

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

**ESTUDO DO ADENSAMENTO E DESIDRATAÇÃO DOS
RESÍDUOS GERADOS NA ETA-BRASÍLIA**

GUSTAVO COSTA GUIMARÃES

ORIENTADORA: CRISTINA CELIA SILVEIRA BRANDÃO

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

PUBLICAÇÃO PTARH.DM – 107/07
BRASÍLIA/DF, JULHO/2007

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

**ESTUDO DO ADENSAMENTO E DESIDRATAÇÃO DOS
RESÍDUOS GERADOS NA ETA-BRASÍLIA**

GUSTAVO COSTA GUIMARÃES

**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
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. Mario Takayuki Kato, PhD (UFPE)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

FICHA CATALOGRÁFICA

GUIMARÃES, GUSTAVO COSTA

Estudo do Adensamento e Desidratação dos Resíduos Gerados na ETA-Brasília.

xiv, 118p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2007). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Adensamento

2.Desidratação

3. Flotação

4.Lodo

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GUIMARÃES, G. C. (2007). *Estudo do Adensamento e Desidratação dos Resíduos Gerados na ETA-Brasília*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-107/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gustavo Costa Guimarães.

TÍTULO: Estudo do Adensamento e Desidratação dos Resíduos Gerados na ETA-Brasília.

GRAU: Mestre

ANO: 2007

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. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Gustavo Costa Guimarães

SQS 410 Bloco G Entrada C aptº 301 - 70276-070 - Brasília - DF - Brasil

gustavoguimaraes@caesb.df.gov.br; gcg_74@hotmail.com

Para Fernanda e Gabriela.

*Que realizem seus projetos com
dedicação, compromisso e alegria.*

AGRADECIMENTOS

A minha maior satisfação foi observar a atenção, o carinho, a presteza e a entrega de todas as pessoas envolvidas ao longo desse trabalho, as quais merecem reconhecimento. Agradeço, admiro, e muito aprendi com cada contribuição. O resultado do esforço de todos está registrado por meio da presente dissertação, e espero que ela tenha reflexos em termos de fomentar a discussão científica a respeito do tratamento de resíduos de ETAs, auxiliando também na concepção e operação de novas unidades que estão sendo e que serão implementadas, tanto na Caesb quanto em outras instituições.

À Caesb e à Unb, pela oportunidade concedida e pela disponibilização de toda estrutura necessária para realização dos experimentos.

À professora Cristina Brandão, por não se resguardar ao simples papel de orientadora de trabalhos de graduação, mestrado e doutorado, orientando seus alunos a crescerem tanto pessoal quanto profissionalmente.

À Superintendência de Manutenção do Sistema Produtor de Água – PMA, por toda contribuição nas intervenções realizadas na instalação piloto e confecção de demais equipamentos, como o filtro prensa de laboratório. Registro aqui uma profunda admiração a seus colaboradores, verdadeiros artistas em seus ofícios. Da mesma forma, agradeço a outras áreas da Caesb, como a PHI e a PPAM, pelas colaborações efetuadas.

À Ângela, Maria do Carmo e Pontes, pelo apoio na avaliação da metodologia e dos resultados obtidos. Aos estagiários e às equipes operacionais das ETAs Brasília e Descoberto, por todo apoio e ajuda, indispensáveis para realização dos experimentos, seja durante o dia, a noite, ou em finais de semana e feriados...

A todos professores, colegas e amigos do Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, pelo carinho e companheirismo. Ao Christopher, pela ajuda nas traduções. À pesquisadora Yovanka, pela dedicação na avaliação morfológica dos resíduos. Aos laboratoristas do LAA, muito obrigado pela colaboração e pela paciência.

À família e amigos, um pedido de desculpas por minha ausência, e um sincero agradecimento por todo apoio e incentivo. Enfim, a todos que, de alguma forma, torceram pelo sucesso e acreditaram no trabalho proposto.

RESUMO

ESTUDO DO ADENSAMENTO E DESIDRATAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS NA ETA-BRASÍLIA

Autor: Gustavo Costa Guimarães

Orientadora: Cristina Celia Silveira Brandão

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, julho de 2007

O presente trabalho enfoca o adensamento e desidratação dos resíduos da ETA-Brasília, importante unidade operacional do sistema de abastecimento de água do Distrito Federal. A ETA-Brasília está passando por intervenções de reforma e ampliação, e estudos anteriores indicaram que o tratamento dos resíduos proposto para essa estação que inclui a desidratação por centrífuga, provavelmente apresentará resultados inferiores aos indicados no projeto, em termos de concentração de sólidos na torta. Como consequência, a ETA-Brasília apresentará maiores custos operacionais para desidratação dos resíduos produzidos e para transporte da torta gerada, além de eventuais problemas ambientais associados à alternativa selecionada para destinação final.

Duas hipóteses foram levantadas para explicar a baixa desidratabilidade observada na desidratação por centrífuga, e são objeto de avaliação desse trabalho. A primeira seria a influência da presença de algas na água bruta, que emprestam características orgânicas ao lodo. A outra hipótese é relacionada à possibilidade dos lodos flotados reterem parte das microbolhas da flotação em sua estrutura, dificultando a etapa de desidratação. Dessa forma, a metodologia experimental do presente trabalho permitiu comparar a desidratação entre lodos produzidos pelo adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação e sedimentação, com o de outra estação de tratamento de água (ETA-Descoberto), abastecida por manancial com água bruta de diferentes características. Os experimentos de adensamento foram realizados em instalação piloto, localizada na ETA-Brasília, e os de desidratação, tanto por centrifugação quanto por filtração forçada, em escala de bancada.

Os resultados obtidos mostraram não haver influência importante do processo de adensamento na desidratabilidade dos lodos de ETAs, sugerindo que a incorporação de microbolhas de ar ao lodo não é o fator que determina a baixa eficiência da centrifugação. Em relação à influência das características da água bruta, verificou-se que a água bruta que alimenta a ETA-Brasília, de caráter orgânico devido à presença de algas, produziu resíduos no tratamento de água também com características orgânicas, e essas características foram determinantes na desidratabilidade dos lodos, levando a teores de sólidos na torta da ordem de 10%, bastante inferiores aos obtidos a partir dos resíduos da ETA-Descoberto, frequentemente acima de 30%. A avaliação preliminar utilizando a técnica de descongelamento e descongelamento indicou que a baixa desidratabilidade dos resíduos da ETA-Brasília pode estar relacionada à distribuição de água na estrutura interna do floco, que é determinada nos primeiros estágios do tratamento de água bruta, recomendando-se estudar a coagulação e floculação como forma de se obter lodos com melhores características de desidratabilidade.

PALAVRAS CHAVE: adensamento, desidratação, flotação, lodo.

ABSTRACT

THICKENING AND DEWATERING OF RESIDUES PRODUCED AT THE BRASILIA WATER TREATMENT PLANT

Author: Gustavo Costa Guimarães

Supervisor: Cristina Celia Silveira Brandão

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, July, 2007

The present work focuses the thickening and dewatering of residues from the Brasilia Water Treatment Plant (WTP), an important operational unit of the water supply system in the Federal District, Brazil. Brasília WTP is enlarging and undergoing improvements, and previous studies have indicated that the treatment of the residues which includes centrifuge dewatering, will present inferior results to those indicated in the project, in terms of cake solid content. As a consequence, Brasília WTP will have greater operational costs for dewatering of the produced residues and the transport of the generated cake, beyond the eventual environmental problems associated with the alternative final disposal.

Two hypotheses were raised to explain the low dewaterability observed in the centrifugal dewatering, and are objectives of evaluation in this work. The first one is the presence of algae in raw water, which gives the sludge organic characteristics. The second hypothesis is related to the possibility of sludge retaining part of the micro-bubbles in its structure, hampering the dewatering phase and resulting in a cake with a low solids content. The experimental methodology of the present work compared the centrifugal dewatering between flotation and sedimentation thickened sludge, using backwash water from Brasilia WTP, with another WTP plant (Descoberto WTP), supplied by reservoir with different raw water characteristics. Thickening experiments were carried out in a pilot plant located at Brasilia WTP. Dewatering tests were carried in a bench scale, as much for centrifugation as for press filters.

The results obtained in the present work showed that there was no important difference in the thickening process in sludge WTP, suggesting that the incorporation of micro-bubbles of air in the sludge is not the factor that determines the low efficiency of centrifuge dewatering. In relation to the influence of the raw water characteristics, it was verified that the raw water that supplies Brasilia WTP, with an organic character due to algal presence, also produced residues in the water treatment with organic characteristics, and these characteristics were determinative in the sludge dewatering, leading to a cake solids content in the order of 10%, very inferior to those obtained from the residues of Descoberto WTP, frequently above 30%. The preliminary evaluation using the freeze-thaw technique indicated that the low dewaterability of the residues of Brasilia WTP can be related to the water distribution in the internal structure of the floc, that is determined in the initial steps of raw water treatment, and further studies in the coagulation and flocculation as form of getting sludges with better dewaterability characteristics are recommended.

KEY WORDS: thickening, dewatering, flotation, sludge.

SUMÁRIO

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 -	Fundamentos dos Processos de Sedimentação e Flotação.....	5
3.1.1 -	Flotação	5
3.1.2 -	Sedimentação.....	13
3.2 -	Resíduos Gerados em ETAs	17
3.2.1 -	Origens dos resíduos gerados em ETAs	17
3.2.2 -	Caracterização dos resíduos gerados em ETAs	19
3.2.3 -	Indicadores de desidratabilidade e alternativas de condicionamento.....	23
3.2.4 -	Legislação aplicável	27
3.3 -	Métodos de Manejo e Tratamento	29
3.3.1 -	Tratamento dos resíduos de ETAs.....	29
3.3.2 -	Técnicas de adensamento	34
3.3.3 -	Técnicas de desidratação	36
3.3.4 -	Disposição final	41
3.3.5 -	Recirculação	44
3.4 -	Experimentos Realizados na Instalação Piloto da ETA-Brasília.....	46
4 -	METODOLOGIA.....	51
4.1 -	Descrição da ETA-Brasília.....	52
4.2 -	Descrição da ETA-Descoberto	55
4.3 -	Descrição da ETA-Piloto.....	57
4.4 -	Desenvolvimento dos Experimentos	61
4.4.1 -	Fase IA – Ensaios preliminares de adensamento.....	64
4.4.2 -	Fase IB – Ensaios preliminares de desidratação em centrífuga.....	67
4.5 -	Etapa II – Experimentos de Centrifugação.....	70
4.6 -	Etapa III – Experimentos Complementares.....	72
4.6.1 -	Fase IIIA – Experimentos preliminares de desidratação em filtro prensa... 72	
4.6.2 -	Fase IIIB – Experimentos prospectivos de condicionamento térmico	75

5 -	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1 -	Etapa I – Experimentos Preliminares	78
5.1.1 -	Fase IA – Experimentos preliminares de adensamento.....	78
5.1.2 -	Fase IB – Experimentos preliminares de desidratação em centrífuga.....	81
5.2 -	Etapa II – Experimentos de Centrifugação.....	85
5.2.1 -	Caracterização dos resíduos das ETAs Brasília e Descoberto	86
5.2.2 -	Avaliação do condicionamento com polímeros.....	88
5.2.3 -	Influência das características da água bruta e do processo de flotação na desidratação por centrifugação	93
5.2.4 -	Morfologia dos flocos e resistência específica	95
5.3 -	Etapa III – Experimentos Complementares.....	97
5.3.1 -	Fase IIIA – Experimentos preliminares de desidratação em filtro prensa... 97	
5.3.2 -	Fase IIIB – Experimentos prospectivos de condicionamento térmico	101
6 -	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	APÊNDICES	115
	APÊNDICE A – Resultados Obtidos na Etapa IB	116
	APÊNDICE B – Caracterização dos Lodos Estudados na Etapa II	117
	APÊNDICE C – Resultados Obtidos na Etapa II.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Característica dos resíduos em função do teor de sólidos	21
Tabela 3.2 - Características usuais da água de lavagem de filtros de ETAs que utilizam sulfato de alumínio como coagulante (Kawamura, 2000).....	22
Tabela 3.3 - Características usuais do lodo de decantadores de ETAs que utilizam sulfato de alumínio como coagulante (Kawamura, 2000).....	22
Tabela 3.4 - Características do lodo produzido em instalação piloto de flotação, na ETA-Brasília (Marwell, 2004).....	22
Tabela 3.5 – Características dos resíduos gerados em ETAs (Cordeiro, 1999)	23
Tabela 3.6 - Classificação dos processos de tratamento dos resíduos em função da concentração de sólidos obtida (Russell <i>et al.</i> , 1996).....	30
Tabela 4.1 – Características da água bruta dos reservatórios que abastecem a ETA-Descoberto e a ETA-Brasília.....	51
Tabela 4.2 – Métodos e equipamentos utilizados nas determinações analíticas	63
Tabela 4.3 – Ensaio de caracterização realizados na Fase IA.....	67
Tabela 4.4 – Ensaio de caracterização realizados na Fase IB	69
Tabela 4.5 - Detalhamento dos experimentos da Etapa II.....	70
Tabela 4.6 – Comparações realizadas a partir de experimentos de desidratação com lodos provenientes dos processos por flotação e por sedimentação, atuando no adensamento de águas de lavagem com diferentes características predominantes	70
Tabela 4.7 – Ensaio de caracterização realizados na Etapa II	71
Tabela 5.1 - Relação dos experimentos realizados na Etapa I.....	76
Tabela 5.2 – Relação dos experimentos realizados nas Etapas II e III.....	77
Tabela 5.3 – Resultados obtidos no adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação a ar dissolvido	78
Tabela 5.4 - Resultados obtidos no adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por flotação	79
Tabela 5.5 - Resultados obtidos no adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por sedimentação	80
Tabela 5.6 – Caracterização do lodo adensado da ETA-Descoberto, por sedimentação	81
Tabela 5.7 – Características dos polímeros avaliados inicialmente	83

Tabela 5.8 – Experimentos realizados na Fase IB, com indicação dos polímeros avaliados nos ensaios de desidratação em centrífuga	84
Tabela 5.9 – Relação de experimentos realizados na Etapa II	85
Tabela 5.10 – Média (n=5) das características das águas de lavagem da ETA-Brasília e da ETA-Descoberto	86
Tabela 5.11 – Média (n=5) das características dos lodos da ETA-Brasília e da ETA-Descoberto, adensados por flotação e por sedimentação	86
Tabela 5.12 – Comparação entre teores de sólidos totais obtidos na torta em experimentos em escala de laboratório e dados de operação em escala real	88
Tabela 5.13 – Valores médios de resistência específica para os lodos estudados (sem condicionamento)	97
Tabela 5.14 - Resultados obtidos na Fase IIIA, para desidratação por centrifugação e por filtração forçada	97
Tabela 5.15 - Resultados obtidos na Fase IIIA, para desidratação por filtração forçada, após correção de falha do equipamento de filtro prensa de laboratório	100
Tabela 5.16 - Resultados obtidos na Fase IIIB, para desidratação por centrifugação com lodos naturais e pré-condicionados por mecanismo de congelamento e descongelamento	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Diagrama de seleção de processo de tratamento (Janssens e Buekens, 1993) ..	6
Figura 3.2 – Esquemas de pressurização na FAD: (a) Pressurização total do afluente; (b) Pressurização parcial do afluente; (c) Pressurização da recirculação.....	7
Figura 3.3 – Representação esquemática de tanque retangular de flotação a ar dissolvido com pressurização da recirculação	8
Figura 3.4 - Tipo de sedimentação esperada em função da concentração de sólidos e do tipo de partículas presentes na suspensão (Canale e Borchardt, 1972)	14
Figura 3.5 - Resíduos gerados em ETAs com tratamento completo e com filtração direta	18
Figura 3.6 – Distribuição da água no lodo (Smollen e Kafaar, 1998, <i>apud</i> Reali, 1999) ...	19
Figura 3.7 - Caminhos possíveis para as fases líquida e sólida no tratamento dos resíduos gerados em ETAs típicas, considerando todas opções de recirculação.....	33
Figura 4.1 – Fluxograma de processo da ETA-Brasília	53
Figura 4.2 – Visão geral da ETA-Brasília, com indicação das principais edificações existentes e a serem implementadas na obra de reforma e ampliação (Google, 2006)	54
Figura 4.3 – Visão geral da ETA-Descoberto (Google, 2006).....	56
Figura 4.4 – Fluxograma de processo da ETA-Descoberto.....	56
Figura 4.5 – Centrífuga da unidade de desidratação de lodo da ETA-Descoberto	57
Figura 4.6 – Representação esquemática da instalação piloto da ETA-Brasília, adaptada para o presente trabalho.....	58
Figura 4.7 – Estação piloto da ETA-Brasília: (A) Chegada de água de lavagem; (B)Tanques de acumulação de água de lavagem; (C) Tanque de flotação; (D)Coluna de sedimentação;.....	58
Figura 4.8 – Tanque de flotação e coluna de saturação de ar da ETA-Piloto	60
Figura 4.9 – Seção do tanque de flotação da ETA-Piloto	60
Figura 4.10 – Coluna de sedimentação instalada na estação piloto da ETA-Brasília	61
Figura 4.11 – Organização da investigação experimental em etapas	62
Figura 4.12 – Filtro prensa de laboratório, confeccionado na oficina da Caesb	73
Figura 5.1 – Evolução do teor de sólidos do lodo flotado acumulado na superfície do tanque de flotação	79
Figura 5.2 – Desidratação em centrífuga de lodos com diferentes teores de sólidos totais, para diferentes valores de G^* , com tempo de centrifugação fixado em 50 minutos...	82

Figura 5.3 – Desidratação em centrífuga de lodos com diferentes teores de sólidos totais, para diferentes tempos de centrifugação, com G^* fixado em 2.500 g.....	82
Figura 5.4 – Teores de sólidos obtidos na condição de dosagem ótima para os polímeros de A a F e para o branco, referentes ao experimento BS.FAD7.CEN2, de desidratação do lodo produzido no adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação. 84	
Figura 5.5 – Teores de sólidos obtidos na condição de dosagem ótima de cada polímero e para o branco, referentes aos experimentos da Etapa II, na desidratação dos lodos da ETA-Brasília, adensados por: (a) flotação e (b) sedimentação	89
Figura 5.6 – Teores de sólidos obtidos na condição de dosagem ótima de cada polímero e para o branco, referentes aos experimentos da Etapa II, na desidratação dos lodos da ETA-Descoberto, adensados por: (a) flotação e (b) sedimentação	90
Figura 5.7 – Teores de sólidos na torta, obtidos para cada tipo de polímero, referentes ao experimento BS.FAD13.CEN8, de desidratação do lodo produzido no adensamento de água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação	92
Figura 5.8 – Teores de sólidos totais obtidos na centrifugação dos lodos da ETA-Brasília e ETA-Descoberto, adensados por flotação e sedimentação, de forma a avaliar: (a) influência do processo de adensamento; (b) influência das características da água bruta.....	94
Figura 5.9 – Imagens representativas (aumento de 100 vezes; diluição de 1:200) dos flocos presentes nos lodos obtidos no: (a) adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação; (b) adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por sedimentação; (c) adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por flotação; (d) adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por sedimentação.....	96
Figura 5.10 – Porcentagem de remoção de água para experimentos representativos de filtração forçada.....	98
Figura 5.11 – Porcentagem de remoção de água para experimentos de desidratação por filtração forçada, após correção de falha do equipamento de filtro prensa de laboratório.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
C.U.	Coefficiente de Uniformidade
COT	Carbono Orgânico Total
D ₁₀	Diâmetro Efetivo
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FAD	Flotação a Ar Dissolvido
FBRR	<i>Filter Backwash Recycling Rule</i>
G	Gradiente Hidráulico
G*	Intensidade de Força Centrífuga
LAA	Laboratório de Análise da Água do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília
MS	Ministério da Saúde
OMS	Organização Mundial de Saúde
PAC	Policloreto de Alumínio
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
THM	Trihalometanos
UnB	Universidade de Brasília
V _s	Velocidade de Sedimentação

1 - INTRODUÇÃO

Em uma estação de tratamento de água, os principais impactos ambientais estão relacionados aos resíduos gerados ao longo do processo. Até recentemente, a água de lavagem dos filtros ou mesmo as descargas de decantadores eram lançadas diretamente nos corpos d'água, sem um tratamento prévio. Contudo, essa prática não é mais aceitável.

Os efeitos sobre o meio ambiente decorrentes do lançamento desses resíduos nos corpos d'água são severos. Podem ocorrer alterações nas características físicas, químicas e biológicas da água – principalmente devido à sobrecarga de alumínio, presente em quantidade marcante nos resíduos de ETAs. Nesse sentido, diversos estudos apontam as alterações que podem ocorrer na diversidade da comunidade bentônica e no ciclo de nutrientes, com as conseqüentes interferências na biota aquática.

A opção para minimizar ou mesmo eliminar esses lançamentos é por meio do tratamento dos resíduos, na qual é efetuada a remoção de água dos lodos de decantadores e flotadores, assim como da água de lavagem de filtros. Além disso, devem ser previstas formas adequadas de destinação final da torta gerada pelas etapas do tratamento de resíduos.

Dessa forma, o manejo adequado dos resíduos passa a ser um aspecto fundamental do planejamento nas companhias de saneamento. Diversos fatores exercem pressão para que uma concepção ambientalmente correta seja adotada no projeto de novas ETAs ou para adequação das instalações existentes. Dentre eles, pode-se destacar as exigências dos órgãos ambientais, a legislação cada vez mais restritiva, a necessidade por redução de perdas e de custos no processo de tratamento, e o aumento da consciência ambiental, tanto da sociedade como dos agentes do setor de saneamento.

Nessa perspectiva, a Caesb – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – vem recuperando as águas de lavagem de filtros nas ETAs Descoberto, Pipiripau e Brazlândia, e estão previstas intervenções nas demais estações, dentre as quais se destaca a obra de reforma e ampliação da ETA-Brasília.

A intervenção prevista na ETA-Brasília é, sobretudo, uma necessidade. Atualmente, o tratamento de água nessa estação se dá por filtração direta, e a água de lavagem é despejada diretamente na rede de águas pluviais, tendo como destino final o lago Paranoá. Além disso, a ETA-Brasília apresenta um elevado índice de perdas, problemas operacionais diversos e grande sensibilidade em relação às características da água bruta, uma vez que no período chuvoso, quando ocorre um crescimento acentuado da comunidade de fitoplâncton no lago de Santa Maria, os resultados de qualidade da água produzida e de perdas na produção tendem a se afastar das metas estabelecidas.

Com essa reforma, serão implementados na ETA-Brasília os processos de floculação e de flotação por ar dissolvido, e também as etapas necessárias para tratamento dos resíduos gerados na filtração e flotação. Na nova configuração, a ETA-Brasília apresentará ainda grande flexibilidade operacional. Quando a qualidade da água bruta permitir, a ETA poderá ser operada na seqüência de tratamento por filtração direta, com a água de lavagem sendo adensada por flotação e a espuma produzida desidratada em centrífugas. Caso a água apresente uma contagem de fitoplâncton mais elevada, a operação se dará na seqüência completa de tratamento, com a água de lavagem sendo recirculada e o lodo do flotador sendo submetido à centrifugação. Em ambos os casos, a torta obtida na desidratação deverá ter como destino final a disposição no solo, provavelmente para recuperação de áreas degradadas, sendo que a Caesb geralmente seleciona cascalheiras desativadas para tal finalidade.

Contudo, o sistema de tratamento de resíduos previsto para a futura ETA-Brasília pode não corresponder às expectativas de projeto. Experimentos desenvolvidos por Marwell (2004) evidenciaram que, nas melhores condições de condicionamento, a concentração de sólidos máxima possível de se alcançar na desidratação do lodo flotado produzido durante o tratamento de água seria da ordem de 10%, valor muito abaixo dos 35% previsto pelo projeto.

Caso a concentração de sólidos na torta seja tão baixa, o transporte e a disposição final desses resíduos poderão ter sua viabilidade ameaçada. Do ponto de vista do transporte, é importante ressaltar que, quanto menor a concentração de sólidos na torta, maior o volume gerado e os custos operacionais envolvidos. Em relação ao destino final proposto, o excesso de água na torta apresentará problemas para disposição no solo, especialmente

devido às características tixotrópicas dos lodos de alumínio. Na literatura, encontra-se que, para disposição em aterros, é recomendada (algumas vezes exigida) uma concentração de sólidos superior a 25%.

Para explicar a baixa eficiência da desidratação por centrifugas no caso da ETA-Brasília, duas hipóteses foram levantadas, com base nas observações de Schofield (1997). A primeira seria a influência da presença de algas na água bruta, que emprestam características orgânicas ao lodo. A outra hipótese é relacionada à possibilidade dos lodos flotados reterem parte das microbolhas da flotação em sua estrutura, dificultando a etapa de desidratação.

Dessa forma, para entender e identificar a origem da baixa eficiência da desidratação por centrifugação no caso da ETA-Brasília, bem como para complementar o estudo realizado anteriormente (Marwell, 2004) avaliando o tratamento (adensamento e desidratação) da água de lavagem produzida, novas pesquisas devem ser realizadas, considerando inclusive outras alternativas para o tratamento dos resíduos da ETA-Brasília, além das propostas de projeto. É nesse contexto que se insere o presente trabalho, cujos objetivos são descritos no capítulo que se segue.

2 - OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

O trabalho proposto tem como objetivo geral estudar o adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA-Brasília. Embora de aparente caráter específico, a carência de estudos relacionados ao tratamento de resíduos de ETAs, no Brasil, permite que os resultados obtidos possam se configurar em contribuição mais abrangente sobre o tema.

Para tanto, serão realizados experimentos de adensamento por flotação e sedimentação, em instalação piloto, e de desidratação dos lodos gerados nesses processos por centrífuga, em escala de bancada. Como objeto de estudo, os processos serão voltados para o tratamento da água de lavagem dos filtros da ETA-Brasília. Metodologia similar será empregada também para a água de lavagem e lodo adensado da ETA-Descoberto, para efeito de comparação.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O trabalho em questão tem como objetivos específicos:

- Avaliar a influência das características da água bruta na desidratação dos lodos por centrifugação, em especial em relação ao caráter orgânico devido à presença de algas;
- Avaliar a influência do processo de adensamento na desidratação dos lodos por centrifugação, em especial em relação às características dos flocos formados na flotação e à possibilidade de incorporação de microbolhas de ar na estrutura dos mesmos;
- Avaliar a alternativa de condicionamento com polímeros, na desidratação em centrífuga;
- Avaliar, preliminarmente, a desidratação por filtração forçada (filtro prensa) e o condicionamento térmico (congelamento e descongelamento), como alternativa para o tratamento de lodos de natureza orgânica.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, inicialmente é apresentada uma resumida fundamentação teórica sobre a sedimentação e a flotação. Esses dois processos são os mais comumente empregados para clarificação, no tratamento de água, e para adensamento, no tratamento dos resíduos de ETAs e ETEs. Em seguida, são abordados aspectos sobre os resíduos gerados em ETAs, com destaque para caracterização desses resíduos e aspectos da desidratabilidade dos lodos, com uma visão geral de leis e regulamentos relacionados com o tema. O item seguinte, métodos de manejo e tratamento, relaciona as alternativas e possibilidades de arranjo de tratamento dos resíduos de ETAs, explorando também alguns estudos disponíveis na literatura sobre o assunto. Por fim, o último item desse capítulo trata especificamente de trabalhos realizados na própria ETA-Brasília, também relacionados ao tema.

3.1 - FUNDAMENTOS DOS PROCESSOS DE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO

3.1.1 - Flotação

3.1.1.1 - Introdução

A flotação é um processo de separação gravitacional no qual bolhas de gás (geralmente ar atmosférico) entram em contato com as partículas sólidas, formando um aglomerado floco-bolha de densidade aparente inferior à da água, que então flutuará até a superfície (Gregory e Zabel, 1990). De uma forma mais geral, a flotação pode ser descrita ainda como um processo no qual a fase sólida, com uma densidade menor que o líquido de suspensão, é separada pela ação do empuxo, suficiente para direcionar as partículas para a superfície (Metcalf & Eddy, 1991).

A flotação é especialmente aplicável no tratamento de águas com alta concentração de algas, mas com baixa turbidez (Gregory e Zabel, 1990). Nesse sentido, Janssens e Buekens (1993) elaboraram, a partir da compilação de resultados obtidos sobre a eficiência de diversos processos de tratamento, um diagrama de seleção de processos de tratamento de água para consumo humano. Nessa análise, foi considerado que não apenas o teor de

sólidos em suspensão seria o principal parâmetro de projeto para seleção das unidades operacionais a serem adotadas, mas também o nível de eutrofização do corpo d'água de onde a água será captada. O teor de sólidos foi expresso em termos de turbidez, e o estado trófico pela biomassa de algas, representada pelo parâmetro clorofila-*a*.

Do diagrama mencionado, apresentado na Figura 3.1, verifica-se que a filtração direta é aplicável apenas para águas com baixo teor de clorofila-*a* e com baixa turbidez. Em águas com alto teor de clorofila-*a*, a flotação seria indicada, e para turbidez elevada, acima de 100 UT, a sedimentação seria o processo selecionado.

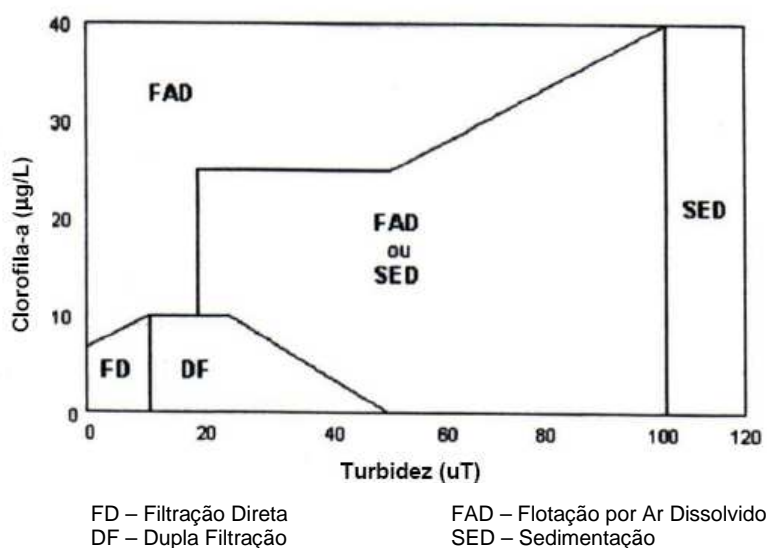


Figura 3.1 - Diagrama de seleção de processo de tratamento (Janssens e Buekens, 1993)

No tratamento de água, a flotação de fato apresenta alguma limitação quanto a picos de turbidez. Segundo Kawamura (2000), águas com turbidez de até 50 UT são tratadas com relativa facilidade por esse processo, sendo que, durante um curto período de tempo, a flotação pode suportar valores de até 100 UT.

Existem diferentes métodos para produzir as bolhas de gás, a saber:

- Flotação por ar disperso: as bolhas de ar são formadas introduzindo-se a fase gasosa diretamente na fase líquida, por difusores ou por misturadores (Metcalf & Eddy, 1991). Esse tipo de flotação não é indicado para tratamento de águas de abastecimento, pois o diâmetro das bolhas tende ser maior que dos outros processos, sendo necessária a aplicação de turbulência elevada e de produtos químicos não-desejáveis (Gregory e Zabel, 1990). As aplicações iniciais de flotação

baseavam-se nesse princípio, sendo que nos dias de hoje esse método ainda é bastante utilizado, principalmente em atividades de mineração;

- Flotação eletrolítica: uma corrente elétrica gerada por dois eletrodos imersos em uma solução aquosa gera bolhas de hidrogênio e oxigênio, responsáveis pela flotação das partículas em suspensão. As bolhas geradas são de pequeno diâmetro e, conseqüentemente, de baixa velocidade ascensional (Metcalf & Eddy, 1991);
- Flotação a ar dissolvido (FAD): nesse processo, um fluxo de água previamente saturada com ar é submetido a uma forte redução de pressão, com a conseqüente liberação de bolhas, podendo ser empregado para tanto a aplicação de vácuo ou de pressão, ou ainda um processo denominado microflotação (Gregory e Zabel, 1990). A flotação por pressurização é a mais comumente utilizada, com o ar sendo dissolvido na água sobre pressão, existindo ainda diferentes tipos desse sistema - com pressurização parcial do afluente, com pressurização total do afluente, com pressurização da recirculação, conforme visualizado na Figura 3.2.

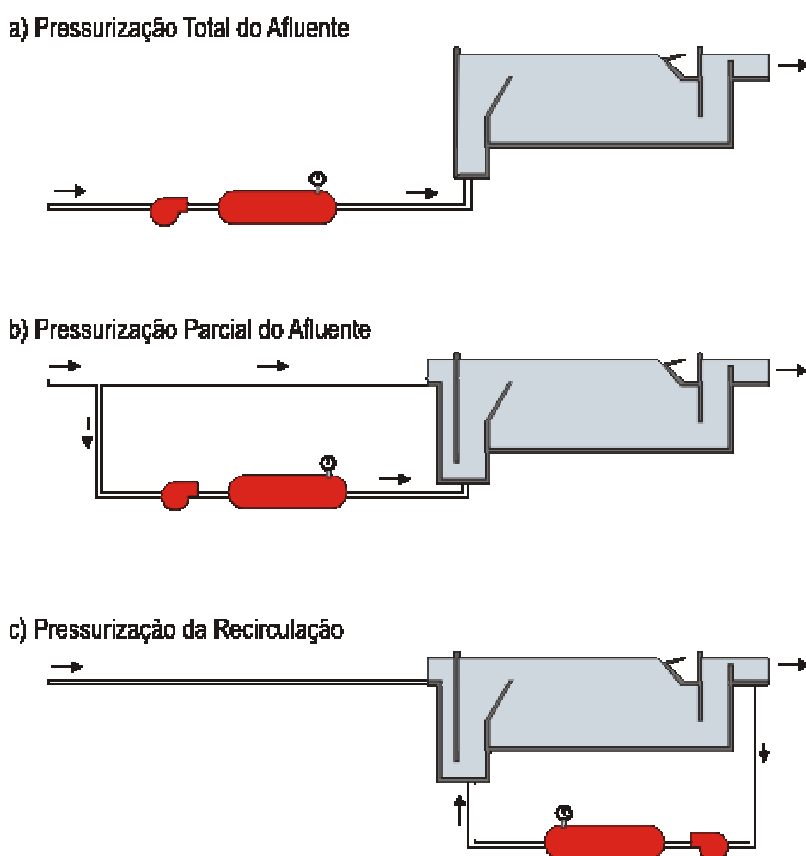


Figura 3.2 – Esquemas de pressurização na FAD: (a) Pressurização total do afluente; (b) Pressurização parcial do afluente; (c) Pressurização da recirculação

Dentre essas alternativas, a flotação a ar dissolvido é a mais aconselhada em tratamento de água, uma vez que não envolve forte agitação e permite um melhor controle da produção de bolhas de ar. Sua configuração mais comum no tratamento de água é com pressurização da recirculação, pois essa alternativa evita destruição dos flocos devido à pressurização da água floculada. Nesse processo, uma parcela de água clarificada é saturada com ar sob pressão elevada e, posteriormente, injetada no tanque de flotação por meio de dispositivos redutores de pressão. Na saída destes dispositivos ocorre a formação das microbolhas de ar que entram em contato com a água floculada produzindo um aglomerado floco-bolha que ascende à superfície do tanque, formando uma camada de lodo a ser removida.

3.1.1.2 - Processo de flotação a ar dissolvido com pressurização da recirculação

De acordo com Kawamura (2000), os aspectos mais importantes a serem observados em uma unidade típica de flotação a ar dissolvido, com pressurização da recirculação são: a qualidade da água bruta, o processo de floculação, o tanque de flotação, os sistemas de recirculação e saturação, a remoção de lodo e os custos envolvidos no processo. Uma unidade típica de flotação é apresentada na Figura 3.3.

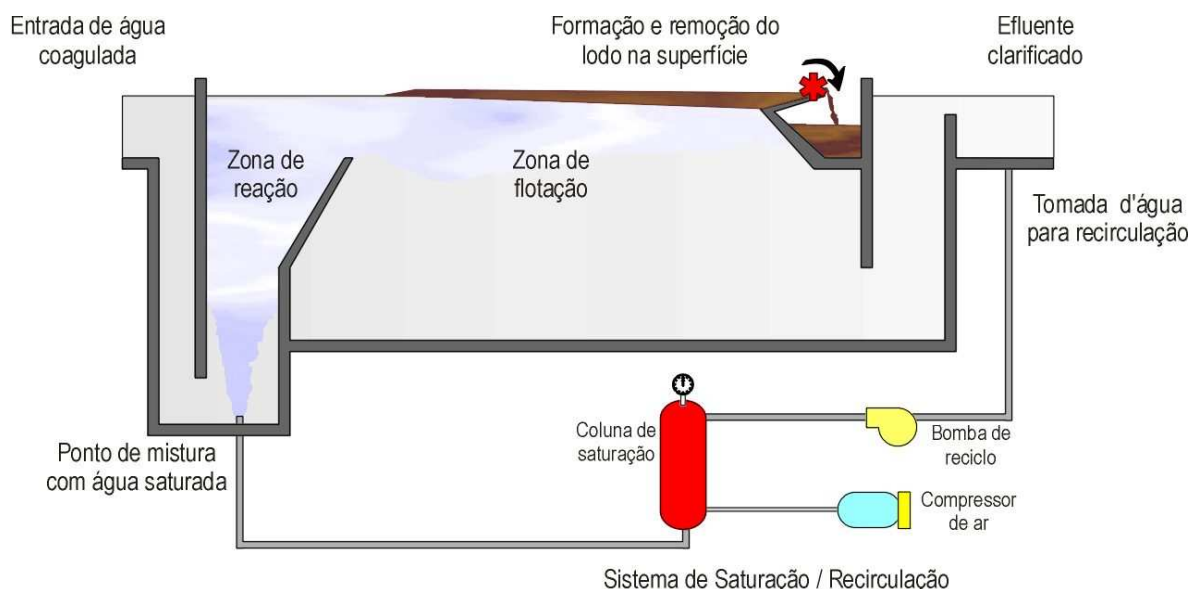


Figura 3.3 – Representação esquemática de tanque retangular de flotação a ar dissolvido com pressurização da recirculação

Segundo Willis (1997), assim como na decantação, para que o processo de clarificação ocorra de forma efetiva na flotação, também é necessário que as partículas estejam desestabilizadas, coaguladas, e floculadas a partir do uso de sais metálicos, polímeros, ou

de ambos. Contudo, Kawamura (2000) relata algumas diferenças entre os dois processos. Ao contrário da sedimentação, no processo de FAD devem ser produzidos flocos pequenos e leves, sendo que para atingir esse objetivo deve ser aplicada, em comparação com a sedimentação, uma maior energia (G entre 30 e 120 s^{-1}) em um menor tempo de detenção (de 15 a 20 minutos) durante a floculação.

O mecanismo de coagulação predominante mais recomendado na FAD é o de adsorção e neutralização de cargas, o que permite economia no consumo de coagulante. Já para sedimentação, a coagulação deve se dar pelo mecanismo de varredura. Para determinação das faixas ideais de pH e dosagem, podem ser utilizados equipamentos de ensaio de jarros adaptados para flotação.

Tanques de flotação com formato circular são usados mais comumente em estações de tratamento de esgotos para adensamento de lodo. Para tratamento de água, haveria dificuldades para realizar a transferência de água floculada sem que ocorra quebra dos flocos (Gregory e Zabel, 1990). Os tanques retangulares, além de facilitar a entrada da água floculada, oferecem ainda vantagens em termos de facilidade para arranjo das unidades e instalação de equipamentos para remoção de lodo.

Gregory e Zabel (1990), assim como Kawamura (2000), fazem menção ao fato de que os tanques devem ser cobertos para se evitar que chuva e vento desarranjem a camada de lodo formada na superfície, além de problemas causados por congelamento. Contudo, essa última exigência é direcionada a países de clima temperado, sendo que no Brasil observa-se mais usualmente o emprego de unidades de flotação sem cobertura, sem relatos de problemas.

Os critérios para dimensionamento dos tanques de flotação serão comentados adiante mas, de uma forma geral, a largura do tanque depende principalmente do equipamento de remoção de lodo, e o comprimento está relacionado com a distância necessária para que o conjunto floco-bolha atinja a superfície, sendo recomendado um comprimento máximo de 12 m (Kawamura, 2000). Os tanques não podem ser muito estreitos, pois o aumento da velocidade levaria a uma instabilidade no processo (Willis, 1997). Di Bernardo e Dantas (2005) e Richter (2001) sugerem uma relação de 4:1 entre comprimento e largura.

Profundidades superiores a três metros não são recomendadas, pois não trazem benefícios adicionais (Willis, 1997).

É recomendada a colocação de uma parede defletora, com inclinação entre 60 e 75 graus, separando as zonas de reação e de flotação, com a função de direcionar o fluxo para a superfície do tanque (Richter, 2001). A drenagem da água clarificada pode ser efetuada tanto por uma passagem situada na parte inferior da parede de saída, quanto por drenos colocados no fundo do tanque. Willis (1997) alerta que devem ser tomados os devidos cuidados para se manter estabilizado o nível d'água na câmara de flotação, especialmente se forem utilizados raspadores mecânicos.

Para dissolver ar sob pressão, em um sistema de saturação com recirculação, vários métodos podem ser empregados, tais como: por difusores de ar em um tanque pressurizado (saturador); por gotejamento do reciclo em um saturador preenchido ou não com elementos de recheio; ou ainda pela injeção de ar na sucção da bomba de recirculação. Gregory e Zabel (1990) recomendam o uso de pressões em torno de 4 atm com uma taxa de recirculação entre 7 e 8%, para a clarificação de água. Para adensamento de lodos de decantadores ou água de lavagem de filtros, Arora *et al.* (1995) utilizaram taxas de recirculação mais elevadas, de até 100 % ou maiores. Entretanto, no Brasil, Di Bernardo e Dantas (2005) e Richter (2001) recomendam o uso de taxas de recirculação com valores semelhantes às usadas no dimensionamento de sistema de flotação para clarificação de água, entre 6 e 15%.

Segundo Hahn (1982, *apud* Di Bernardo e Dantas, 2005), o aglomerado floco-bolha pode ser formado pelos seguintes mecanismos: colisão da bolha com a partícula decorrente da turbulência ou da atração entre ambas; aprisionamento das bolhas nos flocos ou contato entre flocos em sedimentação e bolhas de ar em ascensão; e pelo crescimento das bolhas de ar entre os flocos. Todos três mecanismos podem ocorrer simultaneamente.

Para se obter uma melhor interação entre as fases sólida e gasosa, as bolhas de ar devem ascender em condições de escoamento laminar, evitando assim a ruptura dos flocos (Gregory e Zabel, 1990). Para que isso ocorra, o diâmetro máximo das bolhas de ar deve ser de até 130 μm . Quanto menores forem as bolhas, maior será sua quantidade produzida para um determinado volume de ar. A vantagem, nesse caso, é que o maior número de

bolhas aumenta a chance de contato com os flocos, o que é interessante no caso de tratamento de água, tendo em vista a baixa concentração de flocos em suspensão.

Por outro lado, se as bolhas forem muito pequenas, a velocidade ascensional também o será, levando à necessidade de utilizar tanques maiores para permitir que as bolhas cheguem até a superfície. Na prática, as bolhas produzidas no sistema de FAD situam-se na faixa entre 10 e 120 μm , com um valor médio de 40 μm (Gregory e Zabel, 1990). Como o diâmetro final é inversamente proporcional à queda de pressão aplicada, bolhas de maior tamanho, geradas por baixa pressão de saturação, devem ser evitadas. Por fim, deve ser dada a devida importância à escolha dos dispositivos de descompressão (válvulas, bocais ou orifícios), que devem ficar o mais próximo possível ou na própria zona de mistura, de forma a minimizar o efeito de coalescência entre as bolhas.

Segundo Willis (1997), os sólidos acumulados na superfície do flotador podem ser removidos por equipamentos mecânicos, ou hidraulicamente, por transbordamento. A segunda opção elimina a necessidade de instalação dos caros equipamentos mecânicos para raspagem do lodo, mas leva a formação de um lodo com baixa concentração de sólidos. Por esses motivos, a opção por equipamentos mecânicos é mais recomendada, pois formará um lodo que será mais facilmente desidratado, com um teor de sólidos entre 1 e 3%.

Devido às altas taxas de aplicação envolvidas, uma planta de flotação ocupa uma área menor que a necessária para um processo de decantação convencional. Em compensação, os equipamentos mecânicos envolvidos trazem um acréscimo considerável de custos, tanto de instalação, quanto de manutenção e operação. Dessa forma, o processo de FAD tende a possuir custos mais elevados do que em plantas similares com decantação (Kawamura, 2000). Na composição dos custos, o maior peso está no sistema de saturação de ar, responsável por cerca de 50% do custo total de implantação da unidade, sendo também relevantes os custos envolvidos no sistema de remoção de lodo, que variam entre 10 e 20% do custo total (Gregory e Zabel, 1990).

3.1.1.3 - Principais parâmetros de projeto da FAD

Da mesma forma que para os adensadores por gravidade, o projeto de unidades de flotação é feito usualmente tanto por base na experiência de operação de outras unidades, quanto em resultados de ensaios com instalações piloto ou de laboratório (Reali e Patrizzi, 1999).

Segundo Willis (1997), a determinação do tamanho dos tanques de FAD para tratamento de água baseia-se na taxa de aplicação superficial, sendo usual a adoção de taxas entre 240 e 290 m/d. Outros autores sugerem faixas mais abrangentes, tais como: 190 a 290 m/d (Gregory e Zabel, 1990), 240 a 360 m/d (Kawamura, 2000), e 150 a 300 m/d (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Em águas com altos teores de sólidos, como resíduos gerados em estações de tratamento de água, a relação entre a quantidade de ar e a quantidade de sólidos afluentes ao flotador (relação A/S) pode influir significativamente na eficiência de remoção de sólidos. Reali e Patrizzi (1999) justificam que a relação A/S constitui parâmetro de grande importância para o processo de flotação de lodos, pois está diretamente relacionada à quantidade de microbolhas de ar – que são os agentes do processo – disponibilizadas por unidade de massa de SST. Dessa forma, segundo Richter (2001), a quantidade de ar aplicada deve ser aquela que faz com que a densidade aparente do aglomerado floco-bolha seja menor do que a densidade do líquido, e a partir daí pode ser determinada a relação A/S necessária. Segundo Metcalf & Eddy (1991), relações A/S típicas encontradas no adensamento de lodo em plantas de tratamento de águas residuárias variam entre 0,005 e 0,060 g de ar/ g de SST.

A quantidade de ar aplicada no tanque de flotação pode ser alterada tanto por variações da pressão de saturação, da vazão de recirculação, ou ambas (Gregory e Zabel, 1990). Os equipamentos instalados devem permitir ajustes, de forma a possibilitar uma otimização do processo (Willis, 1997).

3.1.2 - Sedimentação

3.1.2.1 - Introdução

A sedimentação é o fenômeno físico no qual, em decorrência da ação da gravidade, partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica. A ocorrência da sedimentação das partículas suspensas propicia clarificação do meio líquido, ou seja, a separação das fases líquida e sólida. Trata-se de uma técnica muito antiga, e há muito tempo vem sendo utilizada para remoção de material suspenso em etapas do processamento de matéria-prima de muitas indústrias, principalmente na mineração, fabricação de papel, nas indústrias química e alimentícia, assim como em estações de tratamento de água e de esgotos.

A sedimentação é utilizada com o duplo objetivo de se produzir um efluente clarificado, com um lodo suficientemente adensado. No tratamento de esgotos, pode ser aplicada para remoção: de areia, no tratamento preliminar; de sólidos em suspensão, no tratamento primário; de sólidos biológicos no tratamento secundário; e de flocos físico-químicos, quando é realizada coagulação. No tratamento de água, pode ser utilizada no tratamento completo para clarificação da água antes da etapa de filtração. E, em ambos os casos, pode ser utilizada também como alternativa para adensamento dos resíduos gerados pelas diferentes operações unitárias.

3.1.2.2 - Tipos de sedimentação

Em função da concentração de sólidos, e da forma de interação entre as partículas, os seguintes tipos de sedimentação podem ocorrer (Metcalf & Eddy, 1991; Von Sperling, 1996):

- Sedimentação discreta: refere-se ao comportamento de partículas de uma suspensão com baixa concentração de sólidos, sem que haja interação significativa de uma partícula em relação às outras em sua vizinhança. Ocorre principalmente em caixas de areia.
- Sedimentação flocculenta: ocorre em soluções nas quais, apesar de diluídas, as partículas aglomeram-se à medida que sedimentam. As características físicas do processo são alteradas, uma vez que o aumento do tamanho pela formação dos

flocos faz com que a sedimentação ocorra em taxas mais rápidas. Sua ocorrência se dá em decantadores primários, na parte superior dos decantadores secundários, e na sedimentação com coagulação química.

- Sedimentação zonal: refere-se a suspensões de concentração intermediária de sólidos, onde forças inter-partículas são capazes de interferir na sedimentação de partículas vizinhas, formando um manto de lodo que sedimenta como uma unidade. Observa-se uma nítida interface de separação entre as fases sólida e líquida, e o nível da interface se move para baixo como resultado da sedimentação da manta de lodo. Ocorre principalmente em decantadores secundários.
- Sedimentação por compressão: Por fim, caso a concentração de sólidos seja elevada, a sedimentação pode ocorrer apenas pela compressão da estrutura das partículas. A compressão ocorre devido ao peso das partículas, umas sobre as outras, peso esse que aumenta gradativamente à medida que os sólidos do líquido sobrenadante continuam a se adensar. Com a compressão, parte da água é removida da matriz do floco, reduzindo seu volume. Esse é o princípio do funcionamento de adensadores por gravidade, ocorrendo também no fundo de decantadores secundários.

A Figura 3.4 ilustra o tipo de sedimentação que se pode esperar em função da concentração de sólidos e do tipo de partículas presentes em uma suspensão.

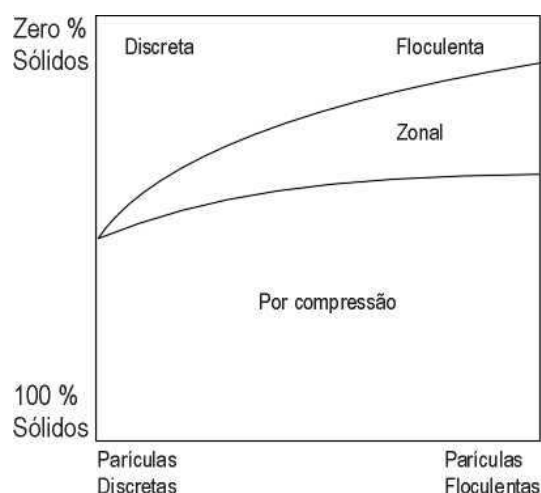


Figura 3.4 - Tipo de sedimentação esperada em função da concentração de sólidos e do tipo de partículas presentes na suspensão (Canale e Borchartt, 1972)

Na verdade, é possível que durante uma operação de sedimentação ocorram vários tipos simultaneamente. É o que ocorre, geralmente, no início da operação de adensamento da água de lavagem.

3.1.2.3 - Principais parâmetros de projeto da sedimentação

A sedimentação das partículas discretas pode ser analisada pelas leis clássicas da física, formuladas por Newton e Stokes. Segundo essas leis, a velocidade final de uma partícula em sedimentação é constante, ou seja, uma partícula em repouso terá sua velocidade aumentada até que as forças de resistência se igualem à força gravitacional. Pela lei de Stokes, a velocidade de sedimentação V_s (de uma partícula discreta em fluxo laminar), é proporcional do diâmetro da partícula elevado ao quadrado. Esse fato ressalta a importância de se obter na floculação partículas de maiores tamanhos, pois será possível obter uma remoção mais rápida das mesmas (Von Sperling, 1996).

Segundo as teorias de Hazen, foram estabelecidas relações para descrever a remoção de partículas discretas em um tanque de sedimentação ideal, sendo V_s geralmente expressa em termos de vazão por unidade de área superficial do tanque de sedimentação. A velocidade de sedimentação também é chamada de taxa de aplicação superficial (Kawamura, 2000).

Dessa forma, sabendo-se a vazão afluyente e a velocidade de sedimentação, a área necessária para decantação pode ser calculada. Nesse caso, todas as partículas com velocidade de sedimentação maiores ou iguais a V_s serão removidas. Além dessas, é necessário computar também as partículas com velocidades de sedimentação menores que V_s , mas que entraram no tanque de sedimentação a uma altura inferior à profundidade do tanque, pois uma fração dessas partículas também será removida (Gregory e Zabel, 1990).

Uma suspensão típica apresenta partículas de vários tamanhos. Para analisar a eficiência de remoção para um determinado tempo de detenção, é necessário levar em conta as diferentes velocidades de sedimentação das partículas presentes no sistema (Gregory e Zabel, 1990). A melhor forma de realizar esses estudos é a partir da utilização de colunas de sedimentação. Nessa análise, a evolução da concentração de sólidos em suspensão no tempo é determinada para cada ponto de amostragem, sendo expressa em termos de fração remanescente. Os resultados são apresentados graficamente em função da velocidade de

sedimentação (sedimentação discreta), ou na forma de curvas ou de uma malha, mostrando as percentagens de remoção de partículas em determinadas profundidades e tempos (sedimentação floculenta).

No caso de soluções com altas concentrações de sólidos suspensos, as sedimentações do tipo zonal e por compressão também ocorrerão, além das sedimentações discreta e floculenta (Metcalf & Eddy, 1991). Conforme citado anteriormente, na sedimentação zonal há a formação de uma nítida interface entre o lodo decantado e o líquido sobrenadante, e a velocidade de sedimentação dessa interface é utilizada no dimensionamento dos decantadores (Canale e Borchardt, 1972; Von Sperling, 1996).

Segundo Metcalf & Eddy (1991), as colunas de sedimentação também podem ser utilizadas para determinar as características de sedimentação para sedimentação zonal e por compressão. A partir dos dados obtidos, duas abordagens diferentes podem ser adotadas para se obter a área necessária para um tanque de sedimentação/adensamento. Na primeira abordagem, dados de um único ensaio em coluna de sedimentação são utilizados. A segunda abordagem, conhecida como teoria do fluxo-limite, baseia-se na análise dos dados de uma série de testes em coluna de sedimentação realizados com diferentes concentrações de sólidos. Essas abordagens estão descritas em detalhe em textos clássicos, como Canale e Borchardt (1972), Metcalf & Eddy (1991) e Von Sperling (1996).

Metcalf & Eddy (1991) sugerem que a coluna a ser utilizada em ensaios de sedimentação pode ser de qualquer diâmetro, mas com altura próxima à profundidade do decantador em estudo. Resultados satisfatórios podem ser obtidos com tubos de PVC com diâmetro de 150 mm e altura de 2 m, com pontos de amostragem colocados em intervalos de 0,6 m. Devem ser tomados cuidados para garantir uma distribuição uniforme de temperatura no líquido, de forma a se evitar a formação de correntes de convecção.

Camp (1946, *apud* Di Bernardo e Dantas, 2005) relaciona alguns cuidados que devem ser obedecidos para a realização do ensaio em coluna de sedimentação:

- A área da coluna (em planta) deve ser suficientemente grande para que a retirada de amostras não cause diminuição significativa do nível de água em seu interior; isso também contribui para minimizar o efeito de parede, que retarda a sedimentação,

pois a velocidade do líquido junto às paredes é praticamente nula quando a partícula desce;

- A temperatura deve ser preferencialmente mantida constante em toda a profundidade da coluna durante o ensaio (a coluna pode ser completamente envolvida em um recipiente contendo água com temperatura controlada);
- O enchimento da coluna deve ser cuidadoso para não resultar turbulência residual excessiva, mas ao mesmo tempo deve ser realizado rápido o suficiente para garantir certo grau de uniformidade no início do ensaio;
- Considera-se o ensaio iniciado a partir do momento em que toda a suspensão encontrar-se uniformemente distribuída na coluna, com temperatura constante ao longo da profundidade. A coleta de amostras, em função do tempo (geralmente em intervalos de 10 a 15 minutos), prossegue até se verificar que não ocorre alteração da turbidez (ou do teor de sólidos suspensos totais – SST) no ponto de amostragem considerado;
- Quando se têm vários pontos de amostragem, a coleta deve ser feita a partir dos pontos superiores, de forma a reduzir o efeito de deslocamento da suspensão.

Para o projeto de decantadores em escala real, de acordo com a norma NBR-12.216 (ABNT, 1992), a tubulação de descarga de lodo deve ter diâmetro mínimo de 150 mm, e a remoção hidráulica do lodo exige o fundo inclinado com ângulo superior a 50° (com relação a horizontal), formando poço em forma de tronco de pirâmide ou de cone invertido, devendo a descarga ser localizada em sua extremidade inferior. Essas recomendações podem ser, em parte, reproduzidas nas colunas de sedimentação.

3.2 - RESÍDUOS GERADOS EM ETAS

3.2.1 - Origens dos resíduos gerados em ETAs

O processo convencional de tratamento de água para fins de abastecimento envolve diversas etapas, onde são gerados resíduos, principalmente nas etapas de sedimentação, flotação e filtração. Os fluxogramas de unidades típicas de tratamento de água com coagulação química são apresentados na Figura 3.5, onde são indicadas também as operações responsáveis pela geração dos resíduos de maior relevância.

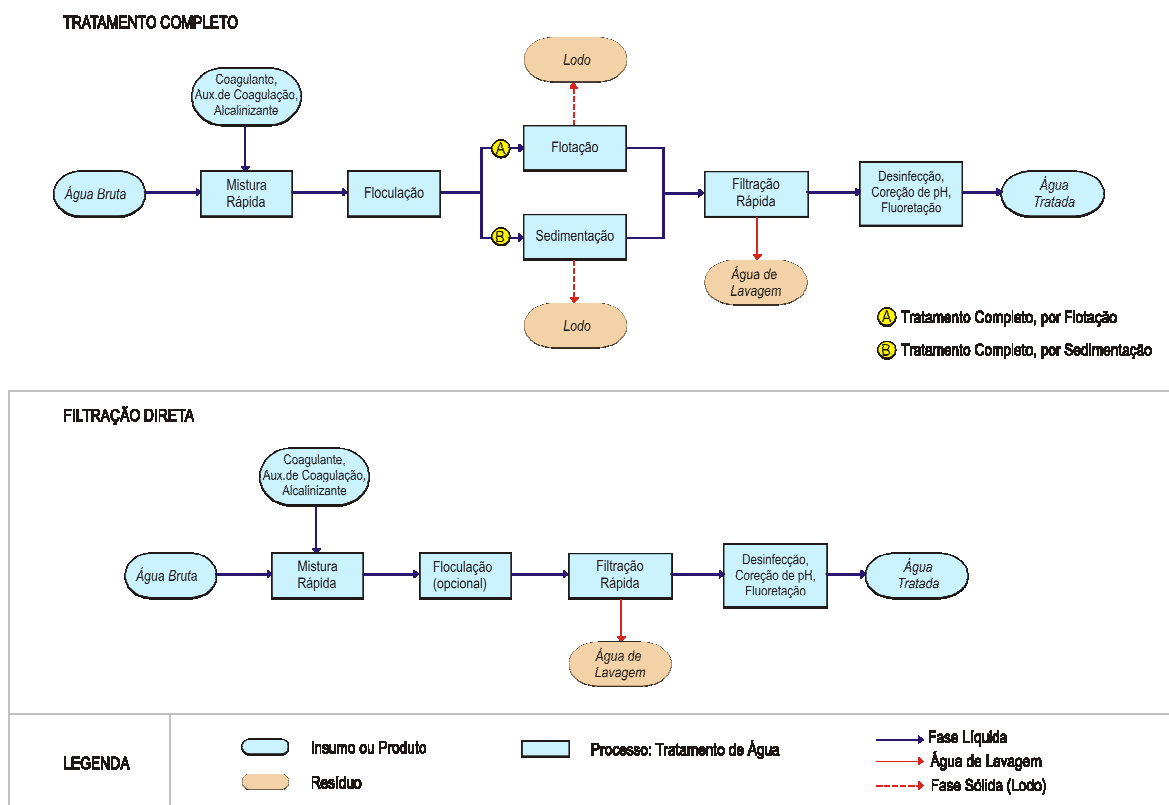


Figura 3.5 - Resíduos gerados em ETAs com tratamento completo e com filtração direta

Em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduos é proveniente da lavagem de filtros, mas, em termos mássicos, a maior quantidade de lodo produzido é gerada nas descargas de decantadores ou na remoção da espuma acumulada nas unidades de flotação. Valores indicados na literatura exemplificam essa afirmação: enquanto a água de lavagem possui concentrações de sólidos entre 50 e 400 mg/L - representando entre 2 e 5% do volume processado na estação (Wolfe *et al.*, 1996), a operação de descarga em decantadores gera um resíduo bem mais concentrado, entre 500 e 30.000 mg/L – correspondente a uma fração entre 0,1 e 0,3% do volume produzido pela estação de tratamento de água (USEPA, 2002).

Outras atividades desenvolvidas em uma estação, como as lavagens em tanques de preparação de produtos químicos e a raspagem da camada superficial em filtros lentos de areia, também contribuem para a geração de resíduos, mas esses resíduos não serão abordados nesse trabalho. Da mesma forma, os rejeitos produzidos por unidades de tratamento que utilizam o processo de abrandamento com cal não serão abordados, apesar da sua importância em termos volumétricos.

Neste trabalho, o termo “lodo” será utilizado para se referir aos resíduos gerados em decantadores e flotadores.

3.2.2 - Caracterização dos resíduos gerados em ETAs

Segundo Smollen e Kafaar (1998, *apud* Reali, 1999), qualquer tipo de lodo consiste em uma combinação entre uma fase sólida e uma certa quantidade de líquido. Esses autores estabeleceram o modelo ilustrado na Figura 3.6, onde são definidos os estados físicos da água presente nos resíduos de ETAs, apresentados a seguir em ordem crescente de dificuldade de separação:

- Água livre: água não associada com partículas sólidas;
- Água intersticial ou capilar: água ligada mecanicamente, a qual se encontra presa aos interstícios dos flocos;
- Água vicinal: constituída por múltiplas camadas de moléculas de água ligadas fisicamente, as quais se encontram firmemente presas à superfície da partícula por meio de pontes de hidrogênio;
- Água de hidratação: água quimicamente ligada à superfície das partículas sólidas.

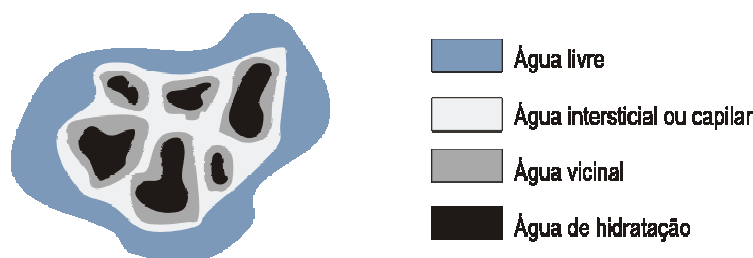


Figura 3.6 – Distribuição da água no lodo (Smollen e Kafaar, 1998, *apud* Reali, 1999)

As quantidades relativas dessas frações de água determinam as características de retenção de água e, conseqüentemente, o desempenho dos sistemas de remoção utilizados. A remoção de água do lodo tem por objetivo facilitar ou mesmo possibilitar o transporte e/ou disposição final dos resíduos do tratamento, e tal processo é realizado nas operações de adensamento e desidratação, detalhadas posteriormente.

Existe uma grande variabilidade na composição físico-química dos lodos, assim como na presença de microrganismos. Para compreender melhor essa diversidade, Doe (1990) ressalta que existem duas fontes principais de resíduos: o material presente na água bruta,

quer na forma solúvel ou particulada, e os produtos químicos utilizados para remover esse material. Cada processo de tratamento irá gerar, portanto, um tipo específico de resíduo, dependendo da qualidade da água bruta e das operações unitárias e produtos químicos adotados, podendo haver ainda variações sazonais desses fatores. Por fim, existe ainda influência das práticas operacionais adotadas para o processo de lavagem de filtros ou de remoção do lodo em clarificadores.

O conhecimento das características dos resíduos é fundamental para definição dos métodos de manejo e disposição final. Para caracterização dos resíduos em geral, vários parâmetros físicos, químicos e biológicos podem ser utilizados, a saber: sólidos, turbidez, pH, alcalinidade, indicadores do teor de matéria orgânica (demanda bioquímica de oxigênio - DBO, demanda química de oxigênio - DQO, carbono orgânico total - COT, concentração de sólidos voláteis - SV), índices bacteriológicos de interesse sanitário (coliformes totais, termotolerantes, *E. coli*, cistos de *Giardia*, oocistos de *Cryptosporidium*, contagem de ovos de helmintos), concentração de íons metálicos (bromo, manganês, chumbo, etc.) ou residuais dos coagulantes utilizados (alumínio e ferro), e concentração de parâmetros importantes do ponto de vista do tratamento biológico, tais como nitrogênio e fósforo.

Dos parâmetros citados, a determinação da série de sólidos tem sido a principal forma de caracterização dos resíduos de tratamento, sendo que a água de lavagem é geralmente caracterizada pela concentração de sólidos (em mg/L) e os lodos pelo teor de sólidos (em %). Como a maior parte da matéria presente nesses resíduos está em suspensão, os valores de sólidos em suspensão totais (SST) tendem a ser bem próximos aos de sólidos totais (ST). É recomendável expressar os dados conforme o método utilizado para sua determinação.

A concentração de sólidos determina a consistência dos resíduos gerados na ETA, que apresentam-se como líquido nos pontos de geração até uma consistência similar a argilas utilizadas na produção de cerâmica, na torta obtida em centrífugas, ou ainda como material quebradiço, nos leitos de secagem. A Tabela 3.1 correlaciona a concentração de sólidos com a consistência dos resíduos.

Sartori e Nunes (1997) avaliaram, para resíduos da ETA-Rio das Velhas e da ETE-Morro Alto, ambas em Minas Gerais, características como granulometria e limites de plasticidade

e de liquidez, tendo realizado também ensaio de compactação desses materiais. Embora a caracterização geotécnica seja negligenciada na maioria dos estudos abordados, dados obtidos em ensaios como esses podem ser extremamente importantes na avaliação de opções de transporte e disposição final desses resíduos. No caso estudado, os autores sugerem a realização de estudos para utilização dos lodos em questão na fabricação de tijolos.

Tabela 3.1 - Característica dos resíduos em função do teor de sólidos (Russell e Peck, 1997)

Teor de Sólidos Totais	Consistência
0 a 5%	Líquido
8 a 12%	Esponjoso, semi-sólido
18 a 25%	Argila mole
40 a 50%	Argila rígida

Conforme citado anteriormente, as características dos resíduos gerados dependem fundamentalmente do processo de tratamento e do tipo de coagulante adotados. Segundo Kawamura (2000), em uma estação de tratamento de água convencional utilizando coagulantes à base de alumínio, as propriedades da água de lavagem estão usualmente entre os valores apresentados na Tabela 3.2.

Já para o lodo proveniente da descarga de decantadores, também utilizando coagulantes a base de alumínio, Kawamura (2000) apresenta as faixas registradas na Tabela 3.3, onde pode ser observado que esse lodo é muito mais concentrado do que a água de lavagem de filtros. Por esse motivo, o autor recomenda que não seja realizada mistura da água de lavagem com o lodo de decantadores, tendo em vista que essa prática levaria à diluição de um lodo já previamente concentrado. Para efeito de comparação, a Tabela 3.4 apresenta dados obtidos na instalação piloto da ETA-Brasília, referentes ao lodo obtido na flotação para tratamento de água.

Do ponto de vista sanitário, a investigação microbiológica é fundamental na caracterização dos resíduos do tratamento de água. Scalize *et al.* (1997) realizaram pesquisa parasitológica nos sedimentos e sobrenadantes de ensaios de clarificação obtidos a partir de água de lavagem de filtros, tendo avaliado a presença de cistos, ovos e larvas de parasitas patogênicos. Foi identificada a presença de formas parasitárias tais como cistos de *Entamoeba coli*, larvas de *S.stercoralis*, e ovos e larvas de *Ancylostomatidae*. Em função

dos resultados obtidos, os autores recomendam que sejam tomados os devidos cuidados quando da disposição e reutilização desses despejos.

Tabela 3.2 - Características usuais da água de lavagem de filtros de ETAs que utilizam sulfato de alumínio como coagulante (Kawamura, 2000)

Turbidez (UT)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	SDT (%)
150 a 250	2 a 10	30 a 150	6,5 a 7,5	0,01 a 0,05

Legenda: SDT (sólidos dissolvidos totais)

Tabela 3.3 - Características usuais do lodo de decantadores de ETAs que utilizam sulfato de alumínio como coagulante (Kawamura, 2000)

DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	Sólidos Totais (%)	Al₂O₃ (% ST)	Material Inerte (%ST)	Orgânicos (% ST)
30 a 300	30 a 5000	6 a 8	0,1 a 4	15 a 40%ST	35 a 70%ST	15 a 25%ST

Tabela 3.4 - Características do lodo produzido em instalação piloto de flotação, na ETA-Brasília (Marwell, 2004)

Coagulante	DQO (mg/L)	pH	Sólidos Totais (%)
Sulfato de alumínio	9.700	5,0	1,6
Policloreto de alumínio	19.100	5,4	2,6

Um patógeno que causa grande preocupação é o *Cryptosporidium*, parasita intestinal que pode ser disseminado pelo sistema público de abastecimento de água. A infecção por esse parasita pode causar disfunção gastrointestinal, e pode gerar risco de vida para pessoas que estejam com sistema imunológico enfraquecido. A preocupação com os oocistos de *Cryptosporidium* no tratamento de água é devido a sua grande resistência aos desinfetantes utilizados, sendo difícil de inativá-los. Conseqüentemente, os outros processos de tratamento, tais como sedimentação e filtração, devem ser eficientes na sua remoção (USEPA, 2002). Conforme é discutido posteriormente, estudos têm sido realizados para avaliar a capacidade de remoção de cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* por diversos processos de tratamento, e os riscos da contaminação por esses parasitas em função da recirculação de água de lavagem e dos clarificados das etapas de tratamento de resíduos de ETAs.

A desinfecção do recirculado é recomendada por diversos autores (Kawamura, 2000; USEPA, 2002) para minimizar riscos microbiológicos. Mas devem ser tomados os devidos cuidados, tendo em vista que essa operação pode levar a formação de subprodutos da desinfecção, especialmente quando efetuada com cloro livre. Esses subprodutos, dentre os quais os trihalometanos – THMs, podem ter implicações na saúde humana, uma vez que

diversas pesquisas mostraram evidências de que os mesmos são potencialmente cancerígenos (WHO, 1993).

A Tabela 3.5 mostra exemplos de caracterização de resíduos gerados em ETAs e registrados por vários pesquisadores, por meio de alguns dos parâmetros descritos anteriormente. Pode ser observada, também, a grande diferença entre os resíduos gerados em estações de tratamento de água, mostrando a necessidade de equacionar o problema de forma quase individualizada (Cordeiro, 1999). Os dados apresentados referem-se a diferentes origens, como água de lavagem de filtros e lodo de decantadores.

Tabela 3.5 – Características dos resíduos gerados em ETAs (Cordeiro, 1999)

Autor (Ano)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	ST (mg/L)	SV (%ST)	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 5.000	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%	-
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%	-
Patrizzi (1998)	-	-	5,5	6.112	19%	-
Patrizzi (1998)	-	-	6,8	6.281	-	-

Observação: os autores referenciados por Cordeiro (1999) não constam nas referências bibliográficas do presente trabalho

Legenda: ST (sólidos totais); SV (sólidos voláteis); SS (sólidos em suspensão)

3.2.3 - Indicadores de desidratabilidade e alternativas de condicionamento

Sendo o tratamento dos resíduos basicamente um processo de remoção de água, é importante estabelecer parâmetros que caracterizem os resíduos segundo a facilidade de desidratação.

Nos estudos realizados no Brasil, o parâmetro mais utilizado para esse fim é a resistência específica. A resistência específica pode ser definida como a maior ou menor resistência à passagem de um líquido através de uma massa sólida, e seu método de determinação é baseado no ensaio de tempo de filtração, descrito *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WPCF, 1999), havendo também proposta de cálculo da resistência específica pelo método modificado (Zhao *et al.*, 1998), que

adicionalmente leva em consideração a resistência à passagem de água exercida pelo meio filtrante utilizado. Os valores de resistência específica podem variar consideravelmente. Em geral, lodos com resistência específica de até 1×10^{12} m/kg são considerados de fácil desidratação, enquanto aqueles com resistência específica acima de 10×10^{12} m/kg têm baixa desidratabilidade