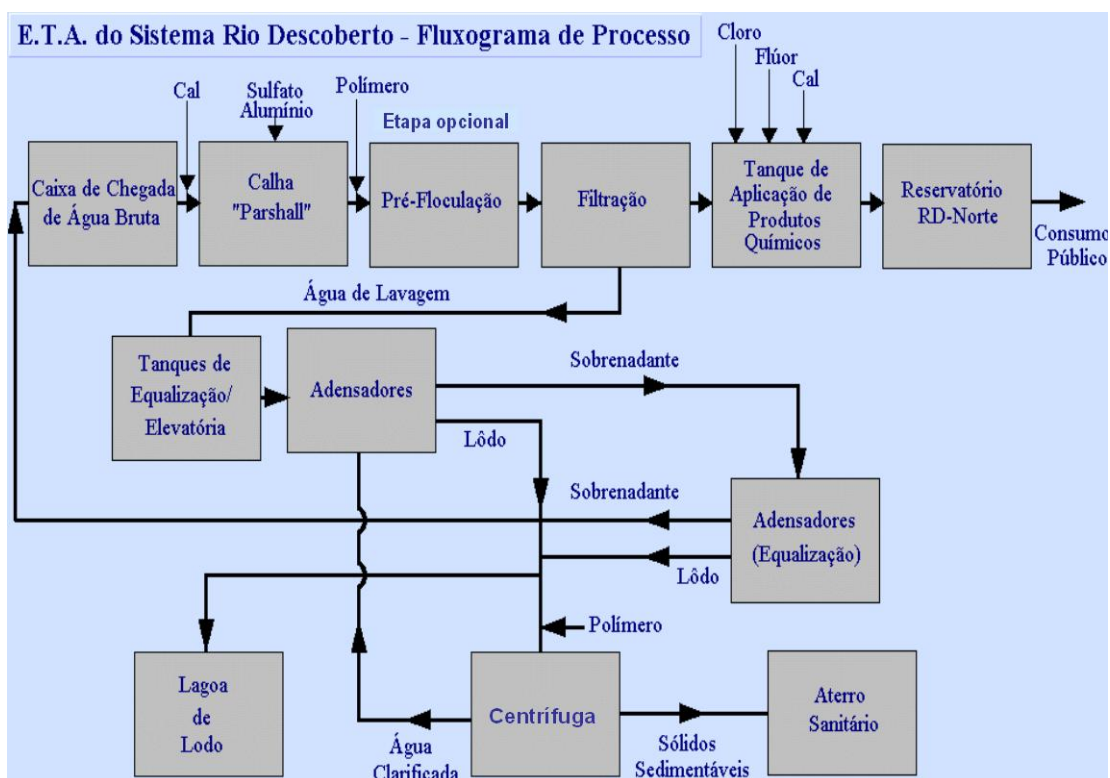


Figura 4.5 - Sistema de tratamento de água da ETA Rio descoberto

O coagulante utilizado no processo de tratamento é o sulfato de alumínio com eventual adição prévia de cal para correção do pH de coagulação. A dosagem de coagulante varia de 2 a 7 mg $AL_2(SO_4)_3/L$. Eventualmente, com o objetivo de tornar os flocos mais resistentes, nessa etapa, aplica-se, também, o polímero aniônico de baixa carga como auxiliar de floculação, com dosagem variando entre 0,017 a 0,33mg/L.

Em geral, a ETA é operada pelo sistema de filtração direta, com “by pass” das unidades de floculação. No entanto, dependendo da qualidade da água bruta, após a coagulação faz-se necessário que a água coagulada passe pelas unidades de floculação.

Os filtros são compostos de uma camada suporte de pedregulho de 0,525m e uma camada filtrante de areia com 1,20m de altura. A lavagem dos filtros é feita com ar e água, em intervalos que variam de 18 a 24 hs. Após a filtração, a água é submetida às etapas de desinfecção, fluoretação e correção de pH, e segue para os reservatórios de armazenamento, estando pronta para o consumo.

A água de lavagem dos filtros é encaminhada para um tanque de acumulação, dotado de agitadores e em seguida é distribuída para os dois adensadores por gravidade que funcionam em regime de batelada. O sobrenadante desses decantadores, cerca de 170L/s, é encaminhado para tanques de equalização e em seguida retornam para a caixa de entrada da ETA. O lodo acumulado no fundo desses adensadores segue para o tratamento da fase sólida, que compreende as etapas de condicionamento e desidratação em centrífuga. O condicionamento é feito através da adição de polímero aniônico de baixa carga na linha de alimentação da centrífuga.

A ETA RD também possui leitos de secagem que podem receber o lodo dos adensadores e proceder à desidratação natural dos resíduos por processos naturais de evaporação e infiltração.

Atualmente, o lodo desidratado da ETA RD vem sendo disposto em uma cascalheira desativada, situada a menos de 10Km dessa unidade de tratamento. A produção diária de torta dessa unidade é de cerca de 10 ton. A Figura 4.4 apresenta o esquema de tratamento dessa unidade

4.3 - DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram desenvolvidos em três etapas sendo: 1) testes preliminares; 2) caracterização do lodo; 3) experimentos de flotação e de sedimentação.

4.3.1 - 1ª Etapa: Testes Preliminares

Durante a etapa de testes preliminares foram desenvolvidos ensaios em equipamento de “Jartest” onde eram simuladas as etapas de coagulação, floculação e sedimentação, utilizando-se como coagulante no processo o lodo das duas ETAs e o sulfato de alumínio anidro P.A. Os objetivos desses testes eram:

- ✓ Avaliar preliminarmente a capacidade de coagulação do alumínio contido nos resíduos do tratamento de água, quando aplicados no tratamento químico para remoção de fósforo de esgotos.

- ✓ Definir, dentre os lodos gerados nas duas unidades de tratamento de água, o mais adequado para ser aplicado como coagulante no trabalho, tendo em vista os aspectos de eficiência de remoção e de facilidade de dissolução desse lodo.
- ✓ Determinar a metodologia a ser utilizada para a aplicação do lodo como coagulante nos ensaios a serem realizados na 3ª etapa.

O equipamento de “Jartest” utilizado nos experimentos é composto de 6 cubetas de acrílico, com volume útil de 2L cada, onde é possível desenvolver ensaios por batelada em paralelo. A Figura 4.6 mostra a fotografia desse equipamento em operação.



Figura 4.6 - Foto do equipamento “Jartest” utilizado nos ensaios de sedimentação

Nessas cubetas, são colocadas as amostras do efluente a ser submetido ao tratamento químico. Para cada cubeta, existe um agitador de paleta controlado por variador de velocidade. Para simular as etapas de coagulação e de floculação, adiciona-se o coagulante às amostras de efluente e variam-se os gradientes de velocidade e os intervalos de tempo desejados.

A etapa de sedimentação é simulada desligando-se os agitadores e aguardando-se o período de sedimentação (Δt). As amostras de sobrenadante são coletadas em um ponto de tomada localizado a cerca de 7 cm de distância da superfície da água (ΔL). Desse modo, a razão $\Delta L/\Delta t$ equivale a taxa de aplicação superficial ou a velocidade de sedimentação. Assim, variando-se Δt , é possível simular diferentes taxas de aplicação superficial.

As amostras de esgotos utilizadas nos testes preliminares foram coletadas no canal de saída do decantador secundário da ETE Brasília Norte, devido à proximidade dessa unidade de tratamento em relação ao Laboratório de Análise da Água da UnB, onde foram desenvolvidos os ensaios, e também, devido ao fato dessa unidade adotar o mesmo processo de tratamento da ETE Brasília Sul, que é objeto de estudos na terceira etapa desse trabalho.

Como já foi mencionado, os coagulantes utilizados nesta etapa preliminar foram os lodos gerados nas ETAs Rio Descoberto e Pípiripau além do sulfato de alumínio anidro P.A. Para esses ensaios, foram coletadas diversas amostras de lodo. Essas amostras foram caracterizadas segundo os parâmetros de sólidos em suspensão totais, fixos e voláteis e metais pesados.

As metodologias e os equipamentos utilizados nas análises estão descritos na Tabela 4.3. A preparação das amostras para as análises de metais pesados seguiu os procedimentos descritos no item 4.3.2.

Na preparação do lodo para ser aplicado como coagulante, o lodo era inicialmente macerado com bastão de cerâmica e em seguida adicionava-se água destilada. Essa suspensão era homogeneizada em agitador magnético por cerca de uma hora produzindo uma suspensão. Essa suspensão será denominada ao longo desse texto como suspensão de LETA - ou suspensão preparada com lodo de ETA.

Nos testes preliminares, foram avaliadas três situações diferentes em que a suspensão de LETA foi aplicada no processo de remoção química de fósforo: a) A suspensão de LETA substituíu o sulfato de alumínio, b) a suspensão de LETA era aplicada em conjunto com o sulfato de alumínio, como auxiliar de coagulação, c) a suspensão de LETA acidificada substituíu o sulfato de alumínio.

A suspensão de LETA foi acidificada com o objetivo de solubilizar algumas espécies de alumínio contidas no lodo e avaliar a influência desse procedimento na eficiência de remoção de fósforo. Para tanto, seguindo a metodologia utilizada por Brandão (1998),

adicionava-se ácido sulfúrico até que o pH da suspensão ficasse inferior a 2 e mantinha-se a suspensão em agitador magnético por mais uma hora.

Os parâmetros monitorados ao longo dos testes preliminares para avaliar a capacidade coagulante dos lodos foram: pH, turbidez e ortofosfato.

4.3.2 - 2ª Etapa: Caracterização do Lodo de ETAs

O objetivo desta etapa foi a caracterização do lodo a ser utilizado nos experimentos. Nessa fase, foram coletadas cerca de 2Kg de lodo desidratado de cada unidade de tratamento de água. Essas amostras foram preservadas em geladeira. A caracterização dessas amostras foi feita em termos da concentração de sólidos em suspensão totais, voláteis e fixos e da concentração de alguns metais pesados. Os métodos e os equipamentos utilizados nessa caracterização estão relacionados na Tabela 4.3.

A determinação da concentração de metais pesados foi realizada no Laboratório de Geoquímica da UnB, usando o método de Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma (EEA/ICP). Para a preparação das amostras para a leitura dos metais no EEA/ICP, utilizou-se a metodologia recomendada por Boaventura (1995), cujo esquema de procedimentos se encontra no apêndice A. Tais procedimentos, inicialmente desenvolvidos para a análise de metais em lixo, mostraram-se eficientes na solubilização dos metais contidos no lodo de estações de tratamento de água que também se enquadram na categoria de resíduos sólidos.

A preparação das amostras incluía a calcinação em mufla, a cerca de 550° C, com o objetivo de oxidar a matéria orgânica presente. Em seguida, a amostra era triturada em almofariz de ágata e submetida ao ataque com ácidos fluorídrico, perclórico e clorídrico, sempre concentrados. Esses ácidos agem na solubilização a quente dos metais contidos nas amostras de lodo. Após a solubilização as amostras eram filtradas e diluídas em solução de ácido clorídrico a 5% até a concentração de 100mg de sólidos/L de solução ácida. Finalmente era feita a leitura da concentração de metais no ECA/ICP. A calibração do aparelho foi feita com solução aquosa contendo concentrações conhecidas de metais.

Tabela 4.3 - Parâmetros e metodologias utilizadas nas análises físico-químicas

Parâmetro	Método/equipamento	Caracterização da fase	
		sólida	líquida
PH	Potenciométrico/pHmetro portátil, marca WTW, eletrodo modelo Santix 41.		X
Turbidez	Nefelométrico/Turbidímetro nefelométrico marca Hach, modelo 2100 AN		X
Sólidos totais	Gravimétrico/balança analítica marca Sartorius.	X	X
Sólidos fixos	Gravimétrico/balança analítica marca Sartorius	X	
Sólidos voláteis	Gravimétrico/balança analítica marca Sartorius	X	
DQO	Digestão com dicromato de potássio em refluxo fechado – leitura colorimétrica em espectrofotômetro marca HACH, modelo DR-4000U, EUA		X
Clorofila-a* ($\mu\text{g/L}$)	Extração com solução de clorofórmio e metanol na proporção 2:1 e leitura colorimétrica em Espectrofotômetro marca HACH, modelo DR-4000U, EUA.		X
Ortofosfato	Reação com ácido ascórbico e leitura colorimétrica em espectrofotômetro marca HACH, modelo DR-4000U, EUA		X
Fósforo Total	Digestão das amostras em meio ácido, reação com ácido ascórbico e leitura em espectrofotômetro marca HACH, modelo DR-4000U, EUA		X
Metais Pesados	Solubilização dos metais em meio ácido e leitura em Espectrômetro de emissão atômica com plasma (EEA/ICP).	X	

Clorofila-a*: somente no caso dos efluentes da ETE Samambaia

4.3.3 - 3ª Etapa: Experimentos de flotação e de sedimentação

Nessa etapa, foram desenvolvidos ensaios de flotação e de sedimentação, com o objetivo de avaliar a influência de diversos parâmetros de projeto e operação na eficiência desses processos, quando adotados na separação de fases que se seguem à precipitação química de fósforo. Maior ênfase foi dada à avaliação dos processos de flotação já que esse é o processo que está sendo adotado no polimento final dos efluentes selecionados para o estudo.

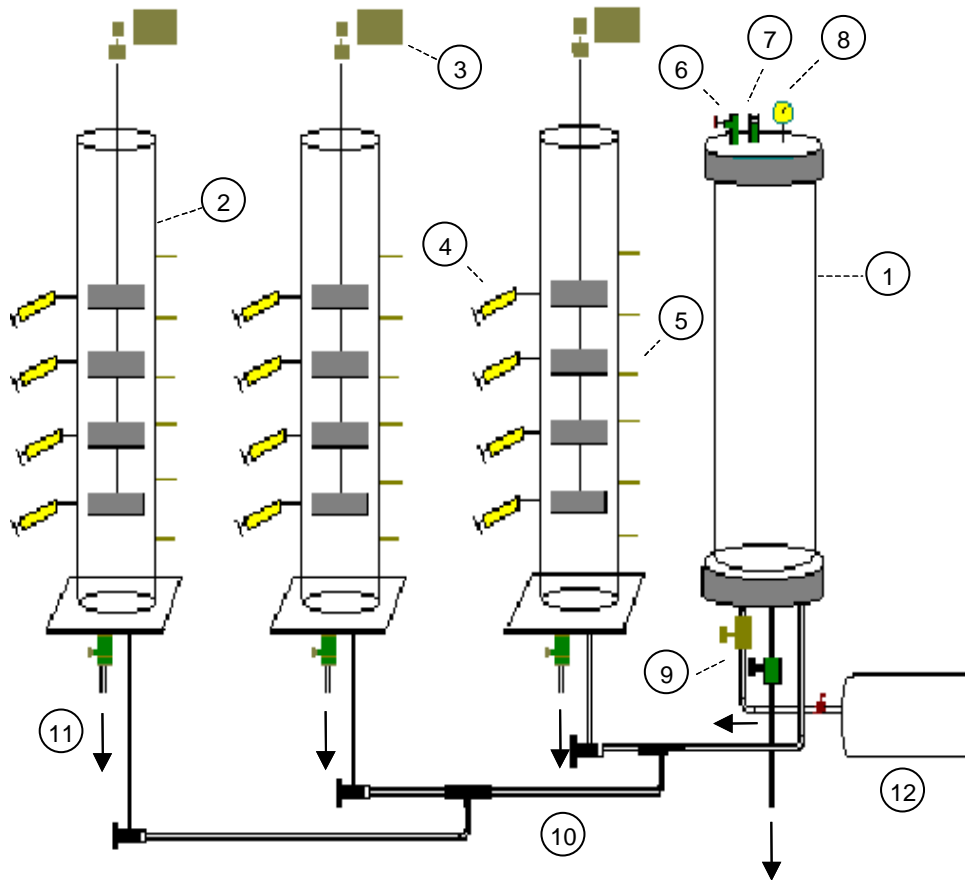
Nos ensaios de sedimentação foram avaliados os parâmetros dosagem de coagulante e taxa de aplicação. Nos de testes flotação, além desses parâmetros, analisou-se ainda os parâmetros taxa de recirculação e tempo de floculação. Em ambos os casos, buscou-se observar o comportamento dos processos para dois tipos de coagulantes: suspensão de lodo, na forma como ficou definida a partir dos testes preliminares, e sulfato de alumínio anidro P.A.. Os ensaios utilizando o sulfato de alumínio foram realizados com o objetivo de definir uma referência que permitisse a análise relativa da eficiência do uso do lodo como coagulante.

O equipamento utilizado nos ensaios de sedimentação foi o “Jartest”, descrito no item 4.3.1 e mostrado na Figura 4.6.

Nos ensaios de flotação foi utilizado o “Flotatest”. A Figura 4.7 apresenta o diagrama esquemático desse equipamento. O “Flotatest” opera em regime de batelada sendo composto por quatro colunas confeccionadas em acrílico transparente. A primeira coluna funciona como câmara de saturação e as demais como unidades de flotação, permitindo que sejam desenvolvidos três experimentos em paralelo.

A *câmara de saturação* foi projetada para suportar uma pressão de até 1000 kPa, confeccionada na forma cilíndrica com 84mm diâmetro interno e altura de 700mm, perfazendo um volume útil de 3L. A água introduzida nessa câmara era saturada através da injeção de ar comprimido fornecido por um compressor. O ar comprimido é introduzido na câmara de saturação por meio de dutos de 6,4mm de diâmetro interligados a uma válvula de agulha localizada na base da câmara. A saída de água saturada também ocorre pelo fundo da câmara de saturação através de mangueiras de 12,7mm. Na parte superior da câmara foi instalado um manômetro, para medir a pressão interna da câmara, uma válvula de agulha, para controlar a pressão desejada na câmara, e uma válvula de segurança.

As *câmaras de flotação* foram confeccionadas na forma cilíndrica com diâmetro interno de 85mm e 1,0m de altura, perfazendo um volume útil de 4L. A entrada de água saturada e a saída do efluente clarificado ocorrem pela base das câmaras, através de dutos de 6,4 e 12,7mm de diâmetro, respectivamente. Ao longo de cada coluna foram instalados dispositivos de amostragem e de injeção de coagulante.



- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| 1- Câmara de saturação | 7- Válvula de segurança |
| 2- Coluna de flotação | 8- Manômetro |
| 3- Conjunto motoragitador | 9- Ar comprimido |
| 4- Injeção de coagulante | 10- Água saturada |
| 5- Ponto de coleta | 11- Drenos |
| 6- Válvula de agulha | 12- Compressor |

Figura 4.7 - Esquema do “Flotateste”
Filho,

(Pinto

1999)

As câmaras de flotação são dotadas de *misturadores de paleta* que permitem a simulação das etapas de coagulação e floculação dentro da própria câmara. Os motores que movimentam os misturadores são dotados de variador de velocidade que permitiam a variação do gradiente de velocidade. A Figura 4.8 apresenta a fotografia do “Flotateste” em operação.

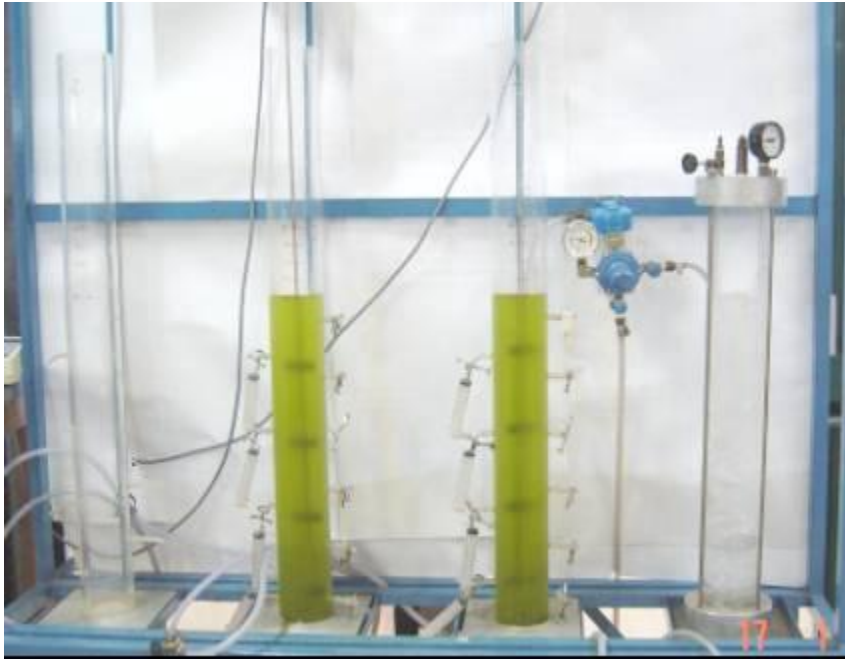


Figura 4.8 - Foto do “Flotateste” em operação

Rotina dos experimentos

Cada experimento era composto de uma série de ensaios de sedimentação e de flotação. Para cada série era coletada uma única amostra, cerca de 200L de esgoto, que era homogeneizada em um tanque, acondicionada em galões plásticos de 20L e preservadas na geladeira à temperatura de cerca de 5° C. Pela manhã, antes do início dos ensaios, o volume de amostra que seria utilizado naquele dia era retirado da geladeira e mantido à temperatura ambiente até que a temperatura da amostra ficasse próxima de 20° C.

Nos *ensaios de sedimentação*, foram fixadas as seguintes condições para a mistura rápida: tempo de coagulação de 1 min e gradiente de velocidade de 100 s^{-1} , para a mistura lenta: tempo de floculação de 15 min e gradiente de velocidade de 25 s^{-1} . A adoção de um baixo

valor de gradiente de velocidade na etapa de mistura rápida deveu-se às limitações do equipamento de “Jartest” utilizado no início do trabalho experimental, entretanto, para viabilizar uma mistura homogênea, adotou-se um tempo de mistura maior que o usual. Os ensaio de sedimentação incluíam duas etapas descritas a seguir:

1ª Etapa: Tinha como objetivo a determinação da dosagem ótima de coagulante tanto para o LETA como para o sulfato de alumínio. Para tanto, fixou-se a taxa de aplicação superficial em 25,2m/dia (atendendo aos limites recomendados no item 3.3) e variou-se a dosagem dos coagulantes. Os parâmetros de qualidade da água monitorados nessa etapa foram: temperatura, pH, turbidez e concentração de fósforo (ortofosfato e fósforo total).

2ª Etapa: Tinha como objetivo avaliar a influência da taxa de aplicação superficial no processo e a determinação da taxa de aplicação ótima. Nessa etapa fixou-se a dosagem ótima de coagulante estabelecida na etapa anterior, e variou-se a taxa de aplicação. Os parâmetros de turbidez e concentração de ortofosfato foram utilizados para a avaliação da eficiência do processo.

Nos *ensaios de flotação* os parâmetros operacionais adotados inicialmente para a mistura rápida foram: tempo de coagulação de 1min e gradiente de velocidade de 1000 s^{-1} , para a mistura lenta: tempo de floculação de 10 a 15 min e gradiente de velocidade de 100rpm, taxa de recirculação de 15% e taxa de aplicação de 230,4m/dia. Esses valores foram adotados com base nos resultados obtidos por Pinto Filho (1999). O autor justifica o uso de um valor de gradiente de velocidade da ordem de 100s^{-1} na etapa de floculação para inibir a formação de flocos demasiadamente grandes e com tendência a sedimentação. Os ensaios de flotação foram desenvolvidos em quatro etapas descritas a seguir:

1ª Etapa – Com o objetivo de determinar a dosagem ótima para o sulfato de alumínio e para o LETA, foram fixadas as condições operacionais conforme descrito acima e variou-se a dosagem de coagulantes, sulfato e LETA. Nessa etapa, foram monitorados os parâmetros: temperatura, pH, turbidez, ortofosfato e, em alguns casos, fósforo total.

2ª Etapa - Para a dosagem ótima determinada na fase anterior, foi avaliada a influência da variação da taxa de aplicação, utilizando-se como parâmetros de caracterização da fase

líquida a turbidez e a concentração de fósforo (ortofosfato e fósforo total). Os demais parâmetros operacionais serão mantidos constantes no valor das etapas anteriores;

3ª Etapa - Ainda utilizando-se como parâmetros de caracterização da qualidade da água, a turbidez e a concentração de fósforo será avaliada nessa etapa a influência da variação da taxa de recirculação, adotando-se agora a dosagem ótima e a taxa de aplicação ótima definida na etapa anterior.

4ª Etapa - Nessa etapa, cujo objetivo foi avaliar a influência do tempo de floculação, foram adotadas a dosagem ótima, taxa de aplicação ótima e taxa de recirculação ótima determinada anteriormente. Também nessa etapa foram considerados os parâmetros turbidez e concentração de ortofosfato na avaliação da eficiência do processo.

Finalmente, com o objetivo de avaliar as alterações na eficiência dos processos de sedimentação e flotação quando o coagulante sulfato de alumínio é substituído pelo LETA, novos ensaios de flotação e de sedimentação foram realizados adotando-se as condições operacionais ótimas definidas anteriormente. Nessa etapa foram caracterizados os efluentes e os lodos gerados nos dois processos. Os parâmetros adotados para a caracterização dos efluentes foram: DQO, sólidos em suspensão, ortofosfato, fósforo total e clorofila a. Na caracterização do lodo gerado nos processos foram adotados os parâmetros: volume de lodo gerado e concentração de sólidos no lodo. Para a determinação da concentração de sólidos do lodo gerado nos processos de flotação e de sedimentação, foram realizados ensaios de concentração de sólidos em suspensão da amostra de esgoto, antes e depois dos ensaios. A partir desses dados, determinou-se o volume de sólidos que estava retido no lodo gerado.

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam o resumo das etapas dos experimentos de sedimentação e flotação descritas anteriormente.

Tabela 4.4: Fases dos ensaios de sedimentação

Fase	Objetivo	Parâmetros analisados	Condições operacionais		
			MR	ML	Sedimentação
1	Determinar dosagem “ótima” para o LETA e o sulfato de alumínio	pH, Turbidez, ortofosfato.	D=variável T _C =60s G=100s ⁻¹	T _F =15min G=25s ⁻¹	T _A =25,2m ³ /m ² /dia
2	Determinar taxa de aplicação “ótima” para o LETA e o sulfato de alumínio	pH, turbidez, ortofosfato.	D= “ótima” T _C =60s G=100s ⁻¹	T _F =15min G=25s ⁻¹	T _A =variável
3	Avaliar a eficiência do processo para as condições operacionais “ótimas” utilizando LETA e sulfato	pH, turbidez, ortofosfato, SST, DQO, clorofila-a*.	D= “ótima” T _C =60s G=100s ⁻¹	T _F =15min G=25s ⁻¹	T _A = “ótima”

MR: Mistura rápida, ML: Mistura lenta, G: Gradiente de velocidade, T_C: Tempo de coagulação, T_F: tempo de floculação, T_A: Taxa de aplicação, D: Dosagem, T_R: Taxa de recirculação

*Parâmetro avaliado apenas para o caso da ETE Samambaia

Tabela 4.5: Etapa dos ensaios de flotação

Fase	Objetivo	Parâmetros analisados	Condições operacionais		
			MR	ML	Flotação
1	Determinar dosagem “ótima” para o LETA e o sulfato de alumínio	pH, Turbidez, ortofosfato.	D=variável T _C =60s G=1000s ⁻¹	T _F =15min G=100s ⁻¹	T _A =230,4m ³ /m ² /dia T _R =15%
2	Determinar taxa de aplicação “ótima” utilizando como coagulante o LETA	pH, turbidez, ortofosfato.	D=variável T _C =60s G=1000s ⁻¹	T _F =60s G=100s ⁻¹	T _A =variável T _R =15%
3	Determinar taxa de recirculação “ótima” utilizando o LETA	pH, turbidez, ortofosfato.	T _C =60s G=1000s ⁻¹	T _F =60s G=100s ⁻¹	T _A = “ótima” T _R =variável
4	Determinar tempo de floculação “ótimo” utilizando o LETA	pH, turbidez, ortofosfato.	T _C =60s G=1000s ⁻¹	T _F =60s G=100s ⁻¹	T _A = “ótima” T _R = “ótima”
5	Avaliar a eficiência do processo para as condições operacionais “ótimas” utilizando LETA e sulfato	pH, turbidez, ortofosfato, SST, DQO, clorofila-a*.	D= “ótima” T _C =60s G=1000s ⁻¹	T _F =“ótima” G=100s ⁻¹	T _A = “ótima” T _R = “ótima”

MR: Mistura rápida, ML: Mistura lenta, G: Gradiente de velocidade, T_C: Tempo de coagulação, T_F: tempo de floculação, T_A: Taxa de aplicação, D: Dosagem, T_R: Taxa de recirculação.

*Parâmetro avaliado apenas para o caso da ETE Samambaia

5 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos desenvolvidos na fase de testes preliminares, caracterização do lodo e ensaios de flotação e de sedimentação.

5.1 - Resultados dos testes preliminares

Ao longo dos testes preliminares foram desenvolvidos ensaios de sedimentação em equipamento de “Jarteste”, onde diversas amostras de lodo gerado na ETA Rio Descoberto e na ETA Pípiripau foram aplicados como coagulante no processo de remoção de fósforo do efluente do tratamento secundário da ETE - Norte.

Como já mencionado, os objetivos dessa etapa eram: avaliar, de maneira preliminar, a capacidade de coagulação do alumínio contido no lodo de ETA; definir entre o lodo da ETA Pípiripau e o da ETA Rio Descoberto, o mais adequado para ser aplicado como coagulante nesse trabalho, tendo em vista os aspectos de eficiência de remoção e de facilidade de dissolução desse lodo; determinar a metodologia a ser utilizada para a aplicação do lodo como coagulante nos ensaios de sedimentação e flotação.

Para os testes preliminares, foram coletadas cinco amostras do efluente do decantador secundário da ETE Norte. Essas amostras eram armazenadas em galões plásticos de 20L, que eram mantidos fechados e sob refrigeração. Durante o período amostrado (20/06/2002 a 28/07/2002), a concentração de ortofosfato dessas amostras variou de 0,15 a 0,73mg P/L e a turbidez variou entre 3,7 e 10,5uT.

Nesta etapa, foram coletadas quatro amostras de lodo desidratado, com um volume de cerca de 2Kg cada. Dessas amostras, duas foram coletadas na ETA Rio Descoberto e duas na ETA Pípiripau. Na ETA Rio Descoberto, as amostras foram coletadas em um mesmo dia, sendo uma de cada unidade de centrifugação em operação. Já na ETA Pípiripau, as amostras foram coletadas em dias diferentes e de uma mesma unidade de centrifugação.

As amostras foram coletadas em período de estiagem, Julho a setembro/2002 e foram preservadas em geladeira à temperatura de aproximadamente 5 °C.

Com relação ao lodo da ETA Rio Descoberto, embora as duas centrífugas estivessem desidratando o lodo gerado no mesmo dia e na mesma unidade de tratamento de água, as amostras de lodo coletadas apresentaram características bastante diferenciadas. A amostra identificada como 01 apresentava consistência excessivamente gelatinosa, provavelmente, devido a problemas operacionais na dosagem de polieletrólito, o que dificultou a solubilização desse lodo, mesmo em meio ácido. Por esse motivo, a amostra 01 não foi utilizada nos testes preliminares.

As demais amostras foram preparadas conforme descrito no item 5.1.3 a seguir, e aplicadas como coagulante nos ensaios de “Jarteste”.

As amostras de lodo utilizadas nos experimentos apresentavam-se na forma de torta, com consistência pastosa com mais de 25% de sólidos totais, segundo dados operacionais da CAESB. Para ser aplicado como coagulante e dispersar-se de forma homogênea na massa líquida a ser tratada, era necessário que essa pasta fosse diluída produzindo uma suspensão. Para tanto, uma porção de lodo, previamente pesada em balança analítica, era macerada com bastão de cerâmica e em seguida misturada a um volume conhecido de água destilada. Essa mistura era mantida em agitador magnético pelo período mínimo de uma hora formando-se então a suspensão de LETA.

A partir da caracterização do lodo, cujos resultados são apresentados na etapa seguinte deste trabalho, foi possível estimar-se a concentração de alumínio presente na suspensão de LETA (mg Al/mL de suspensão) a ser aplicada como coagulante.

Nos casos em que a suspensão de lodo era acidificada, seguindo a metodologia proposta por Brandão (1998), adicionava-se ácido sulfúrico 1:3, até que o pH da suspensão ficasse abaixo de 2,0. O consumo de ácido observado nos testes realizados foi de cerca de 1 ml de H₂SO₄ cc para a solubilização de aproximadamente 140 mg Alumínio.

Nos ensaios de sedimentação desenvolvidos na etapa de testes preliminares, variou-se o tipo e a dosagem do coagulante e as demais condições operacionais foram mantidas conforme estabelecido na Tabela 5.1. Nesses testes foram monitorados os parâmetros pH,

turbidez e ortofosfato. Os resultados completos dos testes preliminares estão apresentados no apêndice B e serão comentados nessa seção.

Tabela 5.1 - Condições operacionais dos testes preliminares

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação
D (mg Al/L)	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m/dia)
Variável	100	60	25	15	25,2

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação.

A Figura 5.1 mostra os resultados do ensaio de sedimentação onde o sulfato de alumínio anidro foi utilizado como coagulante no processo de remoção de fósforo do efluente secundário da ETE Norte.

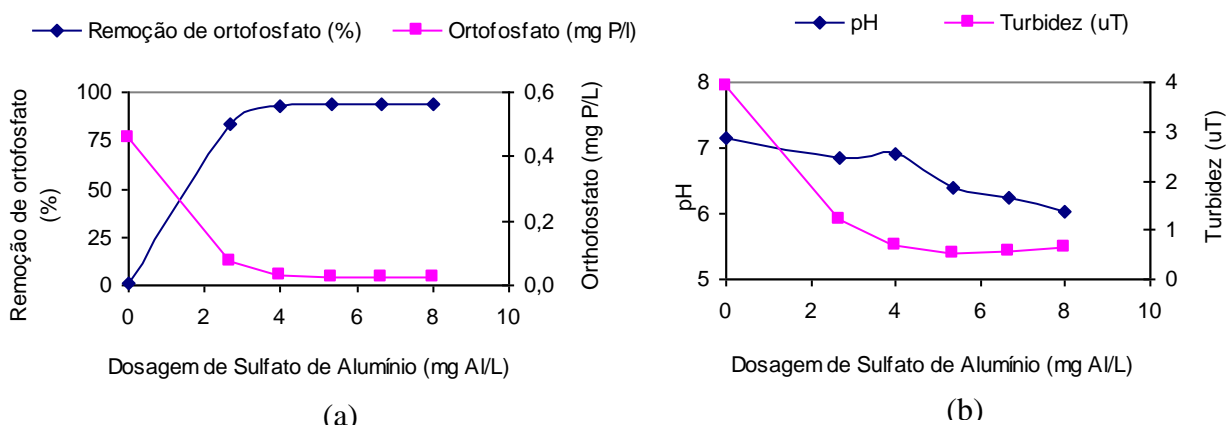


Figura 5.1 - Testes preliminares: (a) Residuais de ortofosfato, (b) pH e turbidez, em função da dosagem de sulfato de alumínio.

Nesses testes, para a dosagem de 5,3mg Al/L atingiu-se uma situação ótima de remoção na qual a concentração residual de ortofosfato final foi de 0,03 mg P/L, o que correspondeu a uma eficiência de remoção de 94%. A turbidez residual determinada para o ponto de dosagem ótima foi de 0,5uT e o pH medido nesse mesmo ponto foi de 6,4.

A Figura 5.2 mostra os resultados dos ensaios de sedimentação onde uma mesma suspensão preparada com o lodo da ETA Rio Descoberto, sem acidificação, foi aplicada como coagulante no processo de remoção de fósforo de duas amostras distintas do efluente da ETE Norte.

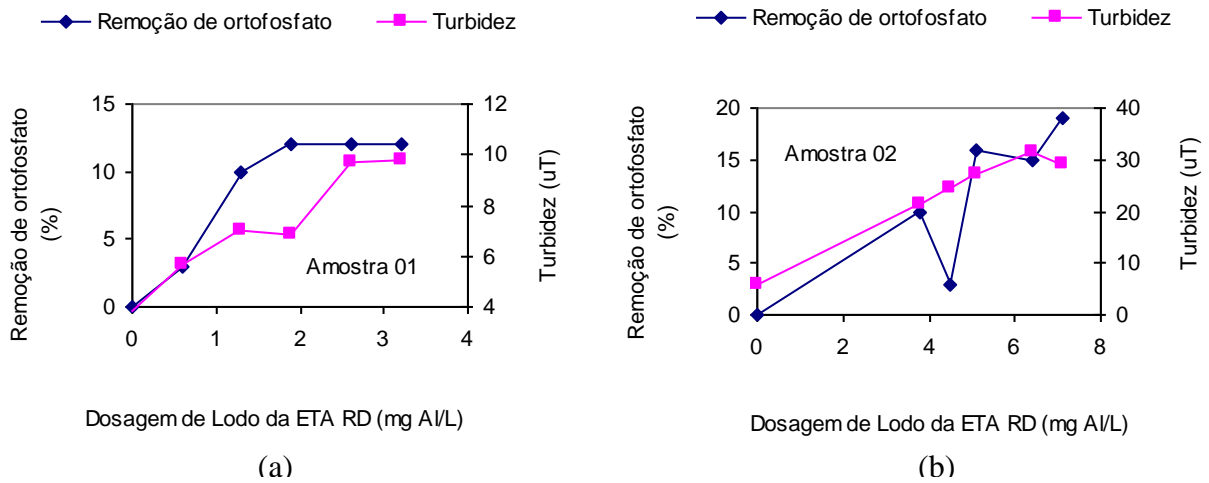


Figura 5.2 - Testes preliminares: Residuais de ortofosfato e turbidez em função da dosagem de lodo não acidificado da ETA Rio Descoberto, (a) amostra 01 e (b) amostra 02.

Nesses testes verifica-se que a eficiência de remoção de ortofosfato alcançada não atingiu a faixa de 20%, mesmo para dosagens de cerca de 7mg Al/L. Apesar de verificar-se na Figura 5,2 que a tendência da curva de eficiência de remoção de ortofosfato é ascendente, observa-se ao mesmo tempo, que a turbidez residual também apresenta uma tendência de crescimento, e já está próxima de 30uT para as maiores dosagens de lodo testadas. Assim, a utilização da suspensão de lodo sem acidificação como coagulante não parece viável.

Com relação ao pH, pode-se constatar nas Tabelas B.2 e B.3 do apêndice B, que esse se manteve praticamente estável independentemente da dosagem de lodo aplicada às amostras.

No caso da aplicação da suspensão de lodo não acidificado oriundo da ETA Pípiripau, os resultados não foram muito diferentes. A Figura 5.3 mostra os resultados desses ensaios utilizando duas amostras de efluente da ETE Norte.

Dando continuidade aos testes preliminares, avaliou-se a eficiência da suspensão de lodo da ETA Pípiripau, quando aplicado de forma combinada com o sulfato de alumínio. Nesse experimento, foi mantida a dosagem de sulfato de alumínio em 1mg de Al/L e variou-se a dosagem de lodo. A máxima remoção de ortofosfato obtida nos ensaios foi de 22% para a dosagem de lodo de 5 mg Al/L, dosagem total de 6mg Al/L. Nesse caso, a turbidez residual ficou próxima de 5uT. Os resultados desse teste estão mostrados na Tabela B.9 do apêndice B.

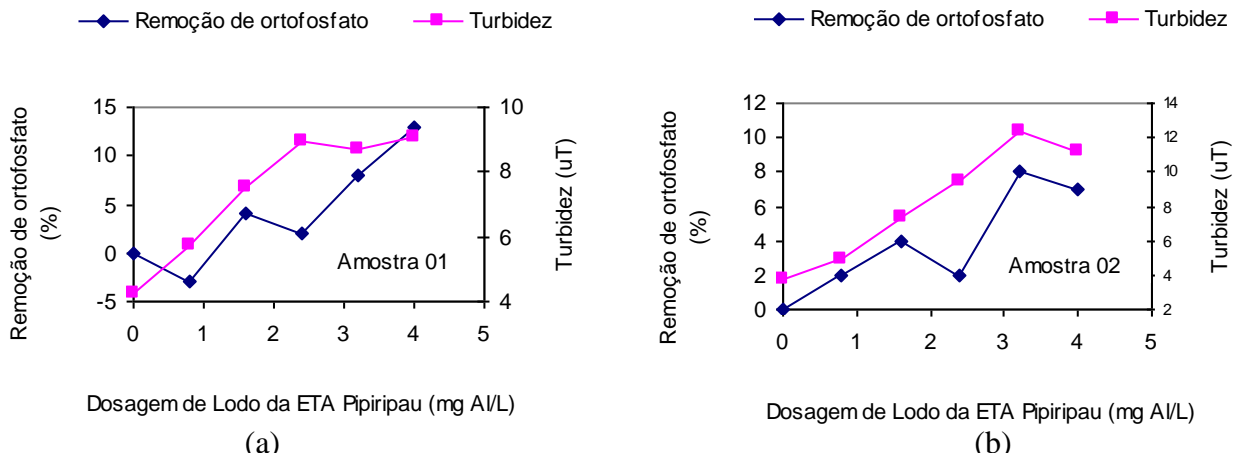


Figura 5.3 - Testes preliminares: Residuais de ortofosfato e turbidez em função da dosagem de lodo não acidificado da ETA Pipiripau, (a) amostra 01 e (b) amostra 02.

Ainda nesse mesmo teste, com o objetivo de avaliar se as deficiências do processo de remoção de fósforo estavam ocorrendo na etapa de floculação ou de separação de fases, filtrou-se a amostra clarificada pela sedimentação (sobrenadante) e analisou-se a concentração de ortofosfato do filtrado. É o que mostra a Figura 5.4.

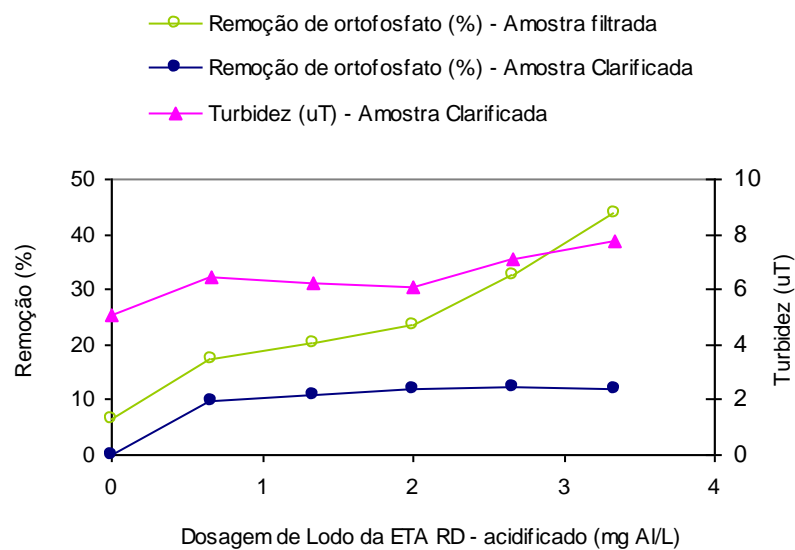


Figura 5.4 - Testes preliminares: Residuais de ortofosfato e turbidez em função da dosagem de lodo acidificado da ETA Rio Descoberto.

Observa-se na Figura 5.4 que, para a dosagem de 3,2 mg A/L a amostra filtrada, apresentou eficiência de remoção de ortofosfato de 40% enquanto na amostra clarificada essa remoção foi da ordem de 10%. Essa diferença indica que a precipitação do ortofosfato estava ocorrendo, e que seria possível melhorar a performance do processo a partir da melhoria da eficiência das etapas de floculação e separação de fases.

Ao contrário do observado com a suspensão acidificada de lodo da ETA Rio Descoberto, o lodo da ETA Pípiripau, ao ser acidificado, apresentou bons resultados, levando a eficiências de remoção de ortofosfato de cerca de 85%, como mostra a Figura 5.5.

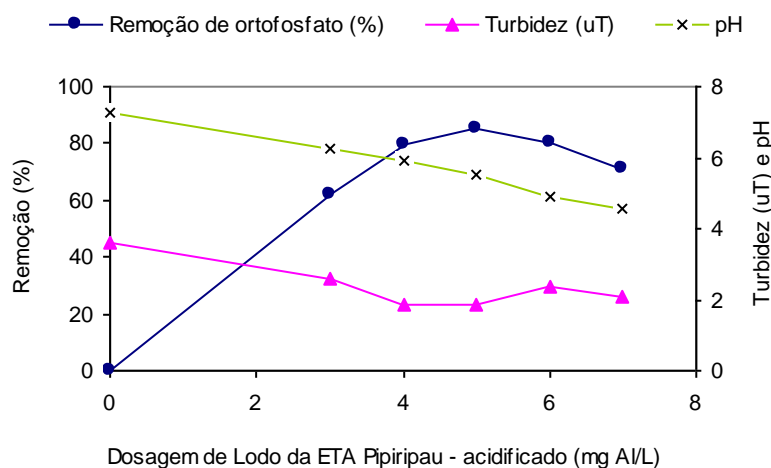


Figura 5.5 - Testes preliminares: Residuais de ortofosfato e turbidez em função da dosagem de lodo acidificado da ETA Pípiripau.

Comparando esses resultados com aqueles apresentados na Figura 5.1, nota-se que a eficiência de remoção de ortofosfato com o uso do lodo acidificado da ETA Pípiripau se aproxima da eficiência obtida com o uso do sulfato de alumínio.

Alguns testes de reprodutibilidade foram desenvolvidos utilizando-se a dosagem de 6mg Al/L, aplicada à mesma amostra de efluente. Os resultados indicaram uma eficiência de remoção de ortofosfato média de 81% como mostrado na Tabela B.12 do apêndice B.

Ainda analisando-se a reprodutibilidade dos resultados, nova amostra de lodo da ETA Pípiripau foi coletada. Repetiram-se os procedimentos de acidificação do lodo e realizaram-se novos testes de jarros, utilizando-se, também, nova amostra do efluente (ver Tabelas B11 e B13 do apêndice B). A Tabela 5.2 reúne os resultados obtidos nesses testes. Observa-se que os mesmos níveis de eficiência foram alcançados para as duas amostras embora a “dosagem ótima” tenha sido diferente.

Tabela 5.2 - Teste de reprodutibilidade de resultados para diferentes amostras de lodo acidificado da ETA Pípiripau e diferentes amostras do efluente secundário da ETE Norte.

D (mg Al/L)	Amostra de Lodo 01				Amostra de Lodo 02			
	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato		pH	Turbidez (uT)	ortofosfato	
			(mg P/L)	E (%)			(mg P/L)	E (%)
0,0	7,3	3,6	0,36	0	7,2	3,3	0,40	0
3,6	6,3	2,6	0,14	62	6,5	5,0	0,29	27
4,8	5,9	1,9	0,07	80	6,3	4,1	0,19	52
6,0	5,5	1,9	0,05	85	6,1	2,9	0,10	76
7,2	4,9	2,4	0,07	81	5,8	3,1	0,08	81
8,4	4,6	2,1	0,10	72	5,5	3,3	0,06	84

Legenda: D-Dosagem de LETA, E-Eficiência de remoção.

Os resultados obtidos nos testes preliminares sugerem que o potencial de utilização de lodos desidratados de ETAs como coagulante varia de instalação para instalação. Essa variação, como foi dito no item 3.5, pode estar relacionada à qualidade da água bruta, ao tipo e a dosagem do coagulante e às características dos processos adotados no tratamento da água e no tratamento dos resíduos gerados no processo. O caso das amostras de lodo coletadas na ETA Rio Descoberto exemplificou como aspectos operacionais da unidade de centrifugação, podem interferir de maneira significativa nas características do lodo gerado: duas unidades de centrifugação, desidratando os resíduos produzidos no mesmo dia em uma mesma ETA, produziram tortas com características completamente diferentes.

No caso do uso do lodo acidificado como coagulante, a diferença na eficiência de remoção de fósforo dos lodos testados pode estar associada à eficiência do processo de solubilização do alumínio. Segundo Gonçalves *et al* (1999), o potencial de recuperação do coagulante contido no lodo de ETAs é tanto maior quanto menor for a relação entre a turbidez e a dosagem de coagulante na ETA. No período amostrado, essa relação ficou próxima de 1,0 para a ETA Pípiripau e próxima de 1,5 para o caso da ETA RD, mostrando que, provavelmente, o potencial de solubilização do alumínio contido no lodo da ETA Pípiripau é maior que o da ETA RD.

Dessa forma, optou-se por utilizar o lodo da ETA Pípiripau nas demais etapas desse trabalho. Ficou definido ainda que os procedimentos de acidificação do lodo serão adotados nas demais etapas desse trabalho, já que o uso do lodo sem acidificação parece não se apresentar viável.

5.2 - Caracterização do lodo

A caracterização do lodo foi desenvolvida segundo os métodos e procedimentos descritos no item 4.3.2. É preciso destacar que as características do lodo apresentadas nesse estudo são relativas às amostras utilizadas no presente trabalho. Não foi feito um trabalho de caracterização dos lodos considerando sua variabilidade temporal.

Na caracterização do lodo com relação à concentração de metais pesados, o que se buscou foi, principalmente, a determinação do teor de alumínio e ferro. A concentração de outros metais pode conter imprecisões. Dentre os fatores que podem ter levado a essas imprecisões pode-se citar: a) o fato de não ter sido desenvolvida uma metodologia própria para a avaliação do lodo de ETA e sim, adaptado uma metodologia utilizada na avaliação de outro tipo de resíduo contendo, provavelmente, uma concentração bem menor de alguns metais, como ferro e alumínio; b) a curva padrão utilizada na calibração do equipamento de espectrometria com emissão atômica (EEA/ICP) foi desenvolvida para análise da concentração de metais em água e não em uma solução acidificada como a que foi utilizada; c) não foi utilizada um solução de controle que validasse os resultados apresentados. Apesar desses fatores, o teor de alumínio determinado para as amostras analisadas está coerente com os dados operacionais disponíveis.

A caracterização do lodo foi feita em duas etapas. A primeira ocorreu na fase de testes preliminares quando foram analisadas três amostras. A Tabela 5.3 apresenta as características das amostras de lodo utilizadas nos testes preliminares.

Nos ensaios de flotação e de sedimentação, foi utilizada uma única amostra de lodo da ETA Pípiripau, cujas características estão apresentadas na Tabela 5.4. Essa amostra foi coletada no dia 02/09/2002. Na caracterização dessa amostra de lodo, buscou-se desenvolver uma análise um pouco mais criteriosa, determinando a concentração de um número maior de elementos presentes no lodo e também trabalhando com as amostras em

triplicata. Ainda buscando-se uma maior precisão, nessa etapa, foram descontadas as interferências de elementos contidos nos reagentes, trabalhando-se com uma amostra em branco.

Tabela 5.3 - Características físico-químicas das amostras de lodo utilizadas nos testes preliminares

Parâmetro	ETA Rio Descoberto Amostras coletadas em 08/07		ETA Pipiripau Amostra Coletada em 26/07
	Amostra 01*	Amostra 02*	
Sólidos em suspensão totais (%)	25	26	24
Sólidos em suspensão fixos (%)	68	67	72
Sólidos em suspensão voláteis (%)	32	33	28
Alumínio (% ST)	-	9,2	12,5
Ferro (%ST)	-	4,2	6,5
Magnésio (% ST)	-	0,2	0,2
Cálcio (% ST)	-	-	0,3
Titânio (% ST)	-	0,9	0,3

* Amostras coletadas no mesmo dia, porém em unidades de centrifugação diferentes.

Observa-se que as amostras de lodo utilizadas nos testes preliminares, Tabela 5.3, apresentaram concentrações de sólidos totais maiores que aquelas apresentadas na Tabela 5.4, o que mostra, mais uma vez, a influência dos aspectos operacionais e sazonais sob as características do lodo.

Em todas amostras analisadas, como já havia sido constatado por outros autores, e apresentado nas Tabelas 3.4 e 3.5, os elementos que aparecem em maior quantidade no lodo são o alumínio e o ferro. A origem principal desses elementos no lodo está no coagulante utilizado no processo de tratamento da água e o ferro pode ter sua origem tanto em impurezas contidas no próprio coagulante quanto no solo do Distrito Federal, que é rico em ferro.

Não se observou diferença significativa na concentração de alumínio das amostras analisadas, indicando, mais uma vez, que a pouca eficiência observada com o uso do lodo

da ETA Rio Descoberto pode mesmo estar associada a uma maior dificuldade de solubilização do alumínio contido nesse lodo.

Tabela 5.4 - Características físico-químicas do lodo utilizado na etapa de ensaios de sedimentação e flotação

Parâmetros	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média
SST (%)	21,7	21,9	21,9	21,8
SSV (%)	26,9	26,6	26,5	26,6
SSF (%)	73,1	73,4	73,5	73,4
Lantânio (% ST)	0,0025	0,0034	0,0025	0,0028
Ítrio (% ST)	0,0013	0,0021	0,0020	0,0018
Titânio (% ST)	0,2320	0,2526	0,2350	0,2399
Cálcio (% ST)	0,1278	0,1567	0,1446	0,1430
Vanádio (% ST)	0,0108	0,0203	0,0192	0,0168
Magnésio (% ST)	0,1300	0,1516	0,1399	0,1405
Ferro (% ST)	6,2267	6,6133	6,1373	6,3258
Zircônio (% ST)	0,0215	0,0232	0,0213	0,0220
Cobre (% ST)	0,0021	0,0023	0,0024	0,0023
Alumínio (% ST)	11,7105	12,1476	11,4586	11,7723
Cromo (% ST)	0,0059	0,0065	0,0052	0,0059
Manganês (% ST)	0,0631	0,0680	0,0589	0,0633
Bário(% ST)	0,0230	0,0239	0,0245	0,0238
Zinco (% ST)	0,0102	0,0115	0,0096	0,0104
Cadmio (% ST)	0,0032	0,0051	0,0062	0,0048
Praseodímio (% ST)	0,0659	0,0647	0,0546	0,0617
Molibdênio (% ST)	-	0,0030	0,0024	0,0027

5.3 - Resultados dos ensaios de flotação e de sedimentação - ETEB Sul

Seguindo a metodologia proposta no capítulo 4, os ensaios de flotação e de sedimentação foram desenvolvidos em séries que incluíram as etapas e as condições operacionais descritas nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Foram desenvolvidas cinco séries de experimentos (ensaios de sedimentação e flotação) utilizando-se o efluente do tratamento secundário da ETEB Sul. Algumas dessas séries ficaram incompletas, por problemas operacionais como defeito no compressor de ar do equipamento de flotação e volume de amostra de efluente insuficiente. As condições

operacionais e os resultados de cada etapa desses experimentos estão apresentados no apêndice C. Nas seções seguintes, apresentam-se as análises dos resultados de cada etapa desses experimentos para o conjunto de dados obtidos.

5.3.1 - Caracterização das amostras

As amostras utilizadas apresentaram características diferenciadas, principalmente com relação à concentração de fósforo, como mostra a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Características das amostras do efluente secundário da ETEB Sul utilizadas nos experimentos

	Exp 01	Exp 02	Exp 03	Exp 04	Exp 05
Data da coleta	23/09/2002	08/10/2002	15/10/2002	22/10/2002	10/11/2002
pH	6,9	7,1	7,1	6,6	7,2
Turbidez (uT)	11,1	24,6	12,3	15,1	6,0
P _T (mg P/L)	1,8	3,5	-	2,1	3,0
Orto (mg P/L)	0,3	0,9	0,9	0,7	2,2
DQO (mg/L)	55	-	-	67	48
SST (mg/L)	-	-	-	35	5

Legenda: Exp-experimento, P_T-Fósforo total, Orto-Ortofosfato.

Estudos desenvolvidos por Pinto Filho (1999), indicaram que os valores médios para as concentrações de DQO, ortofosfato e sólidos em suspensão para o efluente do tratamento secundário da ETEB Sul são respectivamente 87 mg/L, 0,75 mg P/L e 26 mg/L.

A primeira amostra, coletada às 15:00 hs do dia 23/09/2002, apresentou uma concentração de ortofosfato bem abaixo da média observada por Pinto Filho (1999), o que tornou os ensaios de sedimentação e de flotação pouco sensíveis, dificultando as análises comparativas entre esses processos. Por esse motivo, a partir daí, as coletas passaram a ser feitas nos horários de maior concentração de fósforo, como foi o caso da amostra do dia 10/11/2002, cuja coleta ocorreu às 20:00 hs, horário identificado por Pinto Filho (1999) como sendo de pico de concentração de fósforo.

5.3.2 - Ensaio de sedimentação

Nos ensaios de sedimentação, foram avaliados os aspectos relativos à dosagem de coagulante e à taxa de aplicação hidráulica, tanto para o caso do sulfato de alumínio como para suspensão de lodo acidificado, que a partir de agora será identificada apenas como LETA, quando aplicados como coagulantes no processo polimento químico para remoção de fósforo do efluente do tratamento secundário da ETEB Sul. Após a definição das condições operacionais “ótimas” do processo, avaliou-se a eficiência desse processo.

Nos testes para avaliação da dosagem ótima de coagulante, foram mantidas as condições operacionais indicadas na Tabela C.2 do apêndice C e variou-se apenas a dosagem de coagulante aplicado. Nessa etapa, considerou-se como dosagem ótima aquela que levou à menor concentração de ortofosfato residual, ou a valores inferiores a 0,1 mg P/L, de modo a atender ao padrão de lançamento preconizado pela CAESB para o efluente da ETE Sul.

Na Figura 5.6, são apresentadas as concentrações de ortofosfato residual em função da dosagem de sulfato de alumínio e de LETA.

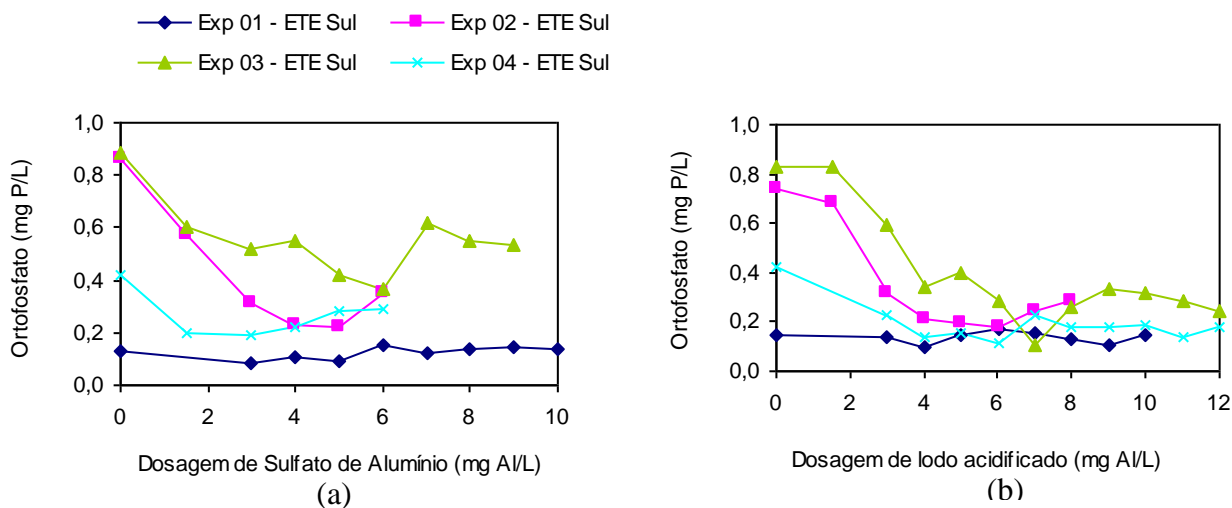


Figura 5.6 - Ensaio de sedimentação - ETEB Sul: Residuais de ortofosfato em função da dosagem (a) de sulfato de alumínio e (b) de LETA.

Observa-se que, com exceção do experimento 01, onde a pequena concentração de ortofosfato na amostra bruta tornou os ensaios pouco sensíveis, as curvas apresentadas passam por pontos de inflexão indicando que inicialmente a eficiência de remoção de ortofosfato do processo aumenta em função do aumento da dosagem de coagulante, mas a

partir de um ponto, considerado como de dosagem ótima, parece ocorrer uma reversão no processo com redução da eficiência de remoção de fósforo e turbidez. A Figura 5.7 apresenta as dosagens ótimas de sulfato de alumínio e de lodo acidificado identificadas nos ensaios de sedimentação.

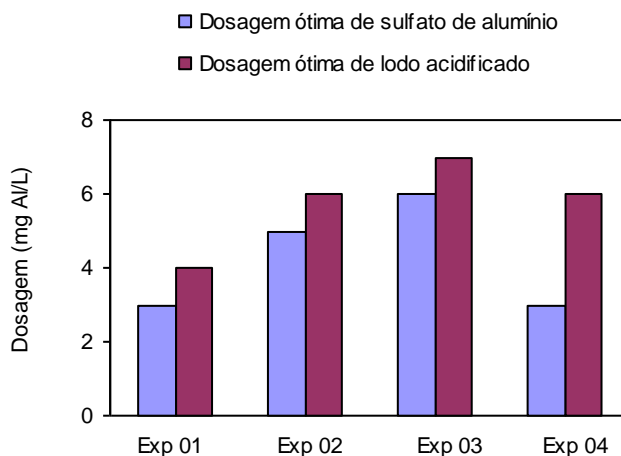


Figura 5.7 - Ensaio de sedimentação - ETEB Sul: Dosagem ótima de coagulante.

As dosagens definidas como ótimas para o LETA foram sempre maiores que aquelas definidas para o sulfato de alumínio, sugerindo que nem todo o alumínio existente no lodo está sendo disponibilizado para reagir com o fósforo presente na amostra de esgoto tratada. Observou-se ainda que no caso do experimento 04 a dosagem ótima de LETA foi praticamente o dobro da dosagem ótima de sulfato de alumínio, enquanto que, nos demais experimentos, essa diferença não ultrapassou a 35%. A redução na capacidade do alumínio presente no lodo em reagir com o fósforo nesse experimento pode ser justificada pelo envelhecimento do lodo armazenado, fato já observado por Galarneau e Gehr (1997). Quando da realização do experimento 04, a amostra de lodo estava armazenada por mais de 30 dias.

Outro importante parâmetro monitorado ao longo da etapa de variação da dosagem de coagulante foi a turbidez. Esse parâmetro foi monitorado com o objetivo de verificar a correlação entre a variação da concentração residual de fósforo e de turbidez. Devido à rapidez e a facilidade de se medir a turbidez de uma amostra, busca-se, sempre que possível, utilizar esse parâmetro como indicador de eficiência do processo. As Figuras 5.8 e 5.9 mostram as variações dos parâmetros de turbidez, ortofosfato e fósforo total em função da dosagem de coagulantes: sulfato de alumínio e LETA.

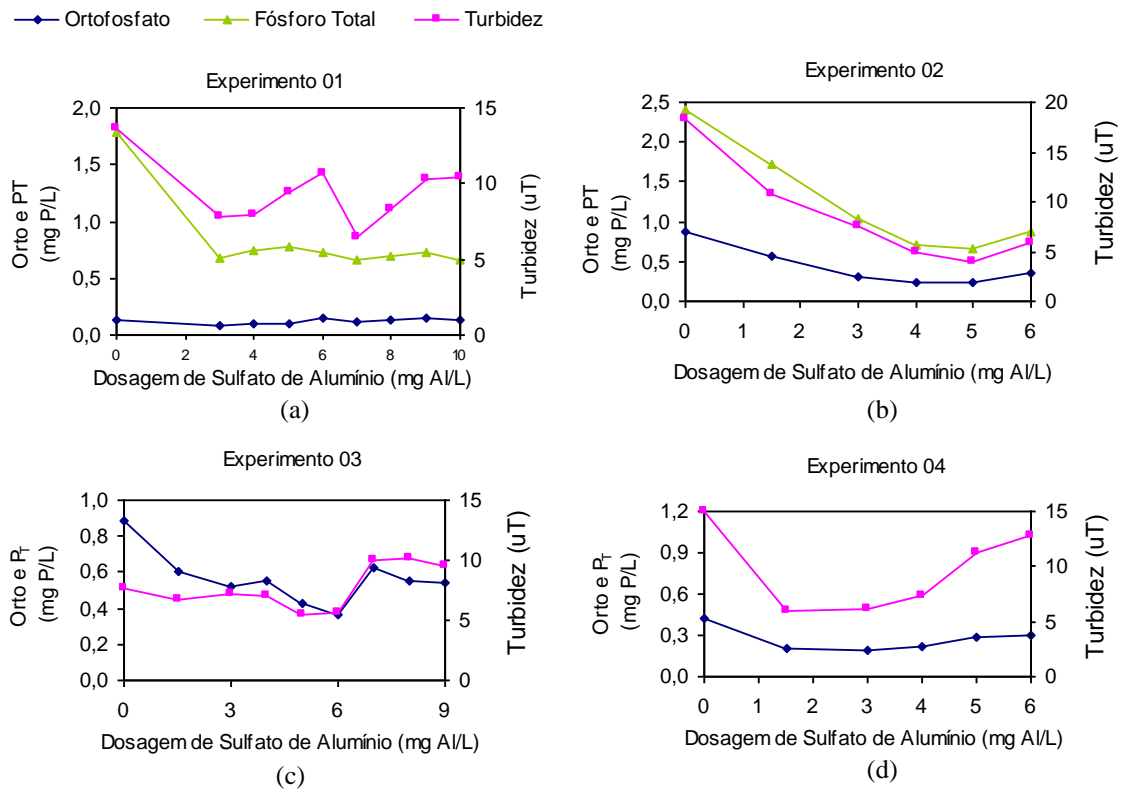


Figura 5.8 - Ensaio de sedimentação – ETEB Sul: Residual de fósforo total, ortofosfato e turbidez em função da dosagem de sulfato de alumínio, observada nos experimentos (a) 01, (b) 02, (c) 03 e (d) 04.

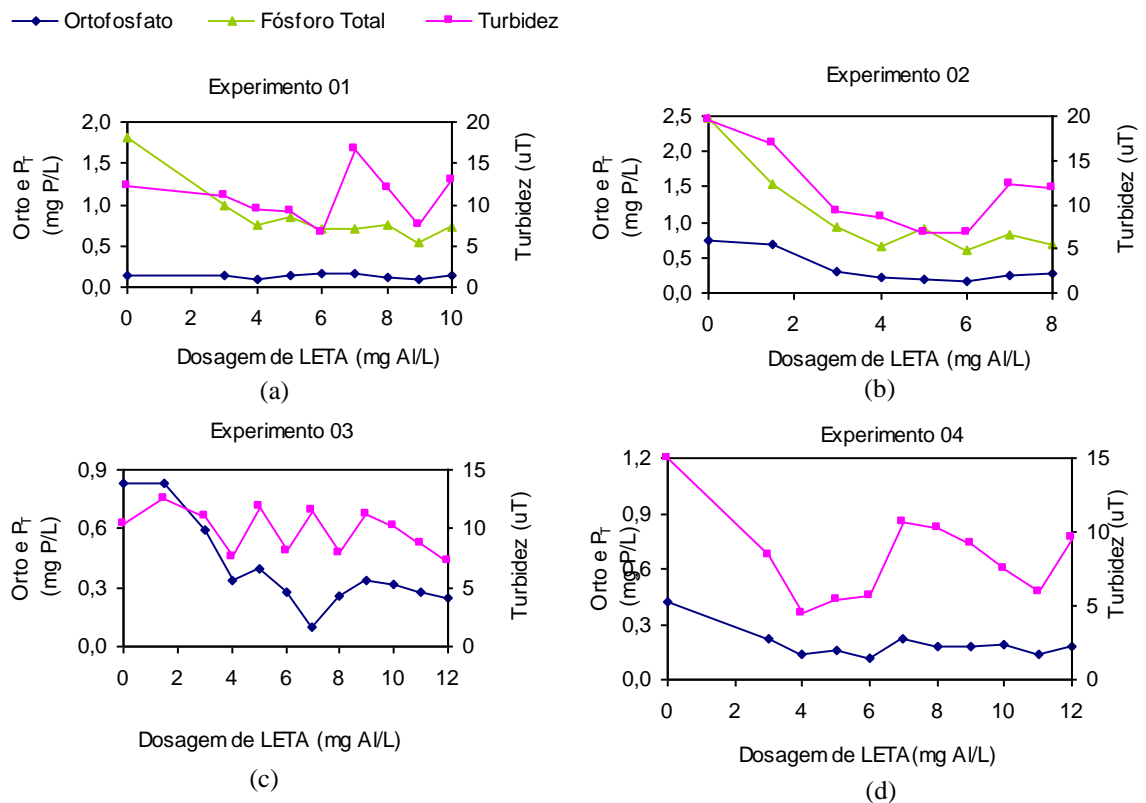


Figura 5.9 - Ensaio de sedimentação – ETEB Sul: Residual de fósforo total, ortofosfato e turbidez em função da dosagem de LETA, observada nos experimentos (a) 01, (b) 02, (c) 03 e (d) 04.

Como pode ser observado na Figura 5.8, no caso do uso do sulfato de alumínio como coagulante, em geral, a variação da turbidez segue a mesma tendência de variação da concentração de ortofosfato e de fósforo total. É o que ocorre no caso dos experimentos apresentados nas Figuras 5.8(b) e 5.8(d), onde as correlações entre as variáveis ortofosfato e turbidez, obtidas a partir de gráficos construídos com os valores residuais de ortofosfato versus residuais de turbidez, levou a retas com índice de ajuste linear de 96 e 99% respectivamente. Já no caso do uso do LETA, cujos resultados estão apresentados na Figura 5.9, essa correlação não é tão forte, atingindo valores de 88 e 76% para os experimentos apresentados nas Figuras 5.9b e 5.9d respectivamente. Isso pode estar ocorrendo pelo fato do lodo, ao ser adicionado à amostra para agir como coagulante, acrescentar turbidez à amostra.

Na etapa de avaliação da influência da taxa de aplicação superficial (T_A) na eficiência do processo de sedimentação, variou-se a T_A fixando-se as demais condições operacionais, conforme descrito na Tabela 4.4. Como coagulante, utilizou-se o sulfato de alumínio e o LETA, sempre nas dosagens ótimas definidas anteriormente. Como parâmetros de controle da eficiência do processo, foram analisados, no sobrenadante, a turbidez, a concentração de ortofosfato e, em alguns casos, a concentração de fósforo total. A Figura 5.10 apresenta o comportamento desses parâmetros em função da variação da T_A . Como era de se esperar, a eficiência do processo melhorou progressivamente na medida em que a T_A foi sendo reduzida.

Taxas de aplicação da ordem de 10 m/dia foram consideradas satisfatórias, pois o efluente produzido nessa condição atendeu de maneira mais consistente os limites de concentração de fósforo estabelecidos para o efluente do polimento final da ETEB Sul, descritos na Tabela 4.1. Segundo Metcalf & Eddy (1991) a taxa de aplicação para decantadores utilizados na separação de flocos resultantes do tratamento químico deve variar de 24 a 48m/dia. Para essas taxas, a turbidez e a concentração de fósforo residuais alcançadas nos ensaios desenvolvidos com o efluente da ETEB Sul não apresentou resultados satisfatórios, qualquer que fosse o coagulante adotado, como é mostrado na Figura 5.10.

Na figura 5.10b observa-se que, nos resultados do experimento 03, a eficiência do processo de remoção de fósforo apresentou uma redução significativa quando a taxa de aplicação

superficial mudou de $50 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}^{-1}$ para $25 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}^{-1}$, evidenciando aí um erro experimental.

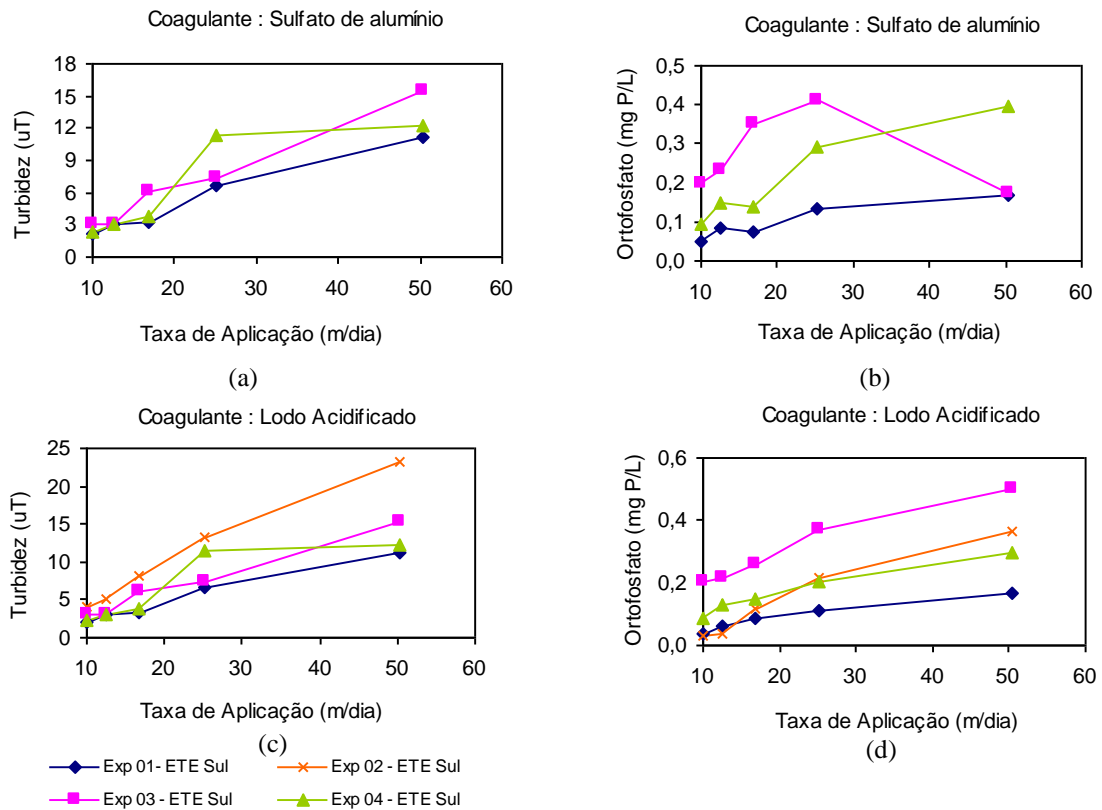
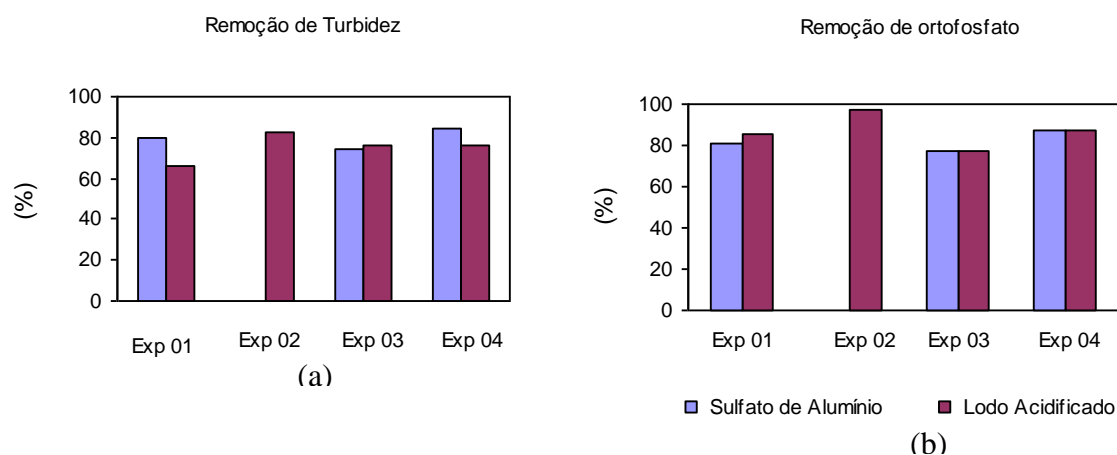


Figura 5.10 - Ensaio de sedimentação - ETEB Sul: (a) residuais de turbidez e (b) de ortofosfato em função da taxa de aplicação superficial, utilizando o sulfato de alumínio como coagulante; (c) residuais de turbidez e (d) de ortofosfato em função da taxa de aplicação superficial, utilizando o LETA como coagulante.

Na Figura 5.11 são mostrados os valores de eficiência de remoção de ortofosfato e de turbidez alcançados nos ensaios de sedimentação, realizados nas condições ótimas definidas anteriormente.

Observa-se que, para as condições operacionais “ótimas”, a eficiência de remoção de ortofosfato e de turbidez alcançada para o LETA é similar à do sulfato de alumínio, em torno de 80%. Cabe ressaltar aqui que as dosagens “ótimas” definidas anteriormente para esses dois coagulantes também foram similares, conforme mostra a Figura 5.7.



Exp01(Po=0,27mg/L;To=11,1uT);Exp02(Po=0,92mg/L;To=3,51uT)
 Exp 03(Po=0,92mg/L;To=3,51uT);Exp04(Po=0,92mg/L; To=3,51uT)
 Po=Ortofosfato inicial To=Turbidez inicial

Figura 5.11 - Ensaio de sedimentação - ETEB Sul: (a) Eficiência de remoção de turbidez e (b) de ortofosfato para taxa de aplicação superficial “ótima” e dosagem “ótima” de sulfato de alumínio e LETA

A Tabela 5.6 apresenta os resultados dos ensaios de sedimentação desenvolvidos no experimento 04. Nesse experimento, para as condições operacionais ótimas definidas anteriormente, além da eficiência de remoção de fósforo e de turbidez, avaliou-se também a eficiência de remoção de sólidos em suspensão, que ficou próxima de 90% para os dois coagulantes testados.

Ainda no experimento 04, foram analisadas as características do lodo gerado no processo de sedimentação. Na caracterização desse lodo foram avaliados os parâmetros: V_L -volume de lodo gerado por litro de efluente tratado e concentração de sólidos em suspensão totais. A determinação do volume de lodo foi feita a partir da definição da área superficial da cubeta e da leitura da espessura de lodo sedimentado. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.6. Observa-se que o uso do LETA resultou na formação de um menor volume de lodo por volume de efluente tratado, além de apresentar maior concentração de sólidos no lodo gerado. Essas características do lodo podem ter interferências positivas no processo de desidratação desse lodo.

Tabela 5.6 - Ensaio de sedimentação - Experimento 04 - ETEB Sul: Características do afluente, do efluente e do lodo gerado no processo de sedimentação em condições operacionais “ótimas”.

Parâmetros		Amostra Bruta	Residual esperado	Residual após a sedimentação	
				Sulfato	Lodo
pH		6,6	-	6,1	5,6
Turbidez	(uT)	15,1uT	-	2,4	3,6
	E (%)			84	76
Orto	(mg P/L)	0,67mgP/L	0,1mgP/L	0,09	0,09
	E (%)			87	87
SST _L	(mg/L)	35mg/L	10mg/L	4	2
	E (%)			89	94
SST _S	(mg/L)	-	-	459	855
V _L (cm ³ /L)		-	-	63	31
P _L (mg/cm ³)		-	-	7	28

Legenda: Orto: Ortófosfato, SST_L: Sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_S: Sólidos em suspensão totais na fase sólida, VL: Volume de lodo gerado por litro de efluente tratado, PL: Produção líquida de lodo.

5.3.3 – Ensaio de flotação

Seguindo a metodologia proposta no capítulo 4, os ensaios de flotação foram desenvolvidos em 5 etapas onde foram avaliados os seguintes parâmetros: a) dosagem de coagulante, adotando-se como coagulante o LETA e o sulfato de alumínio, b) taxa de aplicação superficial, c) taxa de recirculação, d) tempo de floculação, e) avaliação da eficiência do processo operando em condições ótimas.

A Figura 5.12 apresenta os resultados dos testes desenvolvidos com o objetivo de definir as dosagens ótimas para cada experimento. As condições operacionais adotadas nessa etapa dos experimentos estão descritas na Tabela C.7 do apêndice C.

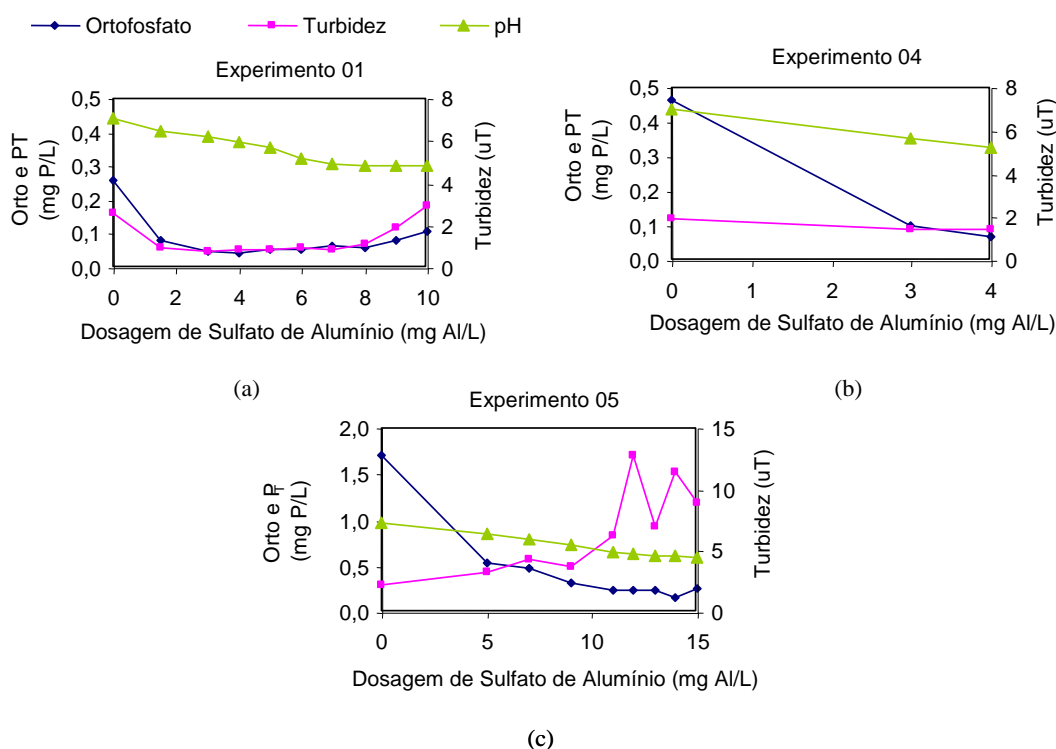


Figura 5.12 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: Residuais de ortofosfato, fósforo total e turbidez em função da dosagem de sulfato de alumínio, observada nos experimentos (a) 01, (b) 04 e (c) 05.

Assim como nos ensaios de sedimentação, a dosagem definida como ótima foi aquela que levou à menor concentração de ortofosfato residual, ou a valores inferiores a 0,1 mg P/L. Nos resultados dos Experimentos 01 e 04, apresentados nas Figuras 5.12(a) e 5.12(b), observa-se que a concentração de ortofosfato residual atingiu valores inferiores a 0,1 mg P/L para dosagens de sulfato de alumínio em torno de 4 mg Al/L. Nesses experimentos a concentração de ortofosfato da amostra bruta não ultrapassou 0,5 mg P/L. Já no Experimento 05, Figura 5.12(c), onde a amostra bruta apresentou concentração de ortofosfato residual superior a 1,5 mg P/L, os menores resultados dos ensaios ocorreram para a dosagem de 14 mg Al/L.

Em experimentos similares, utilizando o mesmo efluente do tratamento secundário da ETEB Sul, Pinto Filho (1999) concluiu que a faixa de dosagem ótima do sulfato de alumínio no processo de flotação por ar dissolvido deve variar de 3,9 a 5,5mg Al/L. Para os experimentos 01 e 04, a dosagem ótima determinada no presente estudo, 4 mg Al/L, ficou dentro da faixa estabelecida por Pinto Filho (1999), uma vez que as concentrações de

ortofosfato das amostras eram próximas da média observada para o efluente da ETEB Sul. Já no caso do experimento 05, a dosagem de 14 mg Al/L extrapolou muito essa faixa, isso ocorreu porque a concentração de ortofosfato da amostra utilizada no experimento 05 era muito superior à média observada no efluente secundário da ETEB Sul.

A turbidez se comportou de maneira diferente para cada um dos experimentos desenvolvidos. No Experimento 01, a variação da concentração de ortofosfato e da turbidez ocorreu de maneira similar. Já no experimento 02, a turbidez, que já era muito pequena na amostra bruta, manteve-se praticamente constante ao longo do ensaio. No Experimento 05, a turbidez passou a aumentar à medida que a concentração de ortofosfato diminuía. Esse aumento na turbidez residual para dosagens mais altas também foi observado em alguns experimentos de flotação desenvolvidos por Pinto Filho (1999), utilizando o mesmo efluente da ETEB Sul.

A Figura 5.13 mostra os resultados dos ensaios de flotação utilizando-se o efluente secundário da ETEB Sul e o LETA como coagulante do processo.

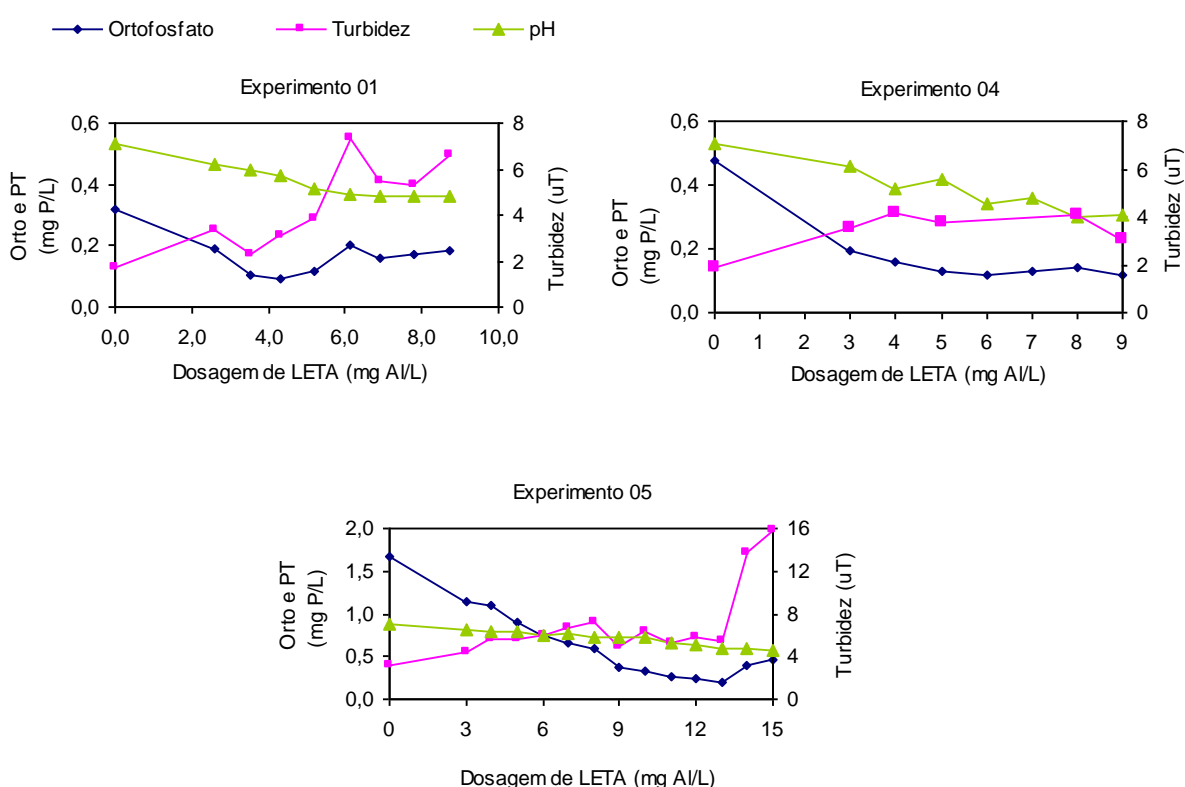


Figura 5.13 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: Variação da concentração de ortofosfato em função da dosagem de LETA, observada nos experimentos (a) 01, (b) 04 e (c) 05.

As dosagens ótimas definidas para cada experimento de flotação são mostradas na Figura 5.14.

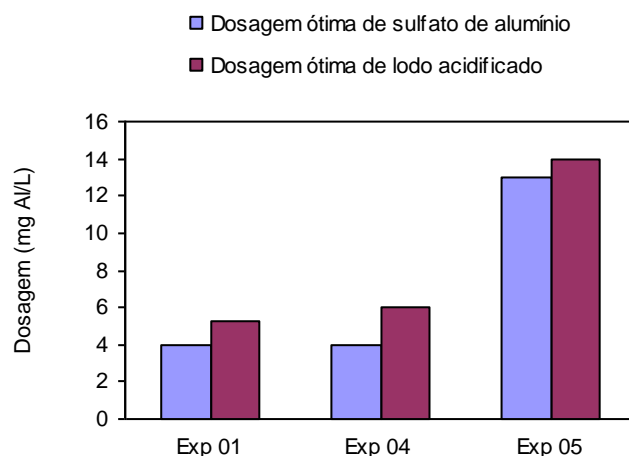


Figura 5.14 - Ensaio de flotação - ETEB Sul - Dosagem ótima de coagulante

Observa-se que, no caso do uso do LETA, a turbidez residual não pode ser utilizada como indicativo de eficiência do processo para remoção de fósforo, já que a variação desse parâmetro se comportou de maneira bem diferente da concentração de ortofosfato. Assim como ocorreu com o uso do sulfato de alumínio, o aumento da dosagem do LETA implica em um aumento na eficiência de remoção de ortofosfato, até que a dosagem ótima seja atingida, a partir daí, o aumento da dosagem passa a interferir de maneira negativa na eficiência do processo.

Nos experimentos 01 e 04, como as concentrações de ortofosfato das amostras brutas eram próximas, as dosagens ótimas encontradas também foram similares, tanto com o uso do LETA, como no caso do coagulante ser o sulfato de alumínio. No experimento 05, a maior concentração de ortofosfato na amostra bruta levou a uma dosagem de coagulante também maior. Observa-se ainda que, em todos os experimentos, as dosagens de lodo foram maiores que as de sulfato, indicando, como já mencionado, que nem todo o alumínio contido no lodo ficou disponível para reagir com o fósforo.

Nessa segunda etapa, avaliou-se a influência da variação da taxa de aplicação hidráulica na eficiência do processo de remoção química de fósforo. Para tanto, fixadas as condições operacionais conforme descrito na Tabela 4.5, variou-se apenas a taxa de aplicação. O

coagulante utilizado foi o LETA e a dosagem adotada foi a dosagem ótima. Os parâmetros monitorados nessa etapa foram: turbidez e concentração de ortofosfato. Os resultados dessa etapa experimental são apresentados na Figura 5.15.

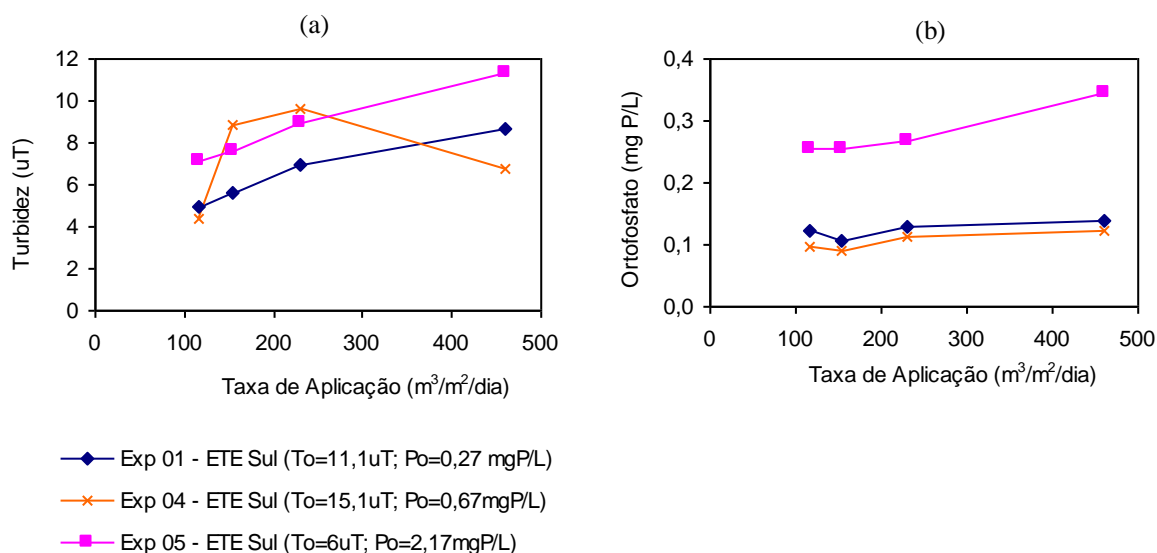


Figura 5.15 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: (a) Residuais de turbidez e (b) ortofosfato em função da variação da taxa de aplicação.

A taxa de aplicação definida como ótima foi aquela que levou a concentrações de ortofosfato a valores inferiores a 0,1 mg Al/L ou ao menor valor encontrado. Considerando-se essa definição, observa-se que, em todos os casos, a taxa de aplicação a ser considerada ótima é a de 154 m/dia.

Como é possível observar na Figura 5.15(b), o ganho na eficiência do processo de remoção de fósforo foi inferior a 0,05 mg/L quando variamos a taxa de aplicação superficial do processo de flotação de 350 para 150 $m^3/m^2.dia^{-1}$. Esses resultados são consistentes com aqueles obtidos nos experimentos desenvolvidos por Pinto Filho (1999), onde se observou que o processo de flotação por ar dissolvido aplicado ao polimento final do efluente do tratamento secundário da ETEB Sul mostrou-se estável para taxas de aplicação superficial de até 389 m/dia.

Com exceção do experimento 04, nos demais casos a variação da turbidez acompanhou a tendência de variação da concentração de ortofosfato, indicando que quando se trabalha

com a dosagem ótima de coagulante, parece ser possível adotar-se a turbidez como indicador da eficiência de remoção de ortofosfato.

Na avaliação da influência da variação da taxa de recirculação sobre a eficiência do processo de flotação aplicado à remoção de fósforo do efluente secundário da ETEB Sul, fixou-se a dosagem ótima e a taxa de aplicação ótima definidas anteriormente para cada experimento, além das demais condições operacionais descritas na Tabela 4.5. Os parâmetros utilizados no monitoramento da eficiência do processo nessa etapa também foram a turbidez e a concentração de ortofosfato. Os resultados dessa etapa estão apresentados na Figura 5.16.

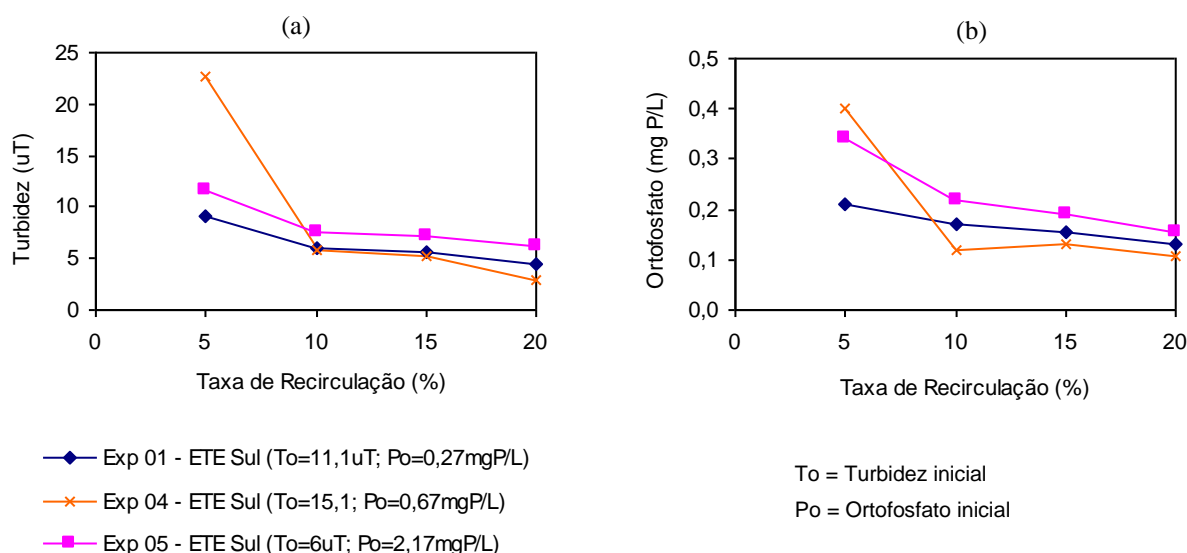


Figura 5.16 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: (a) Residuais de turbidez e (b) ortofosfato em função da variação da taxa de recirculação, adotando a dosagem “ótima” de LETA.

Observa-se que, para taxa de recirculação de 5%, a eficiência do processo é bastante reduzida. A partir de 10%, o ganho de eficiência do processo em função do aumento da taxa de recirculação é menos significativo. Seguindo o mesmo critério estabelecido nas etapas anteriores, a taxa de recirculação adotada como ótima, foi aquela em que a concentração de ortofosfato residual ficou menor que 0,1mg/L ou aquela que levou ao melhor desempenho do processo. Segundo esse critério, a taxa de recirculação considerada ótima nos três experimentos de flotação desenvolvidos, foi sempre a de 20%. Esses resultados estão de acordo com o que observou Pinto Filho (1999), que utilizando o sulfato de alumínio no polimento final do efluente secundário da ETEB Sul, indicou as taxas de

recirculação entre 10 e 20% como sendo as mais adequadas para a separação de fases pelo processo de flotação por ar dissolvido.

Da mesma forma que ocorreu na etapa de avaliação da taxa de aplicação, quando se trabalha com dosagem de coagulante fixa e taxa de recirculação variável, observa-se que a variação da turbidez e da concentração de ortofosfato seguem a mesma tendência, o que está mostrado na Figura 5.16.

A Figura 5.17 apresenta os resultados da etapa dos ensaios de flotação onde se avaliou a influência da variação do tempo de floculação sobre a eficiência do processo de flotação aplicado ao polimento químico do efluente secundário da ETEB Sul.

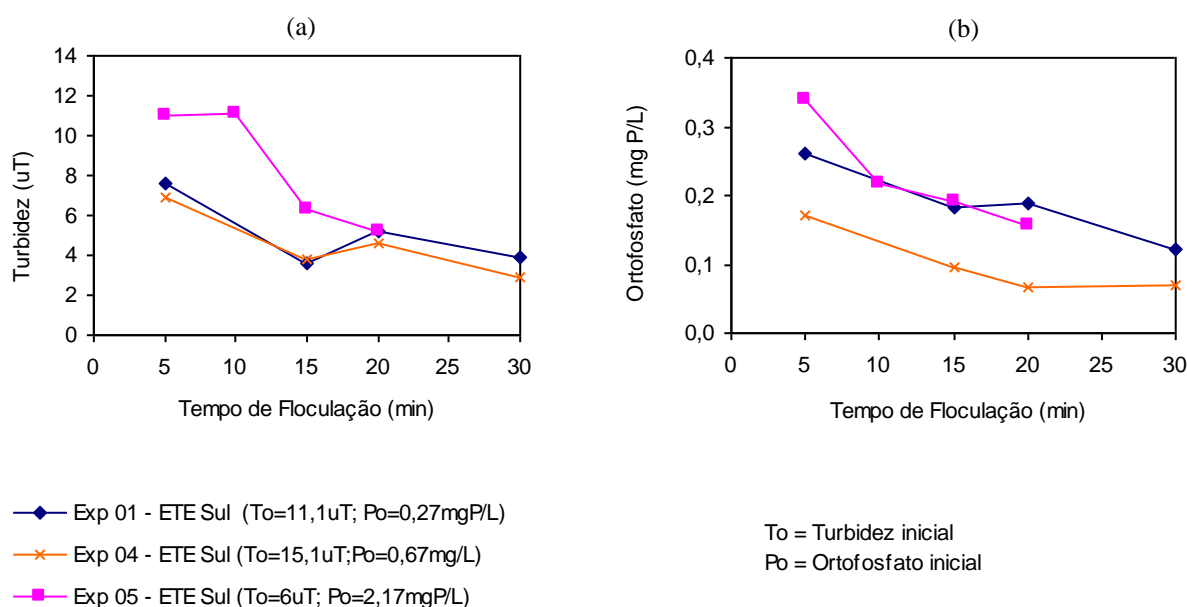


Figura 5.17 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: (a) Residuais de turbidez e (b) ortofosfato em função da variação do tempo de floculação e adotando a dosagem “ótima” de LETA.

Verifica-se que o tempo de floculação está diretamente relacionado à melhoria da eficiência do processo e que a variação da turbidez também segue a mesma tendência da variação da concentração de fósforo. Seguindo os mesmos critérios adotados nas etapas anteriores, foi considerada como taxa de floculação ótima aquela que levou a concentrações de ortofosfato inferiores a 0,1 mg P/L ou à menor concentração desse composto, o que correspondeu sempre aos maiores tempos adotados nos experimentos, ou seja, a 30min para o experimento 01 e a 20 min para os experimentos 04 e 05.

Nos experimentos desenvolvidos por Pinto Filho (1999), os resultados indicaram que, as maiores eficiências de remoção de fósforo no efluente secundário da ETEB Sul também foram alcançadas com adoção de tempos de floculação maiores ou iguais a 15 min.

Nessa etapa de avaliação do processo de flotação aplicado ao polimento final do efluente secundário da ETEB Sul, analisou-se a eficiência do processo operando nas condições ótimas definidas nas etapas anteriores, adotando como coagulante o lodo acidificado e o sulfato de alumínio, também nas dosagens ótimas definidas anteriormente. Foram analisados os parâmetros de turbidez, ortofosfato, fósforo total, DQO e SS. A Figura 5.18 apresenta os resultados obtidos nos experimentos 04 e 05. As Tabelas C.51 e C.63 do apêndice C descrevem as condições operacionais adotadas nessa etapa dos experimentos 04 e 05, respectivamente.

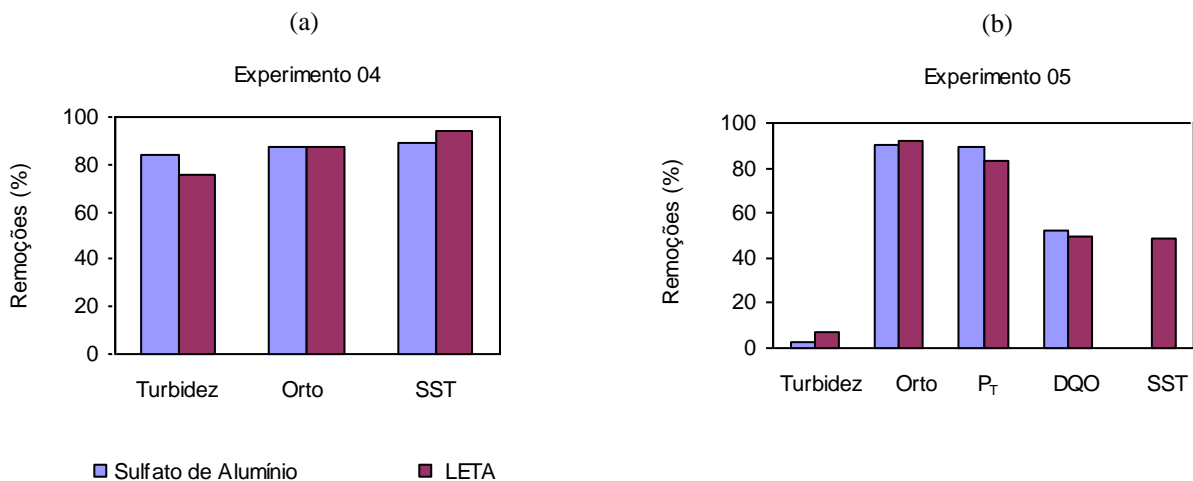


Figura 5.18 - Ensaio de flotação - ETEB Sul: Eficiência do processo em condições operacionais ótimas, observadas nos experimentos 04 (a) e 05 (b).

Observa-se na Figura 5.18 que, no experimento 05, a eficiência do processo foi muito reduzida, inferior a 10%, para o caso de remoção de turbidez. No entanto, para a mesma amostra, a eficiência de remoção de sólidos em suspensão totais, observada no caso do uso do lodo acidificado como coagulante, foi de aproximadamente 50%. Esse fato pode estar associado a algum erro experimental ou ainda pode ser explicado pelo fato que, enquanto a medida de SS esta relacionada à massa de sólidos em suspensão presente na amostra, a turbidez esta relacionada ao número, tamanho e forma das partículas em suspensão. Assim, no experimento 05, pode ter ocorrido uma alteração nas características da partícula

ao longo dos processos de coagulação e floculação fazendo que a redução na massa de partículas, traduzida pela redução de cerca de 50% na concentração de partículas em suspensão, não tenha sido acompanhada pela redução de número significativo de partículas em suspensão de pequeno tamanho.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados dos ensaios de flotação desenvolvidos ao longo dos experimentos 04 e 05.

Tabela 5.7 - Ensaios de flotação - Experimentos 04 e 05 - ETEB Sul: Características da amostra bruta, do sobrenadante e do lodo gerado no processo de flotação, operando em condições “ótimas” e valores residuais esperados.

Parâmetros		Experimento 04			Experimento 05			Residual Esperado
		Amostra Bruta	Residual após a Flotação		Amostra Bruta	Residual após Flotação		
			Sulfato	Lodo		Sulfato	Bruta	
pH		6,6	4,9	4,3	7,2	4,5	4,7	-
Turbidez	(uT)	15,1uT	2,2	4,2	6,0	5,8	5,6	-
	E (%)		85	72	-	3	7	
Orto	(mg P/L)	0,67mg P/L	0,08	0,08	2,17	0,21	0,17	0,1mg P/L
	E (%)		88	88	-	90	92	
P _T	(mg P/L)	2,14mg P/L	0,19	0,20	3,00	0,33	0,28	0,3mg P/L
	E (%)		91	91	-	89	91	
DQO	(mg/L)	67	23,5	22,2	48	23	24	45mg/L
	E (%)	-	65	67	-	52	50	
SST _L	(mg/L)	35	2	9	10,3	10,8	5,3	10mg/L
	E (%)	-	94	74	-	-4	49	
SST _S	(mg/L)	-	2011	6765	-	3099	4931	-
V _L (cm ³ /L)		-	17	14	-	21	17	-
P _L (mg/cm ³)		-	118	483	-	148	290	-

Legenda: Orto: Ortofosfato, SST_L: Sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_S: Sólidos em suspensão totais na fase sólida, VL: Volume de lodo gerado por litro de efluente tratado, PL: Produção líquida de lodo.

A eficiência do processo de flotação utilizando o lodo acidificado como coagulante ficou sempre muito próxima da eficiência alcançada com o uso do sulfato. Em termos de DQO, a eficiência observada foi pequena, variando de 50 a 67%. No entanto, as concentrações residuais observadas atingiram os níveis desejados. Ocorre que, no efluente do tratamento secundário, as concentrações de DQO já são bastante baixas, além disso a parcela de DQO remanescente é a mais difícil de ser removida, daí a baixa eficiência observada para esse parâmetro, qualquer que seja o coagulante adotado.

Com relação aos resíduos sólidos gerados no processo de flotação, observa-se na Tabela 5.7 que, assim como ocorreu no processo de sedimentação, quando se utiliza o LETA como coagulante, o lodo flotado gerado no processo se apresenta em menor volume e com maior concentração de sólidos em suspensão que aquele gerado a partir do uso do sulfato de alumínio.

5.4 - Ensaio de flotação e de sedimentação - ETE Samambaia

Seguindo a metodologia proposta no capítulo 4, foram desenvolvidas três séries de experimentos de sedimentação e flotação utilizando-se o efluente da ETE Samambaia, com o objetivo de analisar a viabilidade de utilização do lodo de ETA como coagulante no processo de polimento químico do efluente da lagoa de maturação dessa unidade de tratamento.

No caso da ETE Samambaia, o polimento final tem o objetivo de remover não só o fósforo, mas, também, as algas geradas ao longo do processo de tratamento em lagoas. O parâmetro utilizado para monitorar a quantidade de algas existente nas amostras foi a clorofila-a.

As condições operacionais e os resultados de cada etapa desses experimentos estão descritos no apêndice C. Nas seções seguintes, serão apresentados e discutidos os resultados de cada etapa desses experimentos.

5.4.1 - Caracterização das amostras

Na ETE Samambaia as amostras foram coletadas na saída da lagoa de maturação. As características físico-químicas dessas amostras estão descritas na Tabela 5.8.

Comparando-se os dados apresentados na Tabela 5.8 com aqueles apresentados na Tabela 5.5 observa-se a grande diferença entre os efluentes do tratamento secundário da ETEB Sul e da ETE Samambaia, principalmente no que diz respeito a turbidez e à concentração de fósforo. Conforme foi mencionado anteriormente, espera-se, com isso, avaliar o espectro de possibilidades de aplicação do LETA como coagulante no processo de polimento final de diferentes efluentes do tratamento de esgotos.

Tabela 5.8 - Características das amostras do efluente secundário da ETE Samambaia utilizadas nos experimentos.

Data da coleta	Exp 01 25/11/2002	Exp 02 07/01/2003	Exp 03 20/01/2003	Valores médios*
pH	7,4	7,4	7,4	-
Turbidez (uT)	40,7	51,5	42,5	-
Orto (mg P/L)	10,8	6,1	6,3	5,22
DQO (mg/L)	117	171	129	206
SST (mg/L)	51	96	74	105
Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$)	1180	1748	1742	1698

Legenda: Exp-experimento, Orto-Ortofosfato.

* média observada no controle operacional da unidade no período de Setembro/1996 a Setembro/2000. Fonte: Felizatto (2000)

5.4.2 - Análise dos resultados dos ensaios de sedimentação

Os ensaios de sedimentação utilizando o efluente da ETE Samambaia também seguiram as etapas descritas nas Tabelas 4.2 e 4.3. Inicialmente foram definidas as dosagens e as taxas de aplicação “ótimas”, com o uso do sulfato de alumínio e do lodo desidratado. Em seguida, operando-se nas condições “ótimas” definidas anteriormente para os dois tipos de coagulantes, avaliou-se a eficiência do polimento químico, bem como as características do lodo gerado nesse processo.

Para a definição da dosagem ótima de coagulante, foram fixadas as condições operacionais descritas na Tabela C.66 do apêndice C, variando-se apenas a dosagem do coagulante. Nessa etapa foram monitorados os parâmetros de turbidez e concentração de ortofosfato para o controle da eficiência do processo.

A Figura 5.19 apresenta a variação da concentração de ortofosfato no sobrenadante dos ensaios de sedimentação com o efluente da ETE Samambaia, onde variou-se a dosagem de LETA e de sulfato de alumínio.

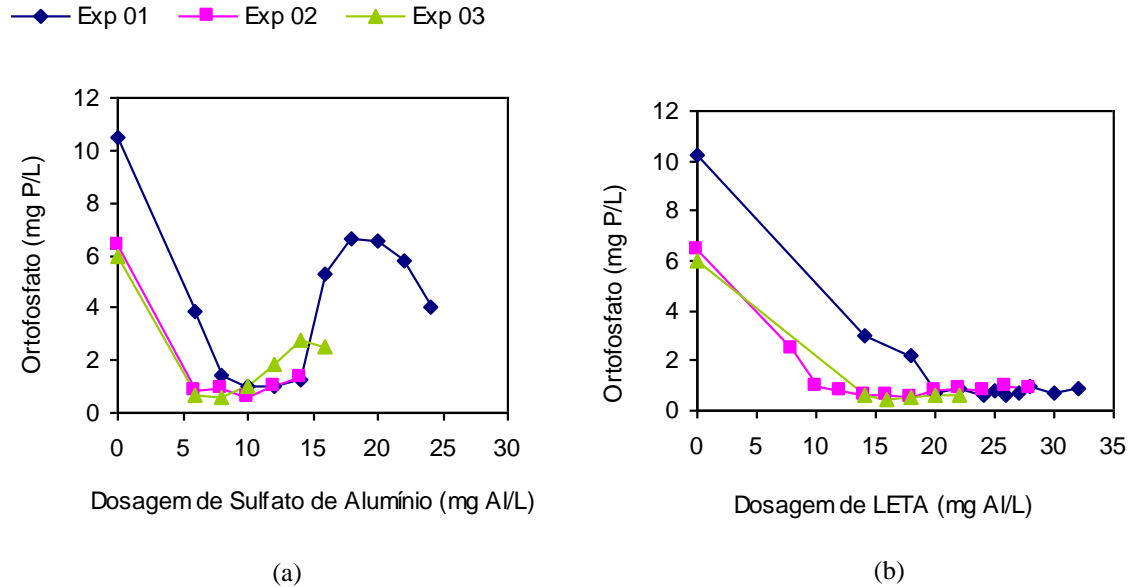


Figura 5.19 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Residual de ortofosfato em função da dosagem de (a) sulfato de alumínio e (b) LETA.

No caso do efluente da ETEB Samambaia, onde a concentração de ortofosfato na amostra bruta variou de 5 a 10mgP/L, o menor residual de ortofosfato alcançado foi de 0,2 mgP/L. Nos três experimentos desenvolvidos a faixa de dosagem ótima para o sulfato de alumínio ficou entre 5 e 15 mg Al/L enquanto a do lodo ficou entre 15 e 25 mg Al/L.

Ainda na Figura 5.19 é possível observar que, no caso do uso do sulfato de alumínio, o processo de remoção de fósforo sofre uma reversão a partir do ponto de dosagem ótima, sugerindo que o mecanismo de coagulação que deve estar predominando no processo é o de adsorção e neutralização de cargas, enquanto que, com o uso do lodo, o mecanismo de remoção predominante parece ser o de varredura, já que o processo não apresentou indícios de reestabilização para dosagem excessiva.

As dosagens ótimas adotadas para as demais etapas de cada experimento estão apresentadas na Figura 5.20. Foi considerada como “ótima”, a dosagem que levou à maior eficiência de remoção de ortofosfato do processo, ou a residuais de ortofosfato no sobrenadante próximos de 0,1mgP/L.

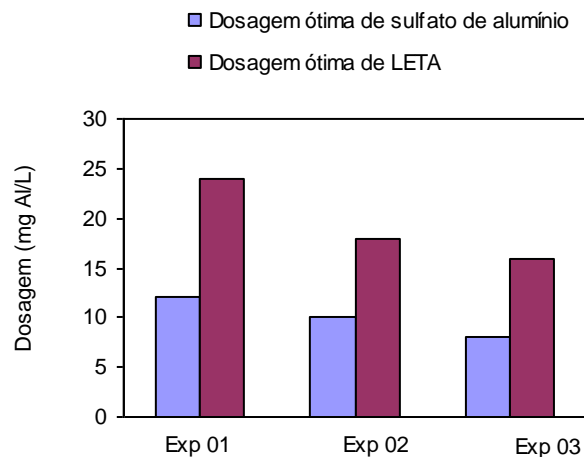


Figura 5.20 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Dosagem ótima de coagulante.

Segundo esse critério, as diferenças entre as dosagens ótimas de sulfato e de lodo observadas nesses experimentos foram maiores que aquelas apresentadas nos experimentos 01, 02 e 03 da ETEB Sul (ver Figura 5.7), sugerindo que pode ter ocorrido um processo de envelhecimento do lodo, a partir do 30º dia de armazenamento, data em que passou a ser observada uma redução da eficiência relativa do uso lodo em relação ao sulfato. Por outro lado, observa-se na Figura 5.19, que boas eficiências de remoção já foram alcançadas para dosagens inferiores à adotada como ótima. Na prática, a definição do nível de eficiência do processo irá depender das características do corpo receptor.

Nas Figuras 5.21 e 5.23 são apresentados os valores de turbidez e da concentração de ortofosfato em função da variação da dosagem de coagulante, tanto para o caso do uso do sulfato de alumínio, como para o caso do uso do LETA. Observa-se em todos os casos analisados uma forte correlação entre essas duas grandezas. Para a verificação da existência de correlação entre esses parâmetros foram traçados os gráficos apresentados nas Figuras 5.22 e 5.24, onde também estão indicadas as funções que relacionam essas duas grandezas e o coeficiente de ajuste dessa função (R^2). Observa-se um elevado grau de correlação entre as variações de turbidez e de ortofosfato residual.

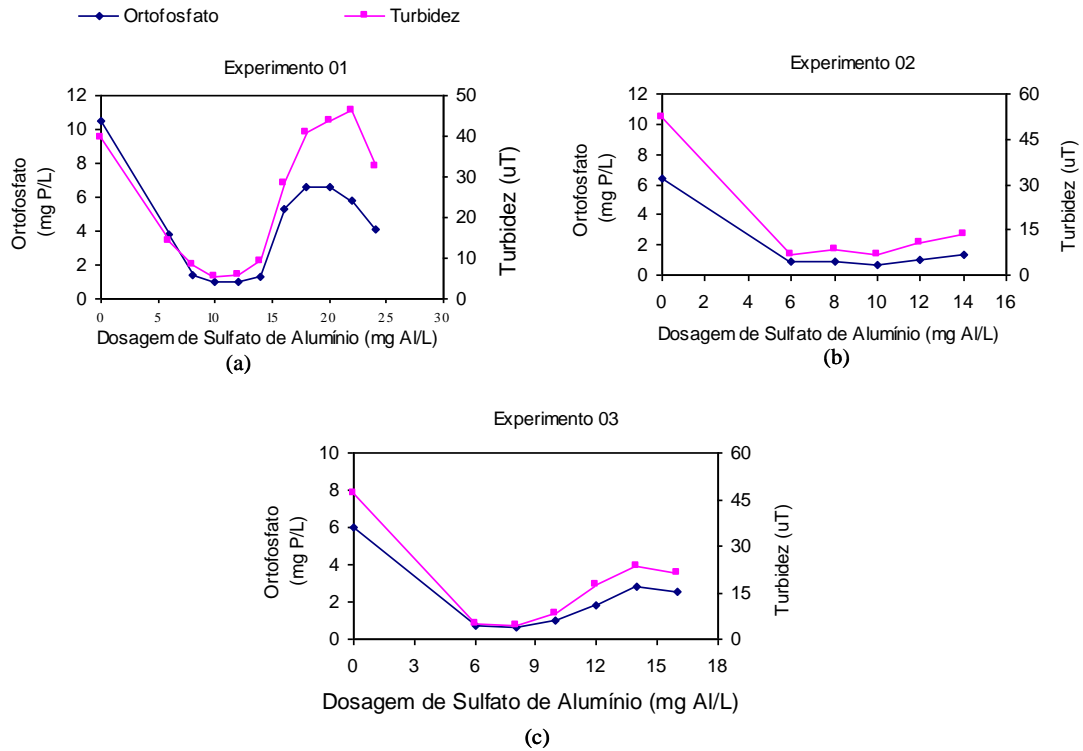


Figura 5.21 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Residual de turbidez e de ortofosfato em função da variação da dosagem de sulfato de alumínio, observados nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.

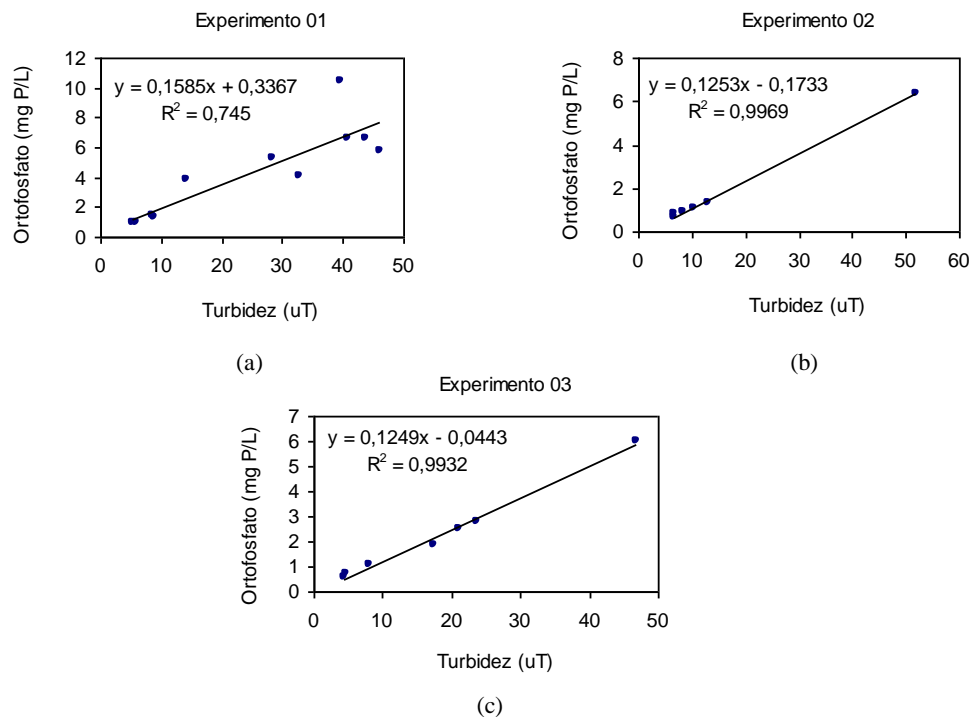


Figura 5.22 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Correlação entre os residuais de turbidez e ortofosfato em função da dosagem de sulfato de alumínio, observada nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.

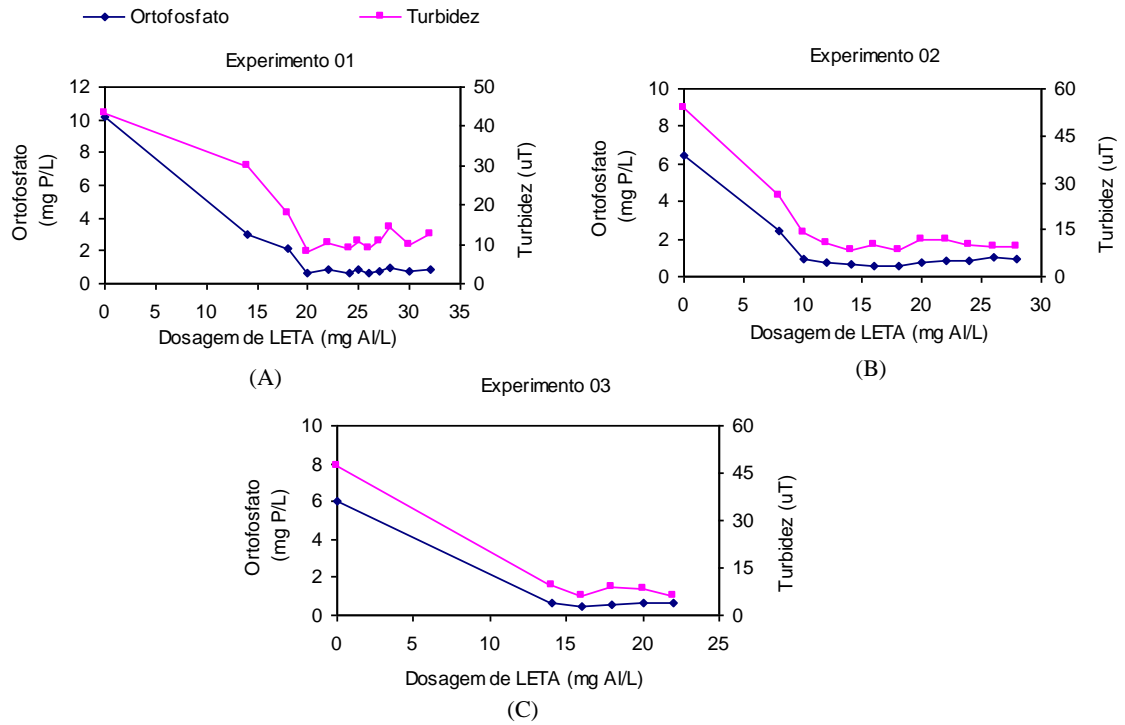


Figura 5.23 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Residuais de turbidez e de ortofosfato em função da variação da dosagem de LETA observados nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.

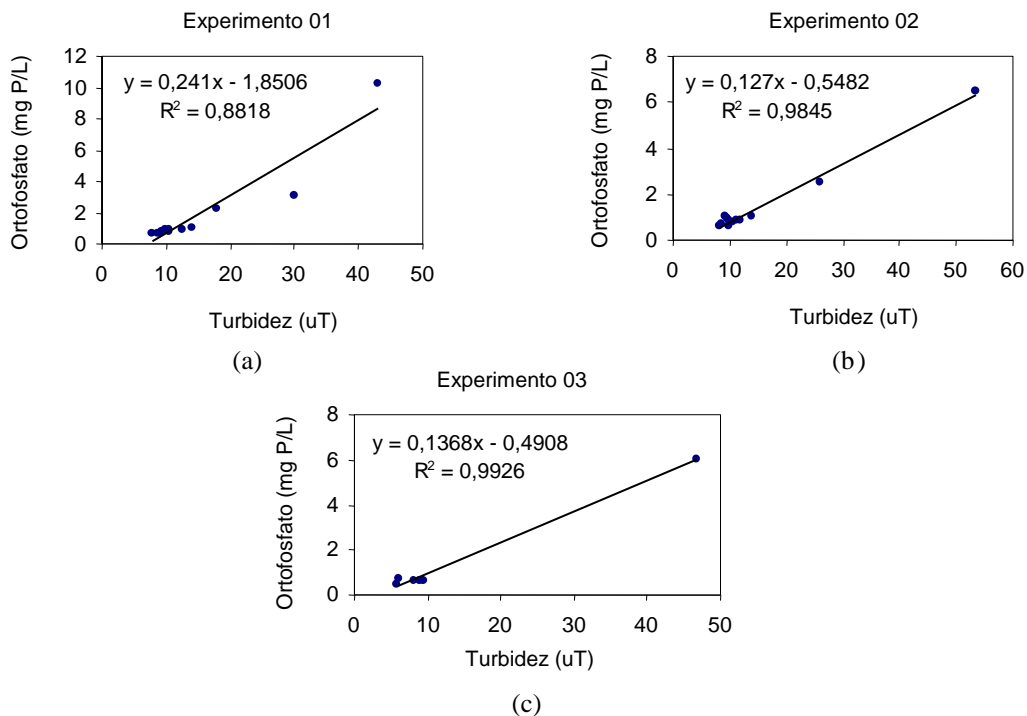


Figura 5.24 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Correlação entre os residuais de turbidez e ortofosfato em função da dosagem de LETA observada nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.

Na segunda etapa dos ensaios de sedimentação utilizando o efluente da ETE Samambaia, foi avaliada a influência da variação da taxa de aplicação sobre a eficiência do processo de polimento químico. A Figura 5.25 apresenta o resultado dos ensaios de sedimentação onde se variou a dosagem de sulfato de alumínio para duas taxas de aplicação diferentes. As demais condições operacionais desses ensaios estão descritas na Tabela C.100 do apêndice C. Ainda nessa etapa, os parâmetros adotados no monitoramento do processo foram os residuais de turbidez e de concentração de ortofosfato.

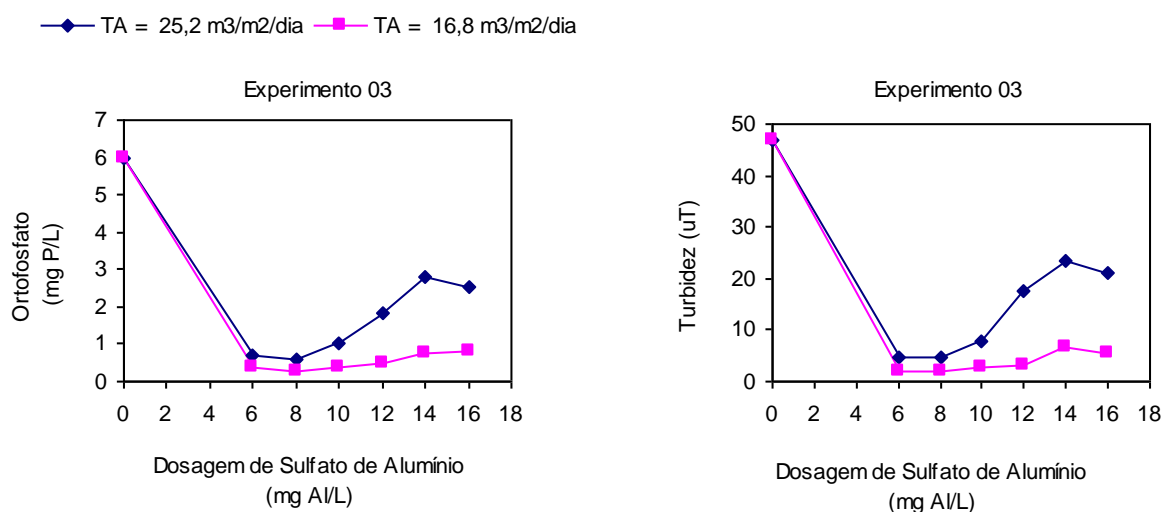


Figura 5.25 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia: Residual de (a) turbidez e (b) de ortofosfato em função da dosagem de sulfato de alumínio, para duas taxas de aplicação.

Nota-se que a tendência de reversão da eficiência do processo a partir da dosagem ótima de sulfato de alumínio é menor quando taxas de aplicação mais conservadoras foram adotadas. Uma hipótese para a justificativa desse fato seria que apesar de ser o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas o predominante no processo de coagulação dessas partículas, para velocidades de sedimentação menores, aumentam-se as chances de captura das partículas “reestabilizadas” por outros mecanismos de coagulação. Como era de se esperar, os resultados indicam, ainda, que o ponto de dosagem ótima parece não se deslocar em função da variação da taxa de aplicação.

(a)

(b)

A Figura 5.26 apresenta os resultados dos ensaios de sedimentação onde se variou a taxa de aplicação superficial para os dois coagulantes analisados, sulfato de alumínio e LETA.

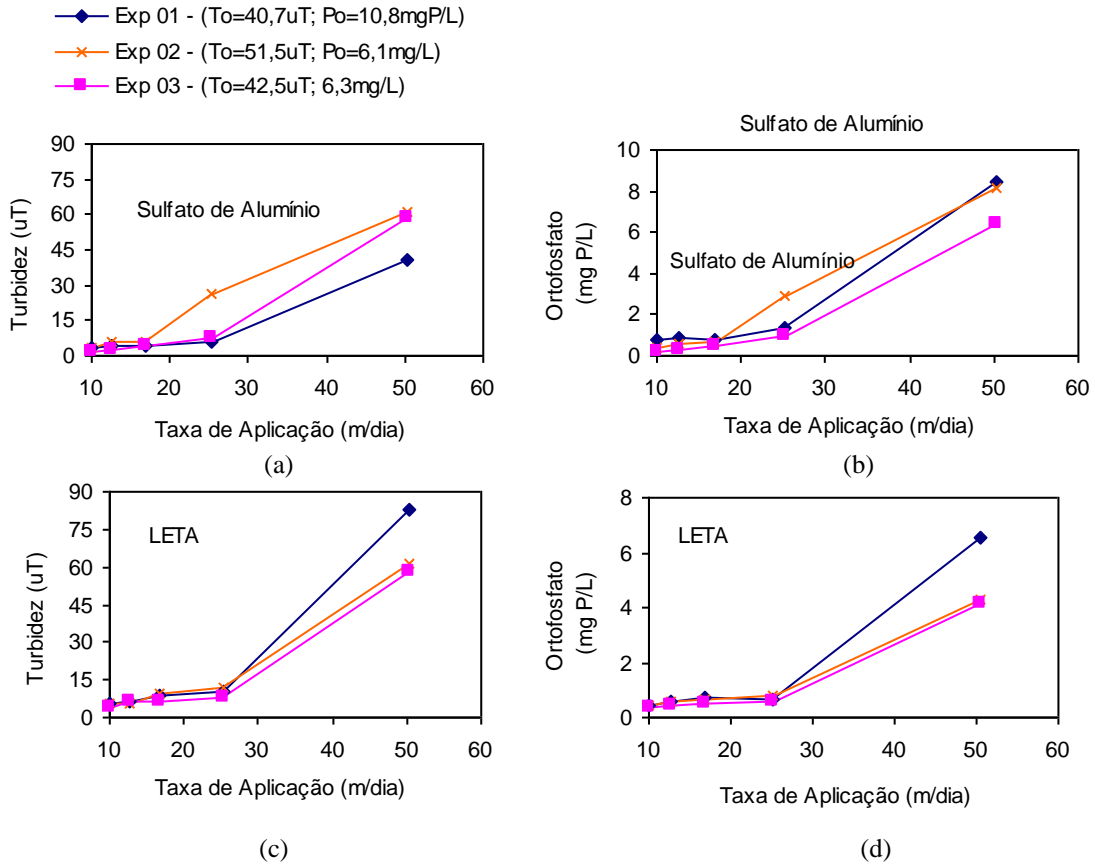


Figura 5.26 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia - Variação do residual de turbidez e da concentração de ortofosfato em função da variação da taxa de aplicação, (a) e (b) quando utilizou-se o sulfato de alumínio, (c) e (d) quando utilizou-se o LETA.

Segundo os resultados apresentados na Figura 5.26, tanto no caso do uso do sulfato de alumínio como do LETA como coagulante, taxas de aplicação maiores que 25m/dia não são recomendadas para a sedimentação dos flocos do tratamento químico do efluente da ETE Samambaia. Nas demais etapas dos experimentos a taxa de aplicação “ótima” adotada foi a de 10,1 m/dia, embora o ganho de eficiência do processo a partir da taxa de 20m/s seja pequeno.

Na Tabela 5.9 estão apresentados os resultados dos ensaios de sedimentação para as condições operacionais ótimas definidas anteriormente.

Tabela 5.9 - Ensaio de sedimentação - ETE Samambaia - Resultados dos testes para as condições “ótimas” de operação.

		Experimento 01		Experimento 02		Experimento 03	
Coagulante		Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo
Dosagem (mg Al/L)		12	24	10	18	8	16
PH de coagulação		6,1	4,6	5,7	4,5	5,7	4,5
Turbidez	(uT)	2,2	4,2	2,2	4,5	1,7	3,8
	E (%)	95	90	96	91	96	91
Orto	(mg P/L)	0,34	0,32	0,28	0,41	0,21	0,34
	E (%)	97	97	95	93	97	95
DQO	(mg/L)	23	22	21,5	24,9	18,5	18,3
	E (%)	80	81	87	85	86	86
Clorofila-a	(mg/L)	65	55	85	67	62	45
	E (%)	94	95	95	96	96	97
SST _L	(mg/L)	2,5	3	9	11	3,5	4,5
	E (%)	95	94	91	89	95	94
SST _s	(mg/L)	2256	2613	1296	2704	1082	1933
V _L	(cm ³ /L)	63	88	144	82	132	75
P _L	(mg/cm ³)	36	41	9	33	8	26

Legenda: Orto-ortofosfato, SST_L-sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_s-sólidos em suspensão totais na fase sólida, V_L-Volume de lodo gerado por litro de efluente tratado, P_L-Produção líquida de lodo.

Com exceção da dosagem de coagulante que variou para cada experimento, conforme descrito na Tabela 5.9, as demais condições operacionais foram mantidas sempre constantes. A taxa de aplicação adotada foi de 10m/dia, o gradiente de velocidade da mistura rápida foi de aproximadamente 100s⁻¹ e o tempo de reação de 60s, na mistura lenta o gradiente foi de cerca de 25s⁻¹ e o tempo de reação de 15 min.

Observa-se na Tabela 5.9 que os resultados obtidos a partir da aplicação do LETA como coagulante no processo de polimento químico seguido de sedimentação é similar ao obtido com o uso do sulfato de alumínio para o caso de remoção de ortofosfato e de DQO. No entanto, com o uso do LETA, a remoção de turbidez alcançada é um pouco menor. O pH do efluente gerado no processo de sedimentação com o uso do LETA é menor que o alcançado com o sulfato de alumínio, reflexo do processo de acidificação do lodo e das dosagens excessivas que podem estar associadas ao envelhecimento do lodo. Provavelmente com o uso do lodo fresco esse impacto será menor.

Ainda na tabela 5.9, com relação às características da fase sólida gerada no processo de sedimentação, assim como ocorreu com os experimentos da ETEB Sul, nota-se que, quando o lodo de ETA é utilizado como coagulante, os resíduos gerados apresentam sempre uma maior concentração de sólidos, porém nem sempre um maior volume.

A Figura 5.27 apresenta a foto, com o resultado de um teste, onde, para a mesma amostra de efluente da ETE Samambaia, trabalhando-se em condições operacionais idênticas, ensaios de sedimentação aplicando a dosagem ótima de LETA e na outra a dosagem ótima de sulfato de alumínio foi realizado. É possível observar que o volume de lodo gerado no experimento onde se utilizou o LETA como coagulante é visivelmente menor.

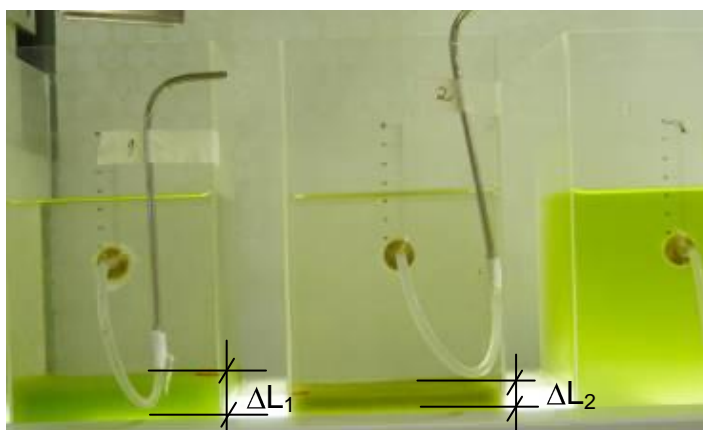


Figura 5.27 - Volume de lodo gerado no ensaio de sedimentação utilizando o sulfato de alumínio (ΔL_1) e o LETA (ΔL_2).

5.4.3 - Ensaio de flotação

Os ensaios de flotação desenvolvidos com o efluente da ETE Samambaia seguiram as etapas descritas na Tabela 4.5. Buscou-se, inicialmente, definir as condições operacionais ótimas para o processo, para em seguida avaliar, nessas condições, testar a eficiência do processo utilizando como coagulante o LETA e o sulfato de alumínio.

As condições operacionais adotadas na etapa de definição da dosagem ótima dos ensaios de flotação estão descritos na Tabela C.71 do apêndice C. Foi considerada como dosagem ótima, aquela que levou à maior eficiência do processo em termos de remoção de ortofosfato. Como mostra a Figura 5.28, nos experimentos desenvolvidos nessa etapa, a faixa de dosagem ótima do sulfato variou entre 10 e 20 mg Al/L e a do lodo ficou entre 15

e 25 mg Al/L. Como era esperado, as faixas de dosagem ótima do processo de flotação e de sedimentação são similares.

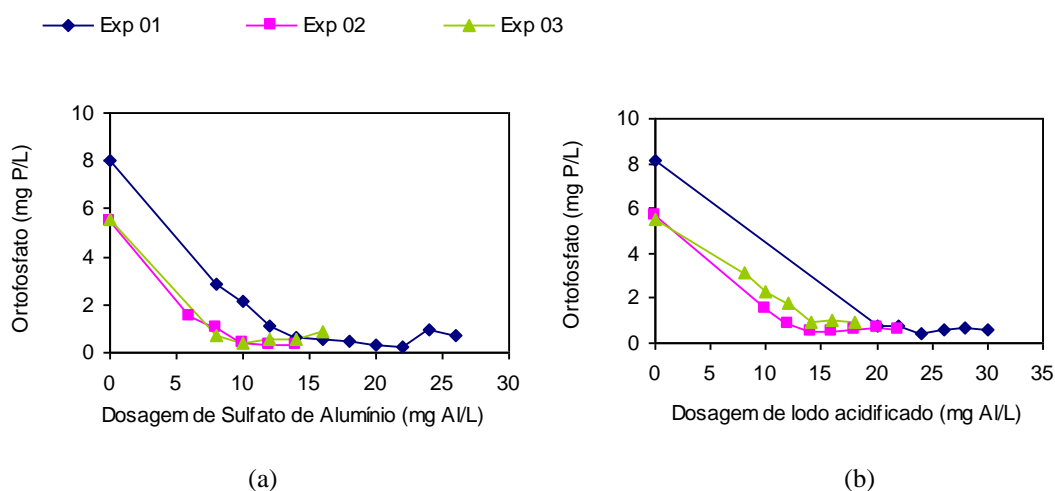


Figura 5.28 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Residuais de ortofosfato em função da dosagem de (a) sulfato de alumínio e (b) de lodo acidificado.

As dosagens ótimas adotadas para as demais etapas dos experimentos estão apresentadas na Figura 5.29. As diferenças entre as dosagens de lodo e de sulfato de alumínio ficaram menores que as observadas no caso da sedimentação.

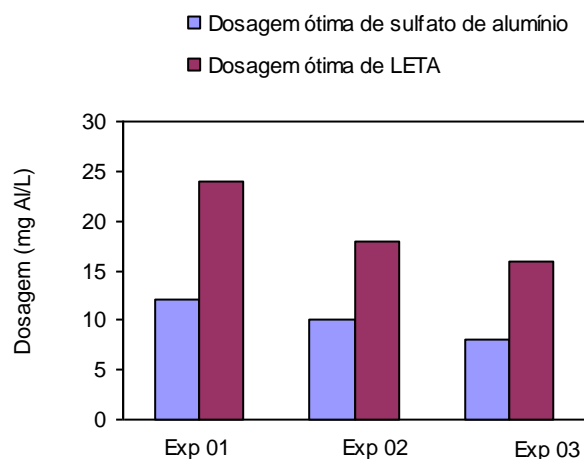


Figura 5.29 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Dosagem ótima de coagulante

As Figuras 5.30 e 5.31 apresentam as variações da turbidez, pH e ortofosfato em função da dosagem de coagulante, para o caso do sulfato e do LETA, respectivamente. Assim como ocorreu com o processo de sedimentação, observa-se uma forte correlação entre a variação da turbidez e da concentração de ortofosfato, principalmente nos experimentos 2 e 3.

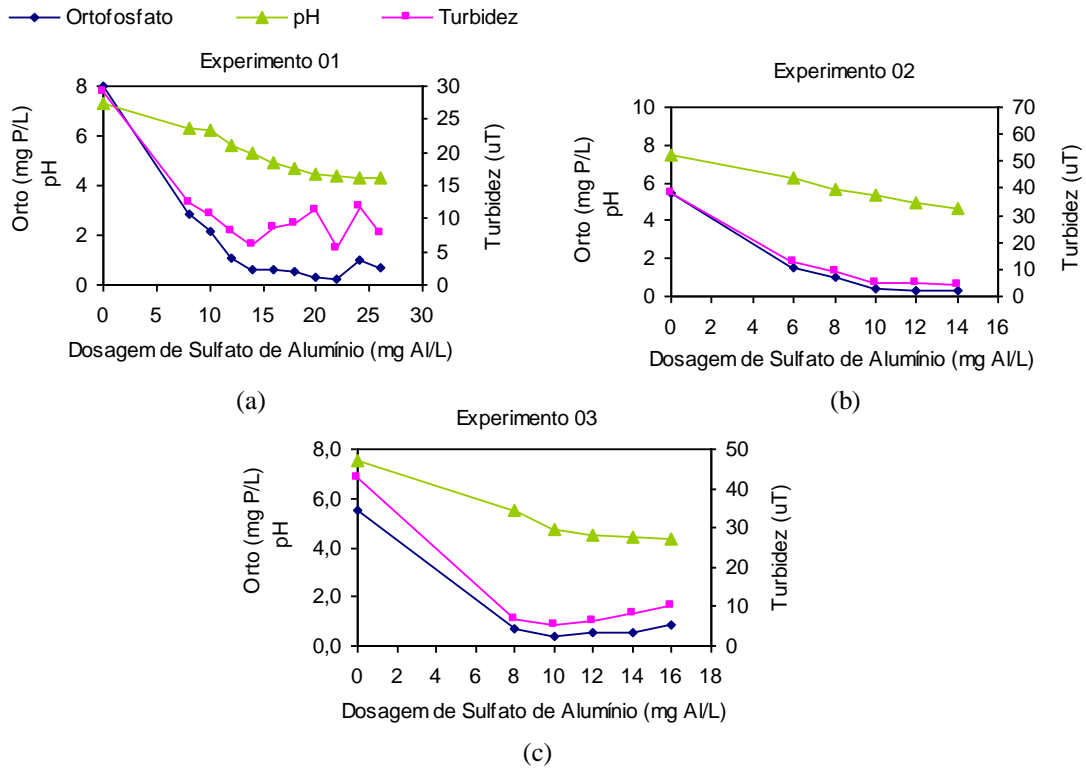


Figura 5.30 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Residual de turbidez e ortofosfato e variação do pH em função da dosagem de sulfato de alumínio observados nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.

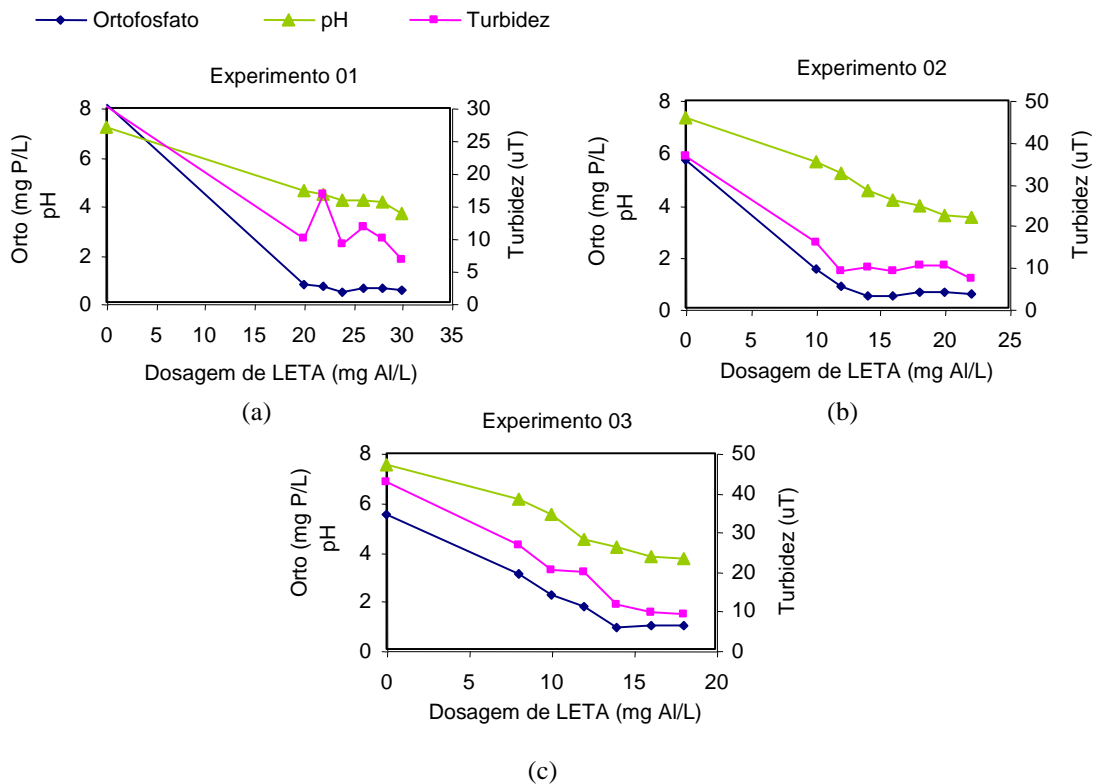


Figura 5.31 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Residual de turbidez e ortofosfato e variação do pH em função da dosagem de LETA, observado nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.

Nessa etapa, avaliou-se a influência da variação da taxa de aplicação superficial na eficiência do processo de remoção de fósforo. O coagulante utilizado foi o lodo acidificado, LETA, na dosagem ótima definida anteriormente. Para o efluente da ETE Samambaia, foram testadas as seguintes taxas de aplicação: 230; 154; 115; e 92m/dia. As demais condições operacionais foram mantidas constantes. Os parâmetros monitorados foram: turbidez e concentração de ortofosfato. Os resultados dessa etapa dos experimentos estão descritos na Figura 5.32.

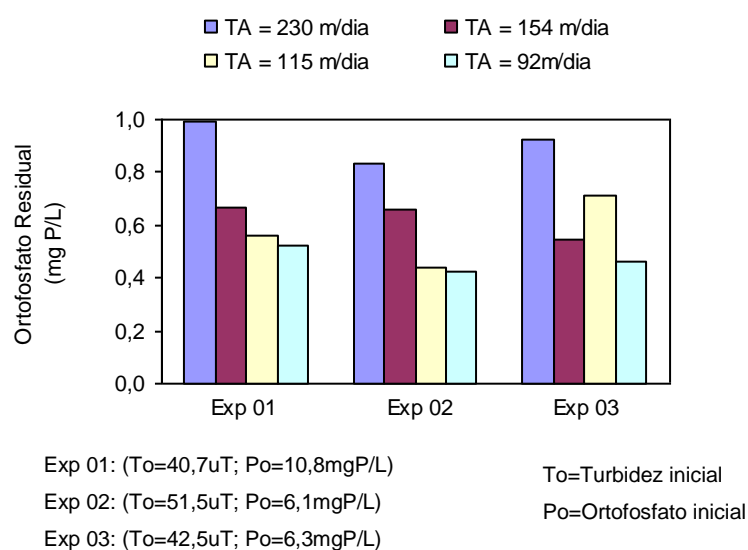


Figura 5.32 - Resultados dos ensaios de flotação - ETE Samambaia: Residuais de ortofosfato em função da variação da taxa de aplicação.

Observa-se que, nos experimentos 01 e 02, a partir da taxa de aplicação de 115m/dia, a redução da taxa de aplicação não resultou em alteração significativa na eficiência de remoção de ortofosfato do processo. Por esse motivo, adotou-se como taxa de aplicação ótima, para continuidade do trabalho, a taxa de 115m/dia. No experimento 03, a taxa de aplicação ótima adotada nas demais etapas do experimento foi a de 92m/dia. Segundo Metcalf & Eddy (1991), essas taxas devem estar entre 11,5 e 230,4 m/dia. Entretanto Pinto Filho (1999), obteve bons resultados trabalhando com efluentes de lagoa, com taxas de aplicação de até 384 m/dia e Van Vuuren *et al.* (1985, *apud* Offringa, 1995), trabalhando com efluentes do tratamento biológico, obtiveram bons resultados para taxas de aplicação variando entre 130 e 250m/dia.

Na avaliação da interferência da taxa de recirculação no processo de flotação aplicado à remoção de fósforo do efluente secundário da ETE Samambaia, fixou-se a dosagem ótima e a taxa de aplicação ótima definidas anteriormente para cada experimento, além das demais condições operacionais descritas na Tabela 4.5 e variou-se a taxa de recirculação. Os parâmetros utilizados no monitoramento da eficiência do processo nessa etapa também foram a turbidez e a concentração de ortofosfato. Os resultados dessa etapa estão apresentados na Figura 5.33.

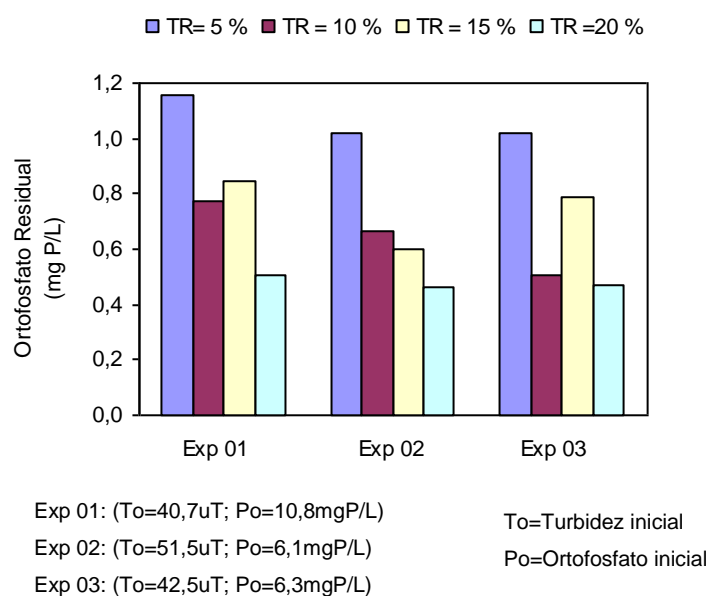


Figura 5.33 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Residuais de ortofosfato em função da variação da taxa de recirculação

Em todos os experimentos, a taxa de recirculação de 20% promoveu os melhores resultados em termos de remoção de ortofosfato, sendo considerada como taxa ótima. Pinto Filho (1999), trabalhando com a mesma pressão de saturação de 500kPa, sugere a faixa de 10 a 20% de recirculação como sendo a mais adequada no processo de flotação aplicado ao polimento final de efluentes de lagoas. Van Vuuren *et al.* (1985, *apud* Offringa, 1995) indicam taxas entre 5 e 10% como sendo adequadas para efluentes do tratamento biológico. Conforme mostrado na Figura 5.34, a partir da taxa de recirculação de 10% o ganho de eficiência observado no processo é pequeno.

Considerando a taxa de recirculação de 20%, pressão de saturação de 500 kPa ou 5,9 atm, e adotando-se uma concentração de sólidos de 200mg/L, média dos resultados obtidos para as amostras do efluente da ETE Samambaia após a coagulação, a relação ar/sólido, obtida a

partir da equação 3.1, resulta em 0,048 mg/mg que está dentro da faixa observada por Van Vuuren *et al.* (1985, apud Offringa, 1995) em trabalho experimental, que foi de 0,04 a 0,12.

A Figura 5.34 apresenta os resultados da etapa dos ensaios de flotação onde se avaliou a influência da variação do tempo de floculação sobre a eficiência de remoção de fósforo no processo de flotação aplicado ao efluente secundário da ETE Samambaia. Verifica-se que o tempo de floculação está diretamente relacionado à melhoria da eficiência do processo.

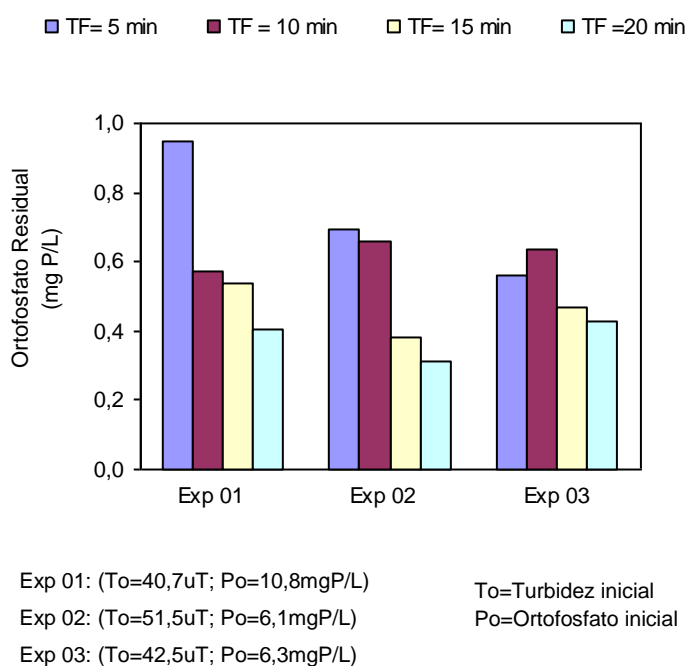


Figura 5.34 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia - Variação da concentração de ortofosfato residual em função da variação do tempo de floculação.

Seguindo os mesmos critérios adotados nas etapas anteriores, foi considerada como taxa de floculação ótima aquela que levou à menor concentração de ortofosfato no efluente do processo, o que correspondeu sempre a 20 min.

Nos experimentos desenvolvidos por Pinto Filho (1999), os resultados indicaram que, utilizando-se o sulfato de alumínio como coagulante para o polimento químico seguido de flotação, aplicado ao efluente de lagoa, o tempo de floculação mais adequado foi o de 10

min. Como é mostrado na Figura 5.34, a partir do tempo de floculação de 10 minutos o ganho de eficiência do processo é pequeno.

A partir da definição das condições operacionais ótimas para o processo de flotação aplicado ao polimento final do efluente secundário da ETE Samambaia, analisou-se as variações da performance desse processo utilizando-se como coagulante o LETA ou o sulfato de alumínio, sempre nas dosagens ótimas definidas anteriormente. Nessa etapa, foram analisados os parâmetros de turbidez, ortofosfato, fósforo total, DQO, clorofila-a e sólidos em suspensão. A Figura 5.35 apresenta a eficiência alcançada no processo para cada um desses parâmetros. As Tabelas C.80, C.97 e C.114 do apêndice C descrevem as condições operacionais adotadas nessa etapa dos experimentos 01 e 02 e 03, respectivamente.

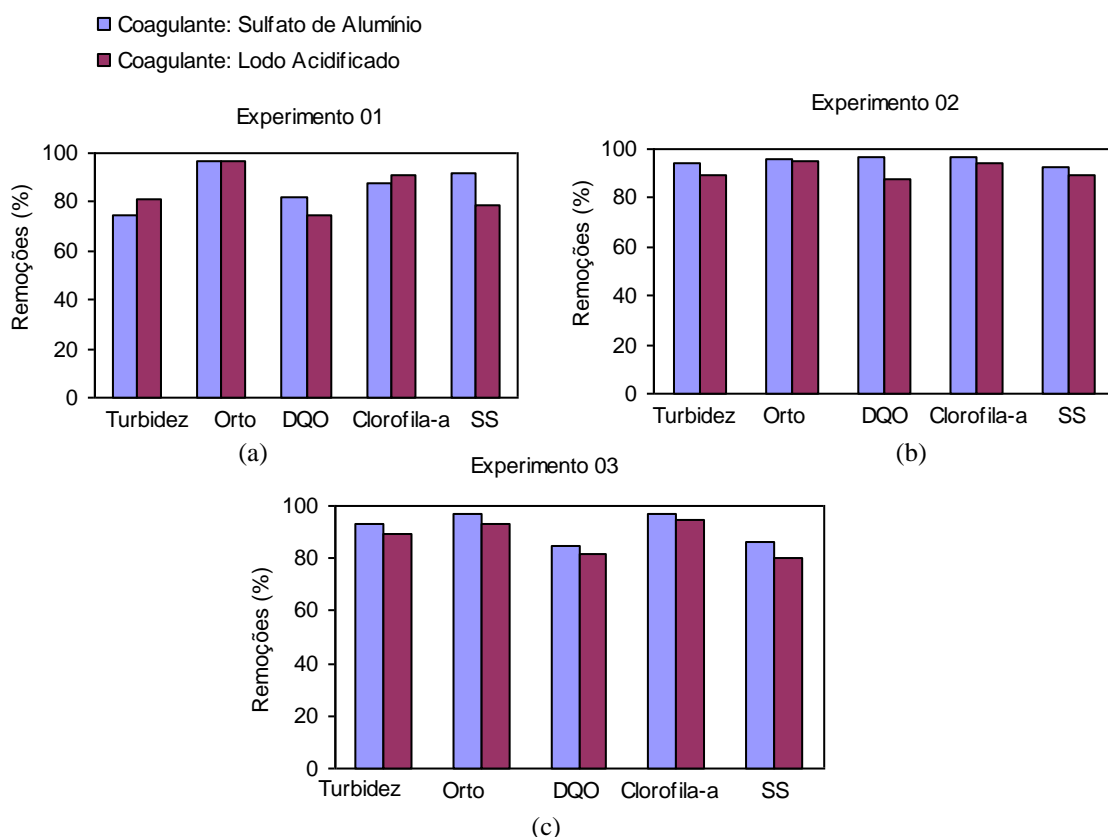


Figura 5.35 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia: Eficiência do processo de flotação em condições operacionais ótimas, observada nos experimentos (a) 01, (b) 02 e (c) 03.

Observa-se, na Figura 5.35, que a eficiência do processo de flotação utilizando o LETA como coagulante foi próxima à eficiência alcançada com o uso do sulfato, particularmente,

para a remoção de ortofosfato e de clorofila-a, principais objetivos da etapa de polimento. O processo apresentou-se estável para os três experimentos desenvolvidos.

A Tabela 5.10 apresenta o conjunto de resultados dos ensaios de flotação com o efluente da ETE Samambaia. Observa-se que o uso do lodo acidificado como coagulante, apesar de incorporar sólidos ao efluente a ser tratado, nem sempre leva à produção de maior volume de lodo e sim a um lodo mais denso.

Tabela 5.10 - Ensaio de flotação - ETE Samambaia - Características do efluente e do lodo gerado após o polimento final pelo processo de flotação em condições operacionais “ótimas” e também características da amostra bruta e valores residuais esperados.

Parâmetros		Exp 01		Exp 02		Exp 03	
		Coagulante		Coagulante		Coagulante	
		Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo
Dosagem ótima		22	24	12	14	10	14
pH		4.4	4.6	4,5	4,7	4,7	4,2
Turbidez	(uT)	10,1	7,9	3,2	5,6	2,9	4,5
	E (%)	75	81	94	89	93	89
Orto	(mg P/L)	0,31	0,32	0,26	0,31	0,20	0,43
	E (%)	97	97	96	95	97	93
DQO	(mg P/L)	21	29	4,3	21,2	19	22,7
	E (%)	82	75	97	88	85	82
Clorofila-a	(mg/L)	147	105	59	99	55	93
	E (%)	88	91	97	94	97	95
SST _L	(mg/L)	4	10,5	7	11	10	14,5
	E (%)	92	79	93	89	86	80
SST _S	(mg/L)	5.666	4.773	6.029	10.078	5.635	7.543
V _L	(cm ³ /L)	36	46	31	24	33	24
P _L	(mg/cm ³)	157	104	194	420	171	314

Legenda: Orto: Ortofosfato, SST_L: Sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_S: Sólidos em suspensão totais na fase sólida, VL: Volume de lodo gerado por litro de efluente tratado, P_L: Produção líquida.

A Figura 5.36, mostra a fotografia do final de um ensaio de flotação utilizando os dois tipos de coagulantes, onde observa-se que, nesse caso, o lodo gerado a partir do uso do lodo acidificado como coagulante é menos volumoso e mais concentrado que aquele gerado a partir do uso do sulfato de alumínio. Essa característica pode tornar a desidratação desse lodo mais fácil e menos dispendiosa, foi o que observaram Bishop *et al.* (1991), em experimentos em escala real, realizados com o objetivo de determinar as técnicas mais adequadas para a desidratação do “lodo acidificado”. Nesses experimentos,

os autores observaram que, com o condicionamento adequado, a desidratação do “lodo acidificado” resultou em uma torta com cerca de 30% de sólidos, seja utilizando o filtro prensa, seja utilizando a centrifuga.

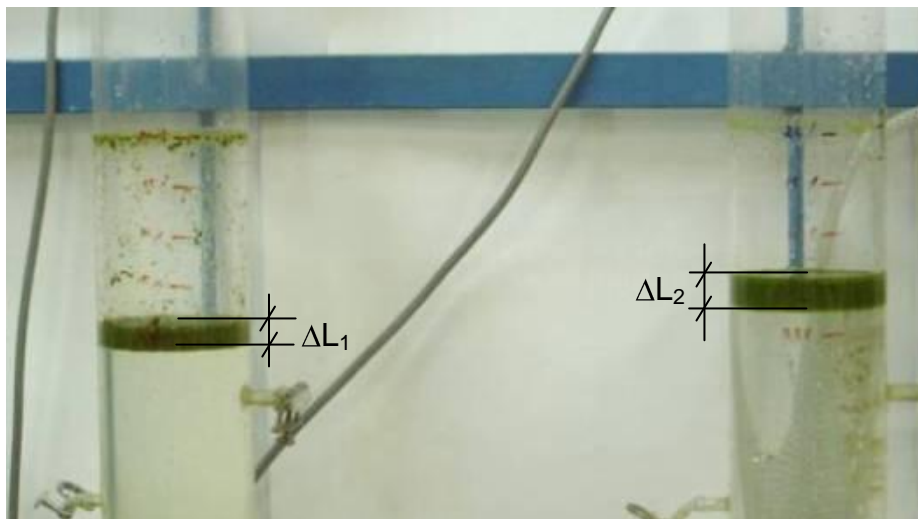


Figura 5.36 - Lodo flotado a partir da coagulação com o sulfato de alumínio (direita) e com o LETA (esquerda).

5.4 - Análise comparativa entre os processos de flotação e de sedimentação

Nessa etapa, foram adotados os resultados do experimento 04 da ETEB Sul e do experimento 02 da ETE Samambaia, como base para desenvolvimento das análises comparativas entre os processos de flotação e de sedimentação aplicados à separação de flocos do tratamento químico. A Tabela 5.11 reúne os resultados obtidos nesses experimentos.

Observa-se que, como era de se esperar, a dosagem de coagulante não foi alterada em função do uso dos diferentes processos na separação de fases líquido/sólido.

Para se alcançar os mesmos níveis de eficiência do processo de polimento químico de efluentes do tratamento de esgotos, particularmente no que se refere à remoção de fósforo e clorofila-a, a taxa de aplicação superficial ótima definida para a flotação ficou entre 10 e 15 vezes menor que a taxa de aplicação ótima adotada para o processo de sedimentação. Além disso, o volume de lodo gerado no processo de flotação é sempre menor e com maior concentração de sólidos por unidade de volume que o gerado na sedimentação.

Tabela 5.11 - Resultados do experimento 04 da ETEB Sul e do experimento 02 da ETE Samambaia

Parâmetros		ETEB Sul				ETE Samambaia			
		Sedimentação		Flotação		Sedimentação		Flotação	
		Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo
Dosagem ótima (mg Al/L)		3	6	4	6	10	18	12	14
Taxa de aplicação ótima (m/dia)		10		154		10		115	
Turbidez	Residual (uT)	2,4	3,6	2,2	4,2	2,2	4,5	3,2	5,6
	Remoção (%)	84	76	86	72	96	91	94	89
Ortofosfato	Residual (mgP/L)	0,09	0,09	0,08	0,08	0,28	0,41	0,26	0,31
	Remoção	87	87	88	88	95	93	96	95
DQO	Residual (mg/L)	-	-	23,5	22,2	21,5	24,9	4,3	21,2
	Remoção	-	-	65	67	87	85	97	88
Clorofila a	Residual (mg/L)					85	67	59	99
	Remoção					95	96	97	94
SST _L	Residual (mg/L)	4	2	2	9	9	11	7	11
	Remoção	89	94	94	74	91	89	93	89
SST _S (mg/L)		57	214	116	328	1296	2704	6029	10078
V _L (cm ³ /L)		31	63	17	14	144	82	31	24
P _L (mg/cm ³)		2	3	7	23	9	33	194	420

Legenda: Orto: Ortofosfato, SST_L: Sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_S: Sólidos em suspensão totais na fase sólida, VL: Volume de lodo gerado por litro de efluente tratado, P_L: Produção líquida.

Outro aspecto negativo do processo de sedimentação, observado ao longo dos experimentos desenvolvidos com o efluente da ETE Samambaia, foi a tendência de ressuspensão do lodo sedimentado, após algum tempo de repouso. É o que mostra a Figura 5.37.

Esse fenômeno pode estar relacionado com a grande quantidade de algas presente no lodo, que prosseguem realizando fotossíntese e liberando oxigênio. Esse oxigênio vai se incorporando aos flocos gerados no tratamento químico reduzindo a sua massa específica, até torná-la menor que a do meio líquido, provocando a ascensão desses flocos. Esse fenômeno pode não se repetir em unidades em escala real devido à ausência de luz no fundo dos decantadores. Portanto, faz-se necessário um estudo mais detalhado sobre esse

fenômeno que pode ser um fator limitante para a aplicação do processo de sedimentação na separação dos flocos do polimento final de efluentes de lagoa.

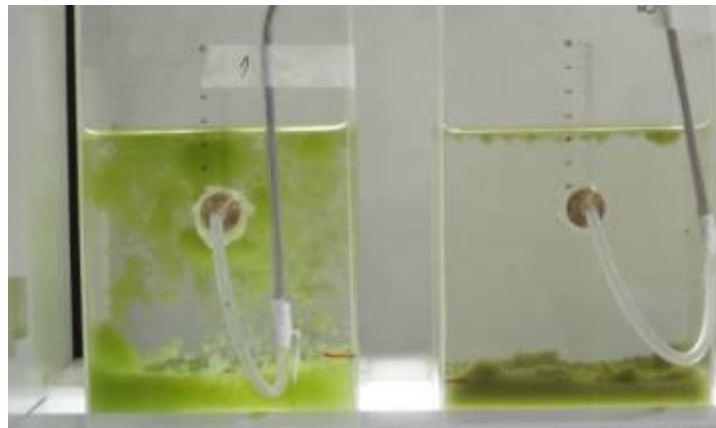


Figura 5.37 - Fenômeno de ressuspensão do lodo observado nos ensaios de sedimentação utilizando o sulfato de alumínio (frasco à esquerda) e o lodo acidificado (frasco à direita).

Os resultados indicam que o processo de flotação parece ser o mais indicado para a separação dos flocos gerados no processo de polimento químicos de efluentes de esgotos com vantagens em termos de redução da taxa de aplicação superficial e redução do volume de lodo gerado, além da maior flexibilidade que esse processo oferece, permitindo o ajuste do processo para as variações sazonais de carga e de vazão, através do controle da relação ar/sólidos.

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a possibilidade de utilização do potencial de coagulação do alumínio contido no lodo gerado em unidades de tratamento de água, quando aplicado aos processos de sedimentação e de flotação para remoção de fósforo de efluentes do tratamento secundário de esgotos.

Foram desenvolvidos testes preliminares com o objetivo de selecionar o lodo a ser utilizado no desenvolvimento do trabalho, bem como definir a técnica a ser adotada na aplicação desse lodo como coagulante. Nessa etapa, foram testados os lodos desidratados de duas estações de tratamento de água, ETA Pípiripau e ETA Rio Descoberto, aplicados em três situações diferentes: a) a suspensão preparada com o lodo foi aplicada como coagulante do processo; b) a suspensão de lodo foi aplicada de forma combinada com o sulfato de alumínio; c) a suspensão de lodo era acidificada com o objetivo de solubilizar parte do alumínio contido no lodo e então era aplicada como coagulante do processo.

Os experimentos foram realizados em escala de laboratório, utilizando equipamentos de “Jarteste” nos ensaios de sedimentação e “Flotatestes” nos ensaios de flotação. Os efluentes utilizados nesses ensaios foram coletados do decantador secundário da ETEB Sul, que opera pelo processo de lodos ativados, modificado para promover a remoção de nutrientes junto com a remoção da matéria orgânica e, do efluente da ETE Samambaia, que opera pelo sistema de lagoas. Os ensaios foram desenvolvidos utilizando o lodo de ETA e também de sulfato de alumínio como coagulantes. Os resultados obtidos com o sulfato de alumínio serviram de referência para a avaliação das eficiências de remoção alcançadas com o uso do lodo. A partir dos dados levantados foi possível proceder ainda, uma análise comparativa entre a eficiência dos processos de sedimentação e de flotação aplicados a essa situação.

A partir dos resultados obtidos concluiu-se que:

- Dentre os lodos de ETAs avaliados nos testes preliminares, o que se mostrou com maior potencial para ser utilizado como coagulante foi o lodo da ETA Pípiripau, por ter apresentado maior facilidade de preparação da suspensão para dosagem e maior eficiência de remoção de fósforo. Dentre as alternativas avaliadas, a técnica que se

mostrou mais adequada para a aplicação do lodo desidratado como coagulante foi a de preparação de uma suspensão acidificada de lodo, de modo a solubilizar as espécies de alumínio presentes.

- Nos testes preliminares, de um modo geral, a utilização do lodo da ETA Rio Descoberto como coagulante não apresentou resultados satisfatórios. No caso da aplicação da suspensão de lodo acidificado, a reduzida eficiência alcançada pode estar associada ao baixo potencial de solubilização do alumínio presente no lodo, que é função da relação entre a turbidez da água bruta e a dosagem de sulfato de alumínio aplicada no processo de tratamento da água, ou ainda a problemas operacionais ocorridos na etapa de desidratação do lodo.
- Foi possível alcançar elevada eficiência de remoção de fósforo, similar à obtida com o uso do sulfato de alumínio, utilizando-se o lodo acidificado da ETA Pipiripau como coagulante no polimento químico dos efluentes da ETE Sul e da ETE Samambaia, independentemente do processo adotado na separação de fases sólido/líquido. Outros parâmetros analisados ao longo dos experimentos, como DQO, sólidos em suspensão e clorofila a, também apresentaram eficiências de remoção similares para os dois coagulantes.
- Para o efluente do tratamento secundário da ETE Sul, a aplicação do processo de sedimentação usando o sulfato de alumínio como coagulante levou a remoções de ortofosfato que variando de 77 a 97%, enquanto que com o uso do LETA acidificado essa remoção variou entre 77 a 87%. Para o processo de flotação, as faixas de remoção de ortofosfato observadas foram de 88 a 90% e de 88 a 92%, respectivamente, para o sulfato de alumínio e o lodo acidificado.
- No caso do efluente da ETE Samambaia, as faixas de eficiência de remoção de ortofosfato variaram, para a sedimentação, entre 95 e 97% com o uso de sulfato de alumínio e entre 93 e 97% com o uso do LETA, e para a flotação, essas faixas foram de 96% a 97% e de 93% a 97% para o sulfato de alumínio e o lodo acidificado, respectivamente.

- Nos ensaios desenvolvidos com o efluente da ETE Samambaia, a remoção de fósforo apresentou forte correlação com a remoção de turbidez, sugerindo que esse parâmetro pode ser utilizado como indicador de eficiência do processo de polimento final, facilitando o controle operacional dessa unidade de tratamento. No caso do efluente do decantador secundário da ETEB Sul, como a turbidez da amostra em geral era muito baixa, a variação dos parâmetros fósforo e turbidez nem sempre apresentou boa correlação.
- A partir do trigésimo dia de armazenamento do LETA, foi observada a necessidade de aplicação de dosagens de lodo cada vez maiores do que as de sulfato de alumínio para se alcançar eficiências de remoção similares nos processos de flotação e de sedimentação, sugerindo que o armazenamento leva a um processo de “envelhecimento” do lodo com redução do seu potencial de coagulação.
- Para os aspectos analisados nesse trabalho, o processo de flotação parece ser o mais indicado no polimento físico-químico dos efluentes estudados, uma vez que admite taxas de aplicação superficial cerca de 10 a 15 vezes menores que as da sedimentação. Além disso, o lodo gerado na flotação se apresenta sempre mais denso e menos volumoso que aquele gerado na sedimentação. Na prática, a seleção do processo de separação de fases irá depender da avaliação de outros aspectos como disponibilidade de área, custo operacional e da tecnologia adotada no tratamento do lodo gerado.
- Um aspecto negativo da aplicação da sedimentação no polimento físico-químico do efluente da ETE Samambaia foi a ocorrência de ressuspensão do lodo sedimentado, provavelmente devido a grande quantidade de algas presente na estrutura dos flocos gerados. No caso do uso do lodo acidificado como coagulante, esse processo era menos intenso do que com o sulfato de alumínio.
- O lodo gerado nos processos de flotação e de sedimentação a partir da aplicação do LETA como coagulante resultou mais denso e menos volumoso que aquele gerado com o uso do sulfato de alumínio. Essa característica pode ter reflexos positivos no processo de desidratação do lodo gerado no polimento final de efluentes do tratamento de

esgotos, com redução do consumo de polímeros na etapa de condicionamento e aumento da concentração de sólidos no lodo desidratado.

Com base na experiência obtida nos ensaios desenvolvidos, recomenda-se, para pesquisas futuras, que sejam avaliados os seguintes aspectos:

- Investigação das razões do comprometimento do potencial de coagulação do lodo da ETA Rio Descoberto, visando a sua utilização como coagulante nos sistemas de polimento final das ETEs Samambaia e Melchior que se encontram em fase final de construção.
- Avaliar o efeito do pH de coagulação na eficiência do processo de sedimentação e de flotação utilizando lodo de ETA como coagulante.
- Avaliação do impacto que o uso do lodo de ETAs como coagulante no polimento final de efluentes do tratamento biológico de esgotos pode gerar etapas de desaguamento do lodo das ETEs.
- Análise estatística das características dos lodos produzidos nas ETAs do Distrito Federal, incluindo suas variações sazonais.
- Análise da perda do potencial de coagulação do lodo de ETAs a partir de um longo período de armazenamento.
- Avaliação do fenômeno de ressuspensão que ocorre com o lodo gerado a partir do processo de precipitação química seguido de sedimentação aplicado ao polimento final de efluentes do tratamento de esgotos para remoção de algas.
- Desenvolvimento de experimentos em escala real, aplicando-se o lodo de ETA acidificado como coagulante no processo de polimento final de efluentes do tratamento de esgotos.

- Avaliação técnica e econômica da substituição do sulfato de alumínio utilizado no tratamento primário da ETE Sobradinho pelo lodo acidificado da ETA Pipiripau. Atualmente, essa ETE opera com o processo de lodos ativados com adição de sulfato de alumínio na etapa de tratamento primário, com o objetivo de melhorar a eficiência da unidade, comprometida pela sobrecarga de vazão. Paralelamente, o lodo da ETA Pipiripau está sendo transportado por cerca de 100 Km para ser disposto no aterro autorizado pelo órgão ambiental. No caso de ser aplicado na ETE Sobradinho, esse percurso seria reduzido para cerca de 30Km.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. NBR 10.004 (1989). “Disposição de Resíduos Sólidos”.Rio de Janeiro, Brasil.
- American Society of Civil Engineers - ASCE manuals and reports of engineering practice; nº 88, (1996). *Management of Water Treatment Plant Residuals*. 294p.
- American Water Work Association - AWWA (1987). “Committee Report: Research Needs for Alum Sludge Discharge”. *Journal AWWA*, Denver, **79**(6), 99-104.
- Barbosa, A. B. D. (1997). “A experiência da CAESB em recuperação de água de lavagem de filtros e desidratação de lodo de ETA.” ABES – *19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Foz do Iguaçu, 1501-1507.
- Bishop, M. M., Rolan, A. T., Bailey T. L. e Cornwell, .D. A. (1987). “Testing of alum recovery for solids reduction and reuse. *Journal AWWA*, Denver, **79**(6), 76-84.
- Bishop, M. M., Cornwell, .D. A., Rolan, A. T., Bailey, T. L., (1991). “Mechanical dewatering of alum solids and acidified solids: An Evolution”. *Journal AWWA*, Denver **83**(9), 50-55.
- Boaventura, G. R., Santos, A.R., Pinelli, M. P., Dias, R. P. (1995). “Metodologia analítica para determinação de metais em compostos de lixo urbano usando espectrometria de emissão atômica com plasma e espectrometria de absorção atômica.” *25º Congresso Brasileiro de Ciências do Solo*. Viçosa, **vol. 4**, 2.306-2.308.
- Brandão, J. B. (1998). “*Recuperação de coagulantes através de solubilização pela via ácida de lodos de diversas ETAs no ES com posterior Reutilização no tratamento de águas para abastecimento e águas residuárias.*” 139p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo.
- CAESB (2001a). SIAGUA “Sinopse do sistema de abastecimento de água do DF”. Versão dezembro/2001. CAESB.
- CAESB (2001b). SIESG “Sinopse do sistema de esgotamento sanitário do DF”. Versão dezembro/2001. CAESB.
- CAESB/SEEBLA - Serviços de Engenharia Emílio Baumgart Ltda (2000). “Estudo de Reavaliação do Sistema de Esgotamento Sanitário do Distrito Federal – Diagnóstico do Setor Oeste.” Vol **1** Tomo 01/01.Brasília
- Chu, W. (1999). “Lead metal removal by recycled alum sludge” *Water Research*, **33**(13), 3019-3025.
- Chu, W. (2001). “Dye removal from textile dye wastewater using recycled alum sludge.” *Water Research*, **35**(13), 3147-3152.
- Sawyer, C.N., McCarty, P.L., Parkin, G.F. (1994). *Chemistry for Environmental Engineering*. Mc Graw Hill Book Co; Singapura; 658p.

- Clark, T. e Stephenson, T. (1999), "Development of jar testing protocol for chemical phosphorus removal in activated sludge using statistical experimental design." *Water Research*, **33**(07), 1730-1734.
- Copeland, A., Vandermeijden, C., Cornwell, D. A. (1995). "Residual Benefits". *Civil Engineering*. Janeiro, 70-72.
- Cordeiro, J. S. (1999a). "Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs." In: Prosab, *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 1-19
- Cordeiro, J. S. (1999b). "Remoção de água de lodos de ETAs através de filtração forçada." In: Prosab, *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 107-124.
- Di Bernardo, L. (1993). *Métodos e técnicas de tratamento de água*, vol. 1. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 481p.
- Di Bernardo, L., Carvalho, E.H., Scalize, P.S., (1999). "Disposição de resíduos líquidos de ETAs em ETEs." In: Prosab, *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 169-202.
- Edzwald, J.K. (1995). "Principles and applications of dissolved air flotation." *Water Science and Technology*, **31**(3/4),1-23.
- Felizatto, M.R. (1999). Reúso de água em piscicultura no Distrito Federal: Potencial para pós-tratamento de águas residuárias associado à produção de pescado. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, DF, Brasil, 190p.
- Galarneau, E. e Gehr, R. (1997). "Phosphorus removal from wastewaters: Experimental and theoretical support for alternative mechanisms." *Water Research*, **31**(2), 328-338.
- Gonçalves, R. F., Barreto, E., Brandão, J., Piotto, Z. (1999). "Recuperação de coagulantes de lodos de estações de tratamento de águas." In: Prosab. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 203-225.
- Gonçalves, R. F., Ludovice, M., Lima, M.R.P., Ramaldes, D.L.C., Ferreira, A.C., Teles, C.R., Andreoli, C.V., (2001). "Desidratação de lodos de esgotos" In: Prosab. *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 57-86.
- Gregory, J. e Dupont, V. (2001). "Properties of flocs reduced by water treatment coagulants." *Water Science and Technology*, **44**(10), 231-236.
- Huang, C., Pan, J.R., Sun, K.D., Liaw, T., (2001). "Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making". *Water Science and Technology*, **44**(10), 273,277.

- Kuba, T, van Loosdrecht, M.C.M., e Heijnen, J.J., (1997). "Biological dephosphatation by activated sludge under denitrifying conditions: pH influence and occurrence of denitrifying dephosphatation in a full scale waste water treatment plant." *Water Science and Technology* **36**(12), 75-82.
- Lacerda, M.R.S. (1997). A influência do pH de coagulação e do tempo de floculação na flotação por ar dissolvido no tratamento de água com baixa turbidez e presença de algas. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, DF, Brasil, 118p.
- Lucas, J. B, Dillaha, T.A., Reneau, R.B., Novak, J.T., Knocke, W.R., (1994). "Alum sludge land application and its effect on plant growth." *Water Science and Technology* **33**(11), 75-83.
- Ministério do Meio Ambiente, (1998). Lei da Vida - A Lei de Crimes Ambientais: lei 9.605, Brasília, Brasil.
- Metcalf & Eddy (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Reuse and Disposal*, McGraw-Hill Book Co; Edição Internacional; Singapura; 1333p.
- Neder, K.D.(1996). "Projetos de estações de tratamento de esgotos da CAESB" in: CAESB. *Seminário internacional de tratamento e disposição de esgotos sanitários*. Brasília, Brasil, 21-39.
- Ødegaard, H. (1995). "Optimization of flocculation/flotation in chemical wastewater treatment." *Water Science & Technology*, **31**(3/4), 73-82.
- Offringa, G, (1995). "Dissolved Air Flotation in Southern Africa." *Water Science and Technology* **31**(3-4), 159-172.
- Pinto Filho, A.C.T. (1999). Avaliação do potencial da flotação por ar dissolvido como pós-tratamento para efluentes do processo de lodos ativados, de reatores UASB e de lagoas de alta taxa. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, DF, Brasil, 210p.
- Queiroz, T. R. (2001). Remoção de sólidos suspensos de efluentes de lagoas de estabilização por meio de processos naturais. Dissertação de Mestrado, departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, DF, Brasil, 229p.
- Realí, M. A. P. e Patrizzi, L. J., (1999). "Espessamento de lodos de ETAs." In: Prosab, *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 41-84.
- Realí, M. A. P., Patrizzi, L. J. e Cordeiro, J. S. (1999). "Desidratação de lodo por centrifugação." In: Prosab, *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 85-106.
- Rocha, M. L. A., Ribeiro, E. N., Veronez, F. A., Roriz, G. M. e Gonçalves, R. F. (1998). "Remoção de algas, DQO, fósforo e coliformes do efluente de lagoas facultativas

através de coagulação/floculação/decantação.” Anais (meio magnético CD-ROM) do XXVI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Lima, Peru.

Silva, M. C. P. e Fernandes, F. (1998). “Co-Compostagem de Biossólidos, lodo de tratamento de água e resíduos de podas de árvores.” XXVI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária y Ambiental. Lima, Peru.

Stauber, J. L., Florence, T. M., Davies, C. M., Adams, M.S. e Buchanan, S. J., (1999). “Bioavailability of Al in alum-treated drinking water.” *Journal of AWWA* **91**(11), 84-93.

Thomas, P.R., Allen, D. and McGregor, D.L., (1996). “Evaluation of combined chemical and biological nutrient removal.” *Journal of AWWA*, **34**(11), 285-292.

Tsutiya, M.T.e Hirata, A.Y., (2001). “Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo.” 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. 9p

Von Sperling, M. (1996a). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 243p.

Von Sperling, M. (1996b). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 211p.

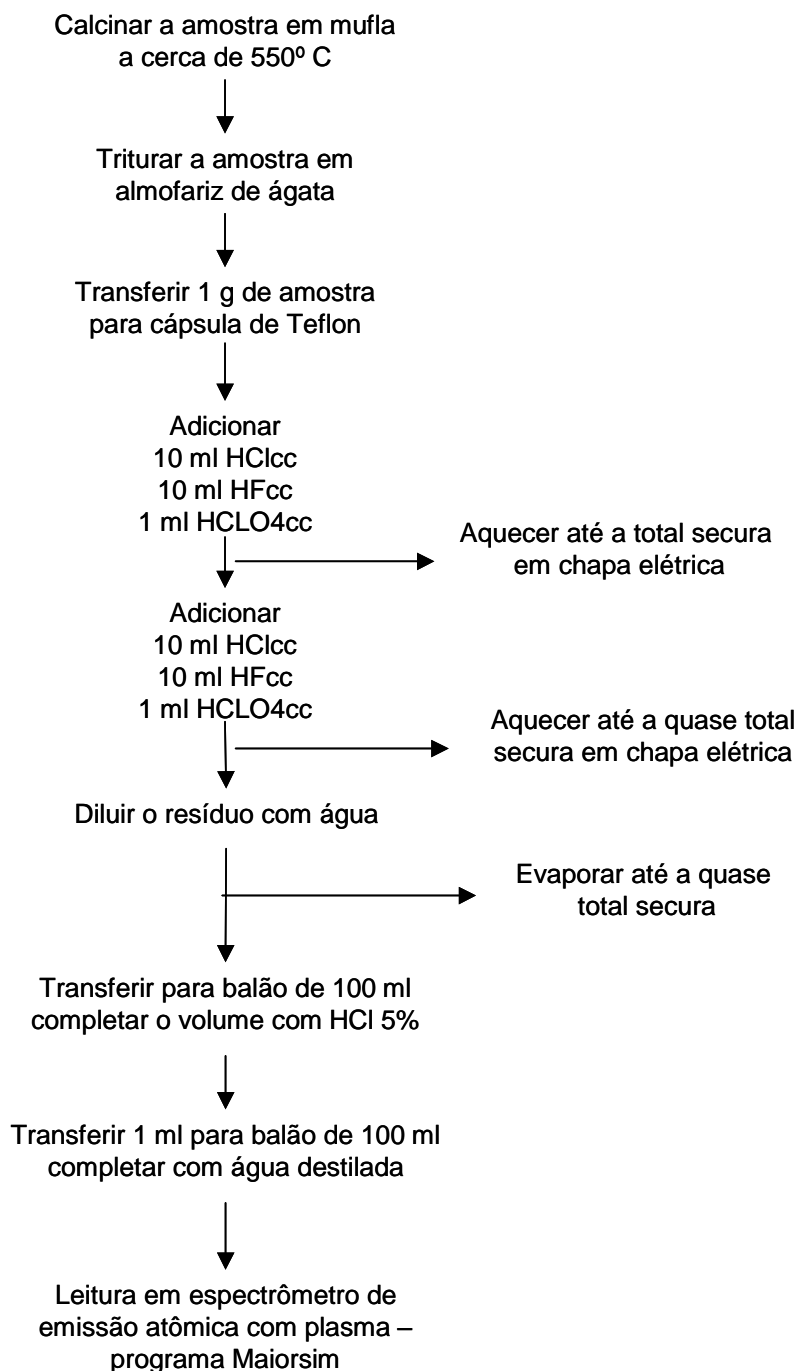
Von Sperling, M. (1997). *Lodos Ativados*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 416p.

Weber Jr., W.J. (1972). *Phisicochemical processes for water quality control*. John Wiley & Sons, USA, 640p.

WHO (1993). *Guidelines for drinking-water quality*. Vol. **2**. 2ª Edição. World Health Organization, Geneva, 973p.

APÊNDICE A - METODOLOGIA UTILIZADA NA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE LODO PARA LEITURA DE METAIS PESADOS

O diagrama a seguir apresenta os procedimentos adotados na solubilização dos metais contidos nas amostras de lodo para leitura da concentração desses metais pesados em espectrômetro de emissão atômica com plasma.



APÊNDICE B - RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES

As tabelas a seguir apresentam os resultados dos ensaios de sedimentação desenvolvidos durante a etapa de testes preliminares desse trabalho. Ao longo desses testes variamos o tipo e a dosagem de coagulante, as demais condições operacionais foram mantidas sempre constantes e estão descritas na Tabela 5.1.

As amostras utilizadas nos testes preliminares foram coletadas no canal que recebe o efluente dos decantadores secundários da ETE Norte, antes do ponto onde é adicionado o sulfato de alumínio para o polimento final dos efluentes.

Tabela B.1 - Teste preliminar 01 - Variação da dosagem de Sulfato de Alumínio

Dosagem (mg Al/l)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção (%)
0	7,1	3,9	0,46	67
2,7	6,8	1,2	0,08	95
4	6,9	0,6	0,03	98
5,3	6,4	0,5	0,03	98
6,7	6,2	0,5	0,03	98
8	6,0	0,6	0,03	98

Tabela B.2 - Teste preliminar 02 - Variação da dosagem de Lodo da ETA Rio Descoberto

Dosagem (mg Al/l)	PH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção(%)
0,0	7,3	3,81	0,46	0
0,6	7,3	5,64	0,45	3
1,3	7,2	7,04	0,42	10
1,9	7,2	6,84	0,40	12
2,6	7,2	9,73	0,41	12
3,2	7,2	9,78	0,40	12

Tabela B.3 - Teste preliminar 03 - Variação da dosagem de Lodo da ETA Rio Descoberto

Dosagem (mg Al/l)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção(%)
0,0	7,6	5,79	0,68	0
3,8	7,5	21,40	0,61	10
4,5	7,5	24,50	0,66	3
5,1	7,5	27,20	0,41	16
6,4	7,5	31,40	0,58	15
7,1	7,5	29,20	0,55	19

Tabela B.4 - Teste preliminar 04 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA Rio Descoberto

Dosagem (mg Al/l)	pH	Amostra s/ filtrar			Amostra filtrada		
		Turbidez (uT)	Ortofosfato		Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção (%)		(mg P/L)	Remoção (%)
0,0	6,8	5,1	0,67	0	1,8	0,63	0
0,6	6,6	6,5	0,60	10	1,9	0,55	13
1,3	6,4	6,2	0,60	11	1,9	0,53	16
1,9	6,2	6,1	0,59	12	1,9	0,51	19
2,6	6,1	7,1	0,59	12	1,8	0,45	29
3,2	6,0	7,7	0,59	12	1,8	0,38	40

Obs: O pH do lodo acidificado utilizado nesse experimento foi de 2,19.

Tabela B.5 - Teste preliminar 05 - Variação da dosagem de Lodo da ETA Pípiripau

Dosagem (mg Al/l)	PH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção (%)
0,0	7,3	4,24	0,53	0
0,8	7,2	5,76	0,54	-3
1,6	7,2	7,55	0,51	4
2,4	7,2	8,96	0,52	2
3,2	7,2	8,72	0,49	8
4,0	7,2	9,10	0,46	13

Tabela B.6 - Teste preliminar 06 - Variação da dosagem de Lodo da ETA Pípiripau

Dosagem (mg Al/l)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção (%)
0,0	7,3	3,7	0,25	0
0,8	7,3	4,9	0,24	2
1,6	7,4	7,4	0,23	4
2,4	7,4	9,4	0,24	2
3,2	7,4	12,4	0,21	8
4,0	7,4	11,2	0,21	7

Tabela B.7 - Teste preliminar 07 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA Pípiripau

Dosagem (mg Al/l)	PH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção(%)
0,0	7,3	3,6	0,22	0
0,8	6,9	4,2	0,21	6
1,6	6,5	5,6	0,23	-5
2,4	5,9	2,0	0,12	48
3,2	5,2	1,6	0,08	64
4,0	4,2	2,3	0,16	28

Obs: O pH do lodo acidificado utilizado nesse experimento foi 1,87.

Tabela B.8 - Teste preliminar 08 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA Pípiripau

Dosagem (mg Al/l)	PH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção (%)
0,0	7,3	3,0	0,26	0
2,4	6,8	5,6	0,22	16
3,6	6,5	4,2	0,10	61
4,8	5,9	2,9	0,07	73
6,0	5,5	3,0	0,04	84

Obs: O pH do lodo acidificado utilizado nesse experimento foi de 1,87.

Tabela B.9 - Teste preliminar 09 - Variação da dosagem de lodo da ETA Pípiripau, aplicado em conjunto com o sulfato de alumínio.

Dosagem (mg Al/L)		pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
Sulfato	Lodo			(mg P/L)	Remoção (%)
1	0,0	6,7	3,5	0,15	0
1	1,2	6,7	5,2	0,14	5
1	2,4	6,7	6,2	-	-
1	3,6	6,7	5,8	-	-
1	4,8	6,7	5,9	-	-
1	6	6,7	4,8	0,12	21

Tabela B.10 - Teste preliminar 10 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA RD.

Dosagem (mg Al/l)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção(%)
0,0	7,2	2,84	0,17	0
2,6	6,5	6,54	-	-
3,8	6,0	7,89	-	-
5,1	5,6	7,29	-	-
6,4	4,8	6,83	-	-
7,7	4,0	9,55	0,14	19

Obs: Nesse experimento o pH do lodo acidificado foi de 1,83.

Tabela B.11 - Teste preliminar 11 - Variação da dosagem de Lodo acidificado da ETA Pípiripau.

Dosagem (mg Al/l)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção(%)
0,0	7,3	3,6	0,36	0
2,4	6,3	2,6	0,14	62
3,6	5,9	1,9	0,07	80
4,8	5,5	1,9	0,05	85
6,0	4,9	2,4	0,07	81
7,2	4,6	2,1	0,10	72

Obs: Nesse experimento o pH do lodo acidificado foi de 1,83.

Tabela B.12 - Teste preliminar 12 - Análise da reprodutibilidade dos resultados obtidos para a “dosagem ótima” definida no teste preliminar 11, utilizando-se a mesma amostra de esgoto e a mesma suspensão de lodo.

Dosagem (mg Al/L)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção (%)
0,0	7,0	2,7	0,34	0
6,0	5,3	3,3	0,08	77
6,0	5,3	2,7	0,05	84
6,0	5,3	3,4	0,08	78

Tabela B.13 - Teste preliminar 13 - Análise da reprodutibilidade dos resultados obtidos no teste preliminar 11, utilizando-se nova amostra de lodo da ETA Pípiripau.

D (mg Al/L)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
			(mg P/L)	Remoção (%)
0,0	7,2	3,3	0,40	0
3,6	6,5	5,0	0,29	27
4,8	6,3	4,1	0,19	52
6,0	6,1	2,9	0,10	76
7,2	5,8	3,1	0,08	81
8,4	5,5	3,3	0,06	84

Obs: Nesse experimento o pH do lodo acidificado foi de 1,83.

APÊNDICE C - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLOTAÇÃO E DE SEDIMENTAÇÃO

Nesta seção encontram-se os resultados operacionais dos experimentos que foram realizados utilizando-se os efluentes do tratamento biológico da ETEB Sul e da ETE Samambaia. Seguindo a metodologia proposta, cada experimento incluiu uma série de ensaios de flotação e de sedimentação. Algumas séries tiveram que ser interrompidas em algum momento por problemas operacionais, os resultados parciais dessas séries também foram apresentados. Nas tabelas a seguir, a faixa cinza indica os valores “ótimos” adotados em cada etapa.

C.1 - EXPERIMENTO 01 - ETEB SUL

Tabela C.1 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 23/09/2002 e utilizada no experimento 01

Parâmetros	Valores
pH	6,9
Turbidez (uT)	11,1
Ortofosfato (mg P/L)	0,27
Fósforo Total (mg P/L)	1,80
DQO (mg/L)	55,2

C.1.1 - Ensaio de sedimentação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.2 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação
D (mg Al/L)	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)
Variável	100	60	25	15	25,2

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação

Tabela C.3 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	pH	Turbidez (uT)	Orto (mg P/L)	P _T (mg P/L)	R (%)	
					Orto	P _T
0	6,8	13,6	0,13	1,79	0	0
3	6,1	7,8	0,09	0,68	34	62
4	5,6	8,0	0,11	0,74	19	59
5	5,4	9,4	0,09	0,77	29	57
6	4,9	10,7	0,15	0,73	-17	59
7	4,7	6,4	0,12	0,66	9	63
8	4,6	8,3	0,14	0,69	-7	61
9	4,5	10,3	0,15	0,73	-12	59
10	4,4	10,4	0,14	0,66	-4	63

Legenda: D-Dosagem, Orto-ortofosfato, P_T-Fósforo Total, R-Eficiência de remoção

Tabela C.4 - Experimento 01 - ETE Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado

D (mg Al/L)	pH	Turbidez (uT)	Orto (mg P/L)	P _T (mg P/L)	R (%)	
					Orto	P _T
0	7,0	12,2	0,15	1,79	0	0
3	6,1	11,0	0,14	0,99	10	45
4	5,6	9,4	0,10	0,76	34	58
5	5,3	9,3	0,15	0,84	1	53
6	4,7	6,7	0,17	0,70	-14	61
7	4,3	16,6	0,16	0,71	-6	60
8	4,0	12,0	0,13	0,75	14	58
9	3,7	7,6	0,10	0,55	32	69
10	3,7	13,0	0,15	0,74	3	59

Legenda: D-Dosagem, Orto-ortofosfato, P_T-Fósforo Total, R-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da taxa de aplicação “ótima”

Tabela C.5 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida				Mistura Lenta		Sedimentação
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)
3	3,5	100	60	25	15	variável

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de Aplicação

Tabela C.6 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação “ótima”

T _A (m ³ /m ² /dia)	Turbidez (uT)		ortofosfato (mg P/L)		Fósforo Total (mg P/L)	
	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo
infinita	12	29,8	0,23	0,19	-	1,80
50,4	11,2	21,0	0,17	0,17	-	1,00
25,2	6,6	9,8	0,13	0,11	-	0,64
16,8	3,2	4,9	0,07	0,09	-	0,41
12,6	3,0	3,7	0,08	0,06	-	0,41
10,1	2,2	3,8	0,05	0,04	-	0,48

C.1.2 - ENSAIOS DE FLOTAÇÃO

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.7 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas.

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)		G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m/dia)	T _R (%)	P _S (kPa)
Sulfato	Lodo							
Variável		1000	60	100	15	230,4	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.8 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação – Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio e lodo acidificado.

Sulfato de alumínio				Lodo			
Dosagem (mg Al/L)	pH	Turbidez (uT)	Orto (mg P/L)	Dosagem (mg Al/L)	pH	Turbidez (uT)	Orto (mg P/L)
0	7,1	2,56	0,26	0,0	6,98	1,72	0,32
1,5	6,5	0,91	0,08	2,6	5,57	3,31	0,19
3	6,2	0,80	0,05	3,5	5,00	2,27	0,11
4	5,9	0,83	0,04	4,3	4,91	3,13	0,09
5	5,7	0,82	0,06	5,2	4,53	3,84	0,12
6	5,1	0,91	0,06	6,1	4,13	7,36	0,20
7	4,9	0,89	0,07	6,9	3,89	5,49	0,16
8	4,8	1,14	0,06	7,8	3,72	5,30	0,17
9	4,9	1,85	0,08	8,7	3,16	6,59	0,18
10	4,8	2,90	0,11				

Legenda: D-Dosagem

Tabela C.9 - Experimento 01 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Ajuste da dosagem “ótima” para o lodo acidificado

D (mg Al/L)	pH	Turbidez (uT)	Orto (mg P/L)	P _T (mg P/L)	DQO (mg/L)
0	6,9	2,17	0,30	1,75	48,0
3,7	5,7	4,26	0,15	0,45	38,7
4,5	5,5	3,06	0,11	0,38	35,5
5,3	5,2	4,76	0,09	0,36	42,0
6,1	4,7	4,36	0,14	0,45	26,9
6,8	4,6	8,21	0,16	0,40	27,2

Legenda: D-Dosagem, Orto-Ortofosfato, P_T-Fósforo Total

2ª Etapa - Definição da Taxa de Aplicação “ótima”

Tabela C.10 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L) Lodo	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)	T _R (%)	P _S (kPa)
5,3	1000	60	100	15	Variável	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.11 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de “taxa de aplicação ótima” para o lodo acidificado

T _A (m/dia)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
460,8	8,67	0,14
230,4	6,93	0,13
153,6	5,63	0,11
115,2	4,98	0,12

Legenda: T_A-Taxa de Aplicação

3ª Etapa - Definição da Taxa de recirculação “ótima”

Tabela C.12 - Experimento 01 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L) Lodo	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)	T _R (%)	P _S (kPa)
5,3	1000	60	100	15	153,6	Variável	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.13 - Experimento 01 - ETEB Sul - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (T_R) “ótima”

T_R (%)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	9,13	0,21
10	6,10	0,17
15	5,53	0,16
20	4,49	0,13

4ª Etapa - Definição do tempo de floculação “ótimo”

Tabela C.14 - Experimento 01 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L) Lodo	G (s^{-1})	T_C (s)	G (s^{-1})	T_F (min)	T_A (m/dia)	T_R (%)	P_S (kPa)
5,3	1000	60	100	variável	153,6	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C -Tempo de coagulação, T_F -Tempo de floculação, T_A -Taxa de aplicação, T_R -Taxa de recirculação, P_S -Pressão de saturação

Tabela C.15 - Experimento 01 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (T_F) “ótimo”

T_F (min)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	7,61	0,26
15	3,64	0,18
20	5,25	0,19
30	3,90	0,12

Legenda: T_F -Tempo de floculação

C.1.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”

Tabela C.16 - Experimento 01 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação e de flotação

Sedimentação								
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação			
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A		
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m/dia)		
3	4	100	60	40	15	10,1		

Flotação								
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
4	5,3	1000	60	100	30	153,6	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.17 - Experimento 01 - ETEB Sul - Análise do “ponto ótimo”

Processo		Sedimentação		Flotação		Amostra Bruta
Coagulante		Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	
pH		6,1	5,6	5,9	5,2	6,9
Turbidez	(uT)	2,2	3,8	-	3,9	11,1 uT
	E (%)	80	66	-	65	
Orto	(mg P/L)	0,05	0,04	-	0,12	0,27 mg P/L
	E(%)	81	85	-	56	
P _T	(mg/L)	-	0,48	-	-	1,8 mg P/L
	E (%)	-	73	-	-	

Legenda: P_T-fósforo Total, Orto-ortofosfato

C.2 - EXPERIMENTO 02 - ETEB SUL

Tabela C.18 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 08/10/2002 e utilizada no experimento 02

Parâmetros	Valores
pH	7,1
Turbidez (uT)	24,6
Ortofosfato (mg P/L)	0,92
Fósforo Total (mg P/L)	3,51

C.2.1 - Ensaios de sedimentação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.19 - Experimento 02 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas.

Mistura Rápida			Floculação		Sedimentação
D (mg Al/L)	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)
Variável	100	60	25	15	25,2

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, TC-Tempo de coagulação, TF-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação

Tabela C.20 - Experimento 02 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	pH	Turbidez (uT)	Orto (mg P/L)	P _T (mg P/L)	E (%)	
					Orto	P _T
0,0	7,0	18,3	0,86	2,40	0	0
1,5	6,7	10,7	0,57	1,72	33	29
3,0	6,3	7,5	0,31	1,04	64	57
4,0	6,2	4,9	0,23	0,71	74	71
5,0	5,9	3,9	0,22	0,65	74	73
6,0	5,7	5,8	0,35	0,86	59	64

Legenda: D-Dosagem, Orto-Ortofosfato, P_T-Fósforo Total, E-Eficiência de remoção

Tabela C.21 - Experimento 02 - ETE Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado

D (mg Al/L)	pH	Turbidez (uT)	Orto (mg P/L)	P _T (mg P/L)	E (%)	
					Orto	P _T
0,0	7,1	19,5	0,74	2,46	0	0
1,5	6,7	17,0	0,68	1,54	8	37
3,0	5,7	9,2	0,31	0,94	58	62
4,0	5,9	8,5	0,21	0,66	71	73
5,0	5,9	6,9	0,19	0,89	74	64
6,0	5,6	6,9	0,18	0,60	76	76
7,0	5,0	12,3	0,25	0,83	67	66
8,0	4,7	11,8	0,28	0,68	62	72

Legenda: D-Dosagem, Orto-Ortofosfato, P_T-Fósforo Total, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da taxa de aplicação “ótima”

Tabela C.22 - Experimento 02 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)
6	100	60	25	15	variável

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de Aplicação

Tabela C.23 - Experimento 02 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação (T_A) ”ótima”

T _A (m/dia)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
infinita	41,9	1,24
50,4	23,2	0,36
25,2	13,2	0,22
16,8	8,2	0,12
12,6	5,1	0,04
10,1	4,1	0,03

C.2.2 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”

Tabela C.24 - Experimento 02 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação	
D (mg Al/L)		G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)
Sulfato	Lodo					
5	6	100	60	40	15	10,1

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação

Tabela C.25 - Experimento 02 - ETEB Sul - Análise do “ponto ótimo”

Processo		Sedimentação		Amostra Bruta
Coagulante		Sulfato	Lodo	
pH		5,9	5,6	7,1
Turbidez	(uT)	-	4,1	24,6 uT
	E (%)	-	83	
Orto	(mg P/L)	-	0,03	0,92 mg P/L
	E(%)	-	97	

Legenda: P_T-fósforo Total, Orto-ortofosfato

C.3 - EXPERIMENTO 03 - ETEB SUL

Tabela C.26 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 15/10/2002 e utilizada no experimento 03

Parâmetros	Valores
pH	7,1
Turbidez (uT)	12,3
Ortofosfato (mg P/L)	0,88

C.3.1 - Ensaio de sedimentação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.27 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Floculação		Sedimentação
D (mg Al/L)	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)
Variável	100	60	25	15	25,2

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação

Tabela C.28 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	pH	Temp (°C)	Turbidez (uT)	Orto	
				(mg P/L)	E (%)
0	7,0	21,9	7,7	0,88	0
1,5	6,6	21,7	6,7	0,60	32
3	6,2	21,8	7,3	0,52	41
4	6,0	22,0	7,0	0,55	38
5	5,8	22,1	5,5	0,42	52
6	5,3	23,5	5,7	0,37	58
7	4,9	23,4	10,0	0,62	30
8	4,7	23,5	10,2	0,55	38
9	4,7	23,6	9,5	0,54	39

Legenda: D-Dosagem, Orto-ortofosfato, E-Eficiência de remoção

Tabela C.29 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado

D (mg Al/L)	pH	Temp (°C)	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg P/L)	E (%)
0	7,1	23,1	10,4	0,83	0
1,5	6,6	23,2	12,6	0,83	0
3	6,2	23,5	11,1	0,59	29
4	5,9	23,8	7,7	0,34	59
5	5,7	23,8	11,8	0,40	52
6	5,4	24	8,1	0,28	66
7	5,0	25,2	11,6	0,10	88
8	4,7	25,2	7,9	0,26	69
9	4,6	25,2	11,2	0,34	59
10	4,4	25,3	10,3	0,32	61
11	4,2	25,5	8,8	0,28	66
12	4,1	25,7	7,2	0,25	70

Legenda: D-Dosagem, Temp-temperatura, P_T-Fósforo Total, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da taxa de aplicação “ótima”

Tabela C.30 - Experimento 03 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação	
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)
6	7	100	60	25	15	variável

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de Aplicação

Tabela C.31 - Experimento 03 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação “ótima”

Taxa de Aplicação (m/dia)	Turbidez (uT)		Ortofosfato (mg P/L)	
	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo
infinita	15,4	24,5	0,94	0,97
50,4	15,4	12,1	0,17	0,50
25,2	7,3	8,9	0,41	0,37
16,8	6,2	5,3	0,35	0,26
12,6	3,1	2,7	0,23	0,21
10,1	3,2	2,9	0,20	0,20

C.3.2 - Ensaio de flotação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.32 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
Variável		1000	60	100	15	921,6	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.33 - Experimento 03 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio e lodo acidificado

D (mg Al/L)	pH		Temperatura (°C)		Turbidez (uT)		Ortofosfato (mg P/L)	
	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo
0	6,8	6,8	24	24	1,6	1,6	0,77	0,77
4	5,5	5,6	25,2	22	2,4	8,9	0,35	0,41
5	4,8	4,7	19,5	24	9,1	9,5	0,45	0,37
6	4,8	4,3	19,7	24,8	17,0	12,3	0,54	0,34
7	4,6	4,2	20,5	24,1	17,2	10,5	0,52	0,34
8	4,5	3,9	20,5	-	13,9	9,7	0,69	0,31
9	-	3,4	-	22,5	-	10,3	-	0,34
10	-	3,4	-	22,7	-	9,8	-	0,31

Legenda: D-Dosagem

C.3.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”

Tabela C.34 - Experimento 03 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação e de flotação

Sedimentação							
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação		
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A	
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	
6	7	100	60	40	15	10,1	

Flotação								
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
4	6	1000	60	100	-	-	-	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.35 - Experimento 03 - ETEB Sul - Análise do “ponto ótimo”

Processo		Sedimentação		Flotação		Amostra Bruta
Coagulante		Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	
pH		5,3	5,0	5,5	4,8	7,1
Turbidez	(uT)	3,2	2,9	-	-	12,3 uT
	E (%)	74	76	-	-	
Orto	(mg P/L)	0,20	0,20	-	-	0,88 mg P/L
	E(%)	77	77	-	-	

Legenda: P_T-fósforo Total, Orto-ortofosfato

C.4 - EXPERIMENTO 04 - ETEB SUL

Tabela C.36 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 22/10/2002 e utilizada no experimento 04

Parâmetros	Valores
pH	6,6
Turbidez (uT)	15,1
P _T (mg P/L)	2,14
Ortofosfato (mg P/L)	0,67
DQO (mg/L)	67
SST	35

C.4.1 - Ensaios de sedimentação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.37 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Floculação		Sedimentação
D (mg Al/L)	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m/dia)
Variável	100	60	25	15	25,2

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação

Tabela C.38 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa do ensaio de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	pH	Temp (°C)	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg P/L)	R (%)
0	7,0	22,6	15,0	0,42	0
1,5	6,7	22,6	6,0	0,20	52
3	6,2	22,7	6,1	0,19	54
4	6,0	22,6	7,4	0,22	48
5	5,7	22,9	11,3	0,28	33
6	5,1	23,7	12,8	0,29	30

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, R-Eficiência de remoção

Tabela C.39 - Experimento 04 - ETE Sul - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado

D (mg Al/L)	pH	Temp (°C)	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg P/L)	E (%)
0	7,0	23,9	12,9	0,41	0
1,5	6,7	23,9	12,8	0,38	6
3	6,3	24,0	8,4	0,22	45
4	6,1	24,1	4,5	0,14	65
5	5,9	24,1	5,4	0,16	62
6	5,6	24,3	5,7	0,12	72
7	5,0	26,4	10,6	0,22	45
8	4,7	26,4	10,3	0,18	55
9	4,6	26,4	9,2	0,18	55
10	4,5	26,5	7,5	0,19	54
11	4,4	26,5	5,9	0,14	66
12	4,3	26,5	9,6	0,17	57

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, R-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da taxa de aplicação “ótima”

Tabela C.40 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação	
D (mg Al/L)		G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)
Sulfato	Lodo					
3	3 6	100	60	25	15	25,2

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de Aplicação

Tabela C.41 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa do ensaio de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação “ótima”

Taxa de Aplicação (m ³ /m ² /dia)	Turbidez (uT)			Ortofosfato (mg P/L)		
	Sulfato	Lodo		Sulfato	Lodo	
Dosagem	(3mg Al/L)	(3mg Al/L)	(6mg Al/L)	(3mg Al/L)	(3mg Al/L)	(6mg Al/L)
infinita	17,7	22,8	32,7	0,55	0,55	0,43
50,4	12,3	13,2	27,7	0,40	0,39	0,30
25,2	11,4	7,83	10,5	0,29	0,29	0,20
16,8	3,83	4,68	7,1	0,14	0,23	0,15
12,6	3,08	3,44	5,7	0,15	0,19	0,13
10,1	2,4	3,7	3,6	0,09	0,20	0,09

C.4.2 - Ensaio de flotação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.42 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa do ensaio de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida		Mistura Lenta		Flotação				
D (mg Al/L)		G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)	T _R (%)	P _S (kPa)
Sulfato	Lodo							
Variável		1000	60	100	15	230,4	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.43 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	pH	Temp (°C)	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg P/L)	E (%)
0	7,0	23,9	1,9	0,47	0
3	5,6	23,9	1,4	0,10	78
4	5,2	24,0	1,5	0,07	85

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

Tabela C.44 - Experimento 04 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da dosagem ótima do Lodo acidificado

D (mg Al/L)	pH	Temp (°C)	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg P/L)	E(%)
0	7,0	21,8	1,9	0,48	0
3	6,1	21,9	3,5	0,19	60
4	5,2	22,9	4,2	0,16	66
5	5,5	23,1	3,8	0,13	72
6	4,6	23,6	-	0,12	76
7	4,8	23,7	-	0,13	73
8	4,0	27,9	4,1	0,14	71
9	4,1	27,9	3,1	0,12	75

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da Taxa de Aplicação “ótima”

Tabela C.45 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L) Lodo	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)	T _R (%)	P _S (kPa)
6	1000	60	100	15	230,4	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.46 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (T_A) “ótima” para o lodo acidificado

T_A (m/dia)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
460,8	6,76	0,12
230,4	9,61	0,11
153,6	8,85	0,09
115,2	4,34	0,10

3ª Etapa - Definição da Taxa de recirculação “ótima”

Tabela C.47 - Experimento 04 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L) Lodo	G (s^{-1})	T_C (s)	G (s^{-1})	T_F (min)	T_A ($m^3/m^2/dia$)	T_R (%)	P_S (kPa)
6	1000	60	100	15	153,6	variável	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C -Tempo de coagulação, T_F -Tempo de floculação, T_A -Taxa de aplicação, T_R -Taxa de recirculação, P_S -Pressão de saturação

Tabela C.48 - Experimento 04 - ETEB Sul - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (T_R) “ótima”

T_R (%)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	22,6	0,40
10	5,7	0,12
15	5,2	0,13
20	2,9	0,11

4ª Etapa - Definição do tempo de floculação “ótimo”

Tabela C.49 - Experimento 04 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L) Lodo	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)	T _R (%)	P _S (kPa)
6	1000	60	100	variável	153,6	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.50 - Experimento 04 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (T_F) “ótimo”

T _F (min)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	6,9	0,17
15	3,8	0,10
20	4,6	0,07
30	2,9	0,07

C.5.2 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”

Tabela C.51 - Experimento 04 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação e de flotação

Sedimentação								
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação			
D (mg Al/L) Sulfato	Lodo	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m/dia)		
3	46	100	60	40	15	10,1		
Flotação								
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L) Sulfato	Lodo	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)	T _R (%)	P _S (kPa)
4	6	1000	60	100	20	153,6	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.52 - Experimento 04 - ETEB Sul - Análise do “ponto ótimo”

Processo		Sedimentação		Flotação		Amostra Bruta
Coagulante		Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	
pH		6,1	5,6	4,9	4,3	6,6
Turbidez	(uT)	2,4	3,6	2,2	4,2	15,1uT
	E (%)	84	76	85	72	
Orto	(mg P/L)	0,09	0,09	0,08	0,08	0,67mg P/L
	E(%)	87	87	88	88	
P _T	(mg P/L)	-	-	0,19	0,20	2,14mg P/L
	E(%)			91	91	
DQO	(mg/L)	-	-	23,5	22,2	67mg/L
	E (%)	-	-	65	67	
SST _L	(mg/L)	4	2	2	9	35mg/L
	E (%)	89	94	94	74	
SST _S	(mg/L)	459	855	2011	6765	-
V _L	(cm ³ /L))	63	31	17	14	-

Legenda: P_T-fósforo Total, Orto-ortofosfato, SST_L-sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_S-sólidos em suspensão totais na fase sólida, V_L-Volume de lodo gerado/L de efluente tratado

C.5 - EXPERIMENTO 05 - ETEB SUL

Tabela C.53 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETEB Sul, coletada em 10/11/2002 e utilizada no experimento 05

Parâmetros	Valores
pH	7,2
Turbidez (uT)	6,0
Ortofosfato (mg P/L)	2,17
Fósforo Total (mg P/L)	3,00
DQO (mg/L)	48
SST (mg/L)	10,3

C.5.1 - Ensaios de flotação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.54 - Experimento 05 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
Variável		1000	60	100	15	230,4	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.55 - Experimento 05 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg P/L)	E (%)
0	21,6	7,3	2,2	1,70	0
5	21,8	6,3	3,2	0,53	69
7	22,1	6,0	4,3	0,47	72
9	22,2	5,5	3,8	0,32	81
11	23,7	4,9	6,3	0,25	85
12	22,3	4,8	12,7	0,25	85
13	23,5	4,6	7,0	0,25	85
14	22,3	4,6	11,5	0,17	90
15	22,6	4,5	8,9	0,25	85

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

Tabela C.56 - Experimento 05 - ETEB Sul - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da dosagem “ótima” do Lodo acidificado

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)
0	23,9	7,1	3,2	1,68	0
3	23,9	6,5	4,4	1,15	31
4	23,2	6,3	5,6	1,09	35
5	23,4	6,3	5,6	0,89	47
6	23,8	6,1	6,0	0,74	56
7	23,9	6,1	6,6	0,66	61
8	24,1	5,8	7,3	0,58	65
9	24,1	5,9	5,0	0,36	78
10	24,2	5,7	6,3	0,33	80
11	24,2	5,3	5,3	0,26	84
12	24,5	5,1	5,7	0,23	86
13	24,3	4,8	5,5	0,20	88
14	21,1	4,7	13,7	0,39	77
15	21,2	4,7	15,8	0,46	73

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da Taxa de Aplicação “ótima”

Tabela C.57 - Experimento 05 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
13	1000	60	100	15	variável	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.58 - Experimento 05 - ETEB Sul - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (T_A) “ótima” para o lodo acidificado

T_A (m/dia)	Turbidez (uT)	Ortofosfato (mg P/L)
460,8	11,3	0,35
230,4	8,9	0,27
153,6	7,6	0,25
115,2	7,1	0,25

3ª Etapa – Definição da Taxa de recirculação “ótima”

Tabela C.59 - Experimento 05 - ETEB Sul - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T_C	G	T_F	T_A	T_R	P_S
Lodo	(s^{-1})	(s)	(s^{-1})	(min)	($m^3/m^2/dia$)	(%)	(kPa)
13	1000	60	100	15	153,6	variável	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C -Tempo de coagulação, T_F -Tempo de floculação, T_A -Taxa de aplicação, T_R -Taxa de recirculação, P_S -Pressão de saturação

Tabela C.60 - Experimento 05 – ETEB Sul – 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (T_R) “ótima”

T_R (%)	Turbidez (uT)	Ortofosfato (mg P/L)
5	11,7	0,34
10	7,5	0,22
15	7,2	0,19
20	6,2	0,16

4ª Etapa - Definição do Tempo de floculação “ótimo”

Tabela C.61 - Experimento 05 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m/dia)	(%)	(kPa)
13	1000	60	100	variável	153,6	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.62 - Experimento 05 - ETEB Sul - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (T_F) “ótimo”

T _F (min)	Turbidez (uT)	Ortofosfato (mg P/L)
5	11,0	0,45
10	11,1	0,10
15	6,3	0,21
20	5,2	0,17

C.5.2 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”

Tabela C.63- Experimento 05 - ETEB Sul - Condições operacionais “ótimas” do processo de flotação

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S	
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
14	13	1000	60	100	20	153,6	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.64- Experimento 05- ETEB Sul - Análise dos “pontos ótimos”

Processo		Flotação		Amostra Bruta
Coagulante		Sulfato	Lodo	
pH		4,5	4,7	7,2
Turbidez	(uT)	5,8	5,6	6
	E (%)	3	7	
PT	(mg P/L)	0,33	0,28	3
	E(%)	89	91	
Orto	(mg P/L)	0,21	0,17	2,17
	E (%)	90	92	
DQO	(mg /L)	23	24	48
	E (%)	52	50	
SST _L	(mg/L)	10,8	5,3	10,5
	E (%)	-4	49	
SST _s	(mg/L)	3099	4931	-
V _L	(cm ³ /L))	21	17	-

Legenda: P_T-fósforo Total, Orto-ortofosfato, SST_L-sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_s-sólidos em suspensão totais na fase sólida, V_L-Volume de lodo gerado/L de efluente tratado

C.6 - EXPERIMENTO 01 - ETE SAMAMBAIA

Tabela C.65 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETE Samambaia, coletada em 25/11/2002 e utilizada no experimento 01

Parâmetros	Valores
pH	7,4
Turbidez (uT)	40,7
Ortofosfato (mg P/L)	10,8
DQO (mg/L)	117
SST (mg/L)	51
Clorofila-a (µg/L)	1180

C.6.1 - Ensaios de sedimentação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.66 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Floculação		Sedimentação
D (mg Al/L)	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)
Variável	100	60	25	15	25,2

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação

Tabela C.67 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa do ensaio de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	T _A = 25,2 m ³ /m ² /dia			T _A = 12,6 m ³ /m ² /dia		
			Turbidez (uT)	Ortofosfato		Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)		(mg Al/L)	E (%)
0	22,3	7,6	39,6	10,49	0	36,7	9,90	0
6	24,7	6,6	14,2	3,83	64	11,2	2,89	71
8	24,7	6,3	8,5	1,39	87	6,08	0,94	91
10	24,6	6,1	5,5	0,97	91	2,96	0,45	95
12	24,6	5,9	5,9	0,97	91	3,36	0,36	96
14	24,6	5,7	9,0	1,28	88	2,87	0,45	95
16	22,4	5,4	28,3	5,28	50	4,61	0,72	93
18	22,4	5,0	40,9	6,60	37	6,63	0,90	91
20	22,4	4,7	43,8	6,57	37	7,35	0,91	91
22	22,5	4,5	46,1	5,78	45	8,85	1,11	89
24	22,5	4,4	32,7	4,06	61	9,61	1,16	88

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, P_T-Fósforo Total, E-Eficiência de remoção, T_A-Taxa de aplicação

Tabela C.68 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação. Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg P/L)	E (%)
0	26,4	7,7	43,2	10,23	0
14	26,4	6,4	30,1	3,02	70
18	26,4	6,2	18,0	2,18	79
20	25,0	5,9	8,0	0,67	93
22	26,4	5,8	10,2	0,86	92
24	24,6	5,4	8,9	0,65	94
25	23,2	5,3	10,6	0,82	92
26	26,4	5,4	9,0	0,66	94
27	23,2	5,0	10,7	0,74	93
28	23,5	4,7	14,2	1,00	90
30	26,4	4,5	9,6	0,72	93
32	23,5	4,2	12,6	0,87	91

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa – Definição da taxa de aplicação “ótima”

Tabela C.69 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Floculação		Sedimentação	
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)
12	24	100	60	25	15	variável

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de Aplicação

Tabela C.70 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação (T_A) “ótima”

T_A ($m^3/m^2/dia$)	Turbidez (uT)		ortofosfato (mg P/L)	
	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo
infinita	46,4	126	11,25	10,56
50,4	40,7	82,6	8,45	6,53
25,2	5,91	10,1	1,31	0,64
16,8	4,11	8,9	0,80	0,72
12,6	4,33	6,4	0,85	0,55
10,1	3,46	5,3	0,74	0,47

C.6.2 - Ensaio de flotação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.71 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)		G (s^{-1})	T_C (s)	G (s^{-1})	T_F (min)	T_A ($m^3/m^2/dia$)	T_R (%)	P_S (kPa)
Sulfato	Lodo							
Variável		1000	60	100	10	153,6	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C -Tempo de coagulação, T_F -Tempo de floculação, T_A -Taxa de aplicação, T_R -Taxa de recirculação, P_S -Pressão de saturação

Tabela C.72 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)
0	25,6	7,3	29,2	8,02	0
8	25,6	6,3	12,3	2,87	64
10	26,3	6,2	10,7	2,16	73
12	26,3	5,7	8,1	1,08	87
14	26,3	5,3	6,0	0,62	92
16	21,1	4,9	8,7	0,59	93
18	21,5	4,7	9,3	0,50	94
20	22,0	4,5	11,3	0,30	96
22	22,2	4,4	5,6	0,25	97
24	24,0	4,3	11,7	0,98	88
26	24,0	4,3	7,9	0,68	92

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

Tabela C.73 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação – Definição da dosagem ótima do Lodo acidificado

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)
0	20,1	7,2	30,3	8,12	0
20	20,1	4,6	10,0	0,79	90
22	21	4,5	16,7	0,74	91
24	21	4,2	9,3	0,45	95
26	21	4,2	11,9	0,62	92
28	20	4,2	9,9	0,67	92
30	21	3,7	6,8	0,56	93

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da Taxa de Aplicação “ótima”

Tabela C.74 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
24	1000	60	100	10	variável	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.75 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (T_A) “ótima” para o lodo acidificado

T _A (m/dia)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
230,4	13,5	0,99
153,6	9,7	0,67
115,2	7,1	0,56
92,2	6,6	0,52

3ª Etapa - Definição da Taxa de recirculação “ótima”

Tabela C.76 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
24	1000	60	100	10	115,2	variável	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.77 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (T_R) “ótima”

T_R (%)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	14,8	1,16
10	11,9	0,78
15	10,9	0,85
20	9,7	0,51

4ª Etapa - Definição do Tempo de floculação “ótimo”

Tabela C.78 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T_C	G	T_F	T_A	T_R	P_S
Lodo	(s^{-1})	(s)	(s^{-1})	(min)	($m^3/m^2/dia$)	(%)	(kPa)
24	1000	60	100	variável	115,2	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C -Tempo de coagulação, T_F -Tempo de floculação, T_A -Taxa de aplicação, T_R -Taxa de recirculação, P_S -Pressão de saturação

Tabela C.79 - Experimento 01 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (T_F) “ótimo”

T_F (min)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	15,3	0,95
10	12,7	0,57
15	9,8	0,54
20	7,4	0,40

C.6.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”

Tabela C.80 - Experimento 01 - ETE Samambaia - Condições operacionais “ótimas” do processo de sedimentação e de flotação

Sedimentação								
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação			
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A		
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)		
12	24	100	60	40	15	10,1		

Flotação								
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
22	24	1000	60	100	20	115,2	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.81- Experimento 01 - ETE Samambaia - Análise do ponto “ótimo”

Processo		Sedimentação		Flotação		Amostra Bruta
Coagulante		Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	
pH		6,1	4,6	4,4	4,6	7,4
Turbidez	(uT)	2,2	4,2	10,1	7,9	40,7
	E (%)	95	90	75	81	
Orto	(mg P/L)	0,34	0,32	0,31	0,32	10,8
	E(%)	97	97	97	97	
DQO	(mg/L)	23	22	21	29	117
	E (%)	80	81	82	75	
Clorofila-a	(mg/L)	65	55	147	105	1180
	E (%)	94	95	88	91	
SST _L	(mg/L)	2,5	3	4	10,5	51
	E (%)	95	94	92	79	
SST _S	(mg/L)	2256	2613	5666	4773	-
V _L	(cm ³ /L))	63	88	36	46	-

Legenda: Orto-ortofosfato, SST_L-sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_S-sólidos em suspensão totais na fase sólida, V_L-Volume de lodo gerado por litro de efluente tratado.

C.7 - EXPERIMENTO 02 - ETE SAMAMBAIA

Tabela C.82 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETE Samambaia, coletada em 07/01/2003 e utilizada no experimento 02

Parâmetros	Valores
pH	7,4
Turbidez (uT)	51,5
Ortofosfato (mg P/L)	6,1
DQO (mg/L)	171
SST	96
Clorofila-a (µg/L)	1748

C.7.1 - Ensaio de sedimentação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.83 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Floculação		Sedimentação
D (mg Al/L)	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)
Variável	100	60	25	15	25,2

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação

Tabela C.84 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)
0	20,3	7,6	52,0	6,37	0
6	20,3	6,5	6,6	0,86	86
8	20,5	6,1	8,3	0,88	86
10	20,6	5,8	6,6	0,63	90
12	20,6	5,2	10,5	1,04	84
14	20,6	4,7	13,2	1,35	79

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

Tabela C.85 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação. Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)
0	22,1	7,7	53,7	6,44	0
8	23,4	6,2	26,0	2,44	62
10	23,5	6,0	14,0	0,96	85
12	23,5	5,7	10,6	0,76	88
14	23,5	5,3	8,6	0,64	90
16	23,5	4,7	10,1	0,59	91
18	23,5	4,5	8,4	0,56	91
20	22,1	4,3	11,9	0,79	88
22	22,1	4,2	11,5	0,86	86
24	22,1	4,0	10,0	0,83	87
26	22,1	3,7	9,3	1,01	84
28	22,1	3,6	9,8	0,91	86

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da taxa de aplicação “ótima”

Tabela C.86 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Floculação		Sedimentação	
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)
10	18	100	60	25	15	variável

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de Aplicação

Tabela C.87 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação (T_A) “ótima”

T_A ($m^3/m^2/dia$)	Turbidez (uT)		ortofosfato (mg P/L)	
	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo
infinita	68,4	147	8,45	7,00
50,4	61	61,7	8,15	4,29
25,2	26,1	11,8	2,87	0,83
16,8	5,85	9,78	0,66	0,68
12,6	5,84	5,82	0,61	0,55
10,1	3,26	5,3	0,34	0,42

C.7.2 - Ensaio de flotação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.88 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)	G	T_C	G	T_F	T_A	T_R	P_S	
Sulfato	Lodo	(s^{-1})	(s^{-1})	(min)	($m^3/m^2/dia$)	(%)	(kPa)	
variável		1000	60	100	10	153,6	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C -Tempo de coagulação, T_F -Tempo de floculação, T_A -Taxa de aplicação, T_R -Taxa de recirculação, P_S -Pressão de saturação

Tabela C.89 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)
0	20,0	7,5	38,5	5,45	0
6	25,1	6,2	12,4	1,53	72
8	22,4	5,7	9,5	1,05	81
10	22,3	5,3	5,3	0,39	93
12	22,4	4,9	5,1	0,29	95
14	22,6	4,7	4,3	0,30	94

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

Tabela C.90 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação – Definição da dosagem ótima do Lodo acidificado

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)
0	24,5	7,3	36,9	5,71	0
10	24,4	5,7	16,2	1,54	73
12	24,5	5,2	9,2	0,89	84
14	24,4	4,6	10,0	0,52	91
16	24,5	4,2	9,3	0,53	91
18	24,6	4,0	10,6	0,63	89
20	24,9	3,6	10,5	0,65	89
22	24,9	3,5	7,5	0,62	89

Legenda: D-Dosagem, Orto-Ortofosfato, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da Taxa de Aplicação “ótima”

Tabela C.91 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
14	1000	60	100	10	variável	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.92 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (T_A) “ótima” para o lodo acidificado

T _A (m/dia)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
230,4	11,0	0,83
153,6	7,2	0,66
115,2	5,3	0,44
92,2	4,1	0,42

3ª Etapa - Definição da Taxa de recirculação “ótima”

Tabela C.93 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
14	1000	60	100	10	115,2	variável	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.94 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (T_R) “ótima”

T _R (%)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	13,7	1,02
10	9,3	0,66
15	8,6	0,60
20	7,4	0,47

4ª Etapa - Definição do Tempo de floculação “ótimo”

Tabela C.95 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
14	1000	60	100	variável	115,2	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.96 - Experimento 02 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (T_F) “ótimo”

T_F (min)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	9,1	0,69
10	8,6	0,66
15	5,9	0,38
20	5,3	0,31

C.7.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”

Tabela C.97 - Experimento 02 - ETE Samambaia - Condições operacionais “ótimas” dos processos de sedimentação e de flotação

Sedimentação							
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação		
D (mg Al/L)	G	T_C	G	T_F	T_A		
Sulfato	Lodo	(s^{-1})	(s)	(s^{-1})	(min)	(m ³ /m ² /dia)	
10	18	100	60	40	15	10,1	

Flotação								
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)	G	T_C	G	T_F	T_A	T_R	P_S	
Sulfato	Lodo	(s^{-1})	(s)	(s^{-1})	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
12	14	1000	60	100	20	115,2	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C -Tempo de coagulação, T_F -Tempo de floculação, T_A -Taxa de aplicação, T_R -Taxa de recirculação, P_S -Pressão de saturação

Tabela C.98 - Experimento 02 - ETE Samambaia - Eficiência dos processos de flotação e de sedimentação nas condições operacionais “ótimas”

Processo		Sedimentação		Flotação		Amostra Bruta
Coagulante		Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	
pH		5,72	4,5	4,5	4,73	7,4
Turbidez	(uT)	2,2	4,5	3,2	5,6	51,5
	E (%)	96	91	94	89	
Orto	(mg P/L)	0,28	0,41	0,26	0,31	6,1
	E (%)	95	93	96	95	
DQO	(mg/L)	21,5	24,9	4,3	21,2	171
	E (%)	87	85	97	88	
Clorofila-a	(mg/L)	85	67	59	99	1748
	E (%)	95	96	97	94	
SST _L	(mg/L)	9	11	7	11	96
	E (%)	91	89	93	89	
SST _S	(mg/L)	1296	2704	6029	10078	-
V _L	(cm ³ /L))	144	82	31	24	-

Legenda: Orto-ortofosfato, SST_L-sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_S-sólidos em suspensão totais na fase sólida, V_L-Volume de lodo gerado por litro de efluente tratado

C.7 - EXPERIMENTO 03 - ETE SAMAMBAIA

Tabela C.99 - Caracterização da amostra bruta do efluente secundário da ETE Samambaia, coletada em 20/01/2003 e utilizada no experimento 03

Parâmetros	Valores
pH	7,4
Turbidez (uT)	42,5
Ortofosfato (mg P/L)	6,3
DQO (mg/L)	129
SST	74
Clorofila-a (µg/L)	1742

C.7.1 - Ensaios de sedimentação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.100 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Floculação		Sedimentação
D (mg Al/L)	G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)
Variável	100	60	25	15	25,2 e 16,8

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação

Tabela C.101 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa do ensaio de sedimentação - Definição da dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	TA = 25,2 m3/m2/dia			TA = 16,8 m3/m2/dia		
			Turbidez (uT)	Orto		Turbidez (uT)	Orto	
				(mg P/L)	E (%)		(mg P/L)	E (%)
0	25,1	7,8	47,0	5,97	0	47,0	5,97	0
6	23,3	6,4	4,8	0,69	88	1,9	0,36	94
8	23,2	6,1	4,5	0,59	90	1,9	0,25	96
10	23,2	5,5	8,0	1,04	83	2,6	0,37	94
12	23,1	4,9	17,4	1,85	69	3,0	0,46	92
14	23,1	4,6	23,6	2,81	53	6,5	0,76	87
16	23,1	4,5	21,2	2,53	58	5,5	0,79	87

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, P_T-Fósforo Total, E-Eficiência de remoção

Tabela C.102 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de sedimentação. Definição da dosagem “ótima” de lodo acidificado

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	R (%)
0	25,1	7,8	47,0	5,97	0
14	24,7	5,5	9,7	0,61	90
16	23	5,0	5,9	0,46	92
18	22,7	4,4	9,1	0,56	91
20	22,8	4,4	8,3	0,61	90
22	22,7	4,2	6,3	0,64	89

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da taxa de aplicação “ótima”

Tabela C.103 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Floculação		Sedimentação	
D (mg Al/L)		G (s ⁻¹)	T _C (s)	G (s ⁻¹)	T _F (min)	T _A (m ³ /m ² /dia)
Sulfato	Lodo					
8	16	100	60	25	15	variável

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de Aplicação

Tabela C.104 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de sedimentação - Definição da Taxa de aplicação (T_A) “ótima”

T _A (m ³ /m ² /dia)	Turbidez (uT)		ortofosfato (mg P/L)	
	Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo
infinita	54,7	114	6,30	7,00
50,4	58,5	58,2	6,40	4,13
25,2	7,3	7,84	0,94	0,56
16,8	4,41	6,63	0,51	0,50
12,6	2,89	5,99	0,30	0,44
10,1	1,67	3,81	0,21	0,34

C.7.2 - Ensaio de flotação

1ª Etapa - Definição da dosagem “ótima” de coagulante

Tabela C.105 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)		G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Sulfato	Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
variável		1000	60	100	10	153,6	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.106 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de dosagem “ótima” de sulfato de alumínio

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)
0	19,0	7,5	42,9	5,54	0
8	19,0	5,5	6,6	0,70	87
10	19,5	4,7	5,4	0,40	93
12	19,5	4,5	6,4	0,54	90
14	20,0	4,4	8,3	0,55	90
16	20,0	4,4	10,3	0,88	84

Legenda: D-Dosagem, Temp-Temperatura, E-Eficiência de remoção

Tabela C.107 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 1ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da dosagem ótima do Lodo acidificado

D (mg Al/L)	Temp (°C)	pH	Turbidez (uT)	Ortofosfato	
				(mg Al/L)	E (%)
0	19,0	7,5	42,9	5,54	0
8	24	6,2	26,9	3,14	43
10	24	5,5	20,4	2,26	59
12	24	4,5	19,8	1,78	68
14	24	4,2	11,5	0,93	83
16	24	3,8	10,0	0,98	82
18	24	3,7	9,2	0,97	82

Legenda: D-Dosagem, Orto-Ortofosfato, E-Eficiência de remoção

2ª Etapa - Definição da Taxa de Aplicação “ótima”

Tabela C.108 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
14	1000	60	100	10	variável	15	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.109 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 2ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição de taxa de aplicação (T_A) “ótima” para o lodo acidificado

T _A (m/dia)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
230,4	13,4	0,92
153,6	6,7	0,55
115,2	7,9	0,71
92,2	5,3	0,46

3ª Etapa - Definição da Taxa de recirculação “ótima”

Tabela C.110 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
14	1000	60	100	10	92,2	variável	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.111 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 3ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição da taxa de recirculação (T_R) “ótima”

T _R (%)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	11,4	1,02
10	6,2	0,51
15	9,5	0,79
20	5,2	0,47

4ª Etapa - Definição do Tempo de floculação “ótimo”

Tabela C.112 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Condições operacionais adotadas

Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação		
D (mg Al/L)	G	T _C	G	T _F	T _A	T _R	P _S
Lodo	(s ⁻¹)	(s)	(s ⁻¹)	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
14	1000	60	100	variável	92,2	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C-Tempo de coagulação, T_F-Tempo de floculação, T_A-Taxa de aplicação, T_R-Taxa de recirculação, P_S-Pressão de saturação

Tabela C.113 - Experimento 03 - ETE Samambaia - 4ª Etapa dos ensaios de flotação - Definição do tempo de floculação (T_F) “ótimo”

T_F (min)	Turbidez (uT)	ortofosfato (mg P/L)
5	7,6	0,56
10	7,7	0,64
15	5,1	0,47
20	4,5	0,43

C.7.3 - Avaliação dos processos em condições operacionais “ótimas”

Tabela C.114 - Experimento 03 - ETE Samambaia - Condições operacionais “ótimas” dos processos de sedimentação e de flotação

Sedimentação							
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Sedimentação		
D (mg Al/L)	G	T_C	G	T_F	T_A		
Sulfato	Lodo	(s^{-1})	(s)	(s^{-1})	(min)	(m ³ /m ² /dia)	
16	08	100	60	40	15	10,1	

Flotação								
Mistura Rápida			Mistura Lenta		Flotação			
D (mg Al/L)	G	T_C	G	T_F	T_A	T_R	P_S	
Sulfato	Lodo	(s^{-1})	(s)	(s^{-1})	(min)	(m ³ /m ² /dia)	(%)	(kPa)
10	14	1000	60	100	20	92,2	20	500

Legenda: D-Dosagem, G-Gradiente de velocidade, T_C -Tempo de coagulação, T_F -Tempo de floculação, T_A -Taxa de aplicação, T_R -Taxa de recirculação, P_S -Pressão de saturação

Tabela C.115 - Experimento 03 - ETE Samambaia – Eficiência dos processos de flotação e de sedimentação nas condições operacionais “ótimas”

Processo		Sedimentação		Flotação		Amostra Bruta
Coagulante		Sulfato	Lodo	Sulfato	Lodo	
pH		5,72	4,5	4,7	4,2	7,4
Turbidez	(uT)	1,67	3,81	2,9	4,5	42,5
	E (%)	96	91	93	89	
Orto	(mg P/L)	0,21	0,34	0,20	0,43	6,30
	E (%)	97	95	97	93	
DQO	(mg/L)	18,5	18,3	19	22,7	129
	E (%)	86	86	85	82	
Clorofila- a	(mg/L)	62	45	55	93	1742
	E (%)	96	97	97	95	
SST _L	(mg/L)	3,5	4,5	10	14,5	74
	E (%)	95	94	86	80	
SST _S	(mg/L)	1082	1933	5635	7543	-
V _L	(cm ³ /L))	132	75	33	24	-

Legenda: Orto-ortofosfato, SST_L-sólidos em suspensão totais na fase líquida, SST_S-sólidos em suspensão totais na fase sólida, V_L-Volume de lodo gerado por litro de efluente tratado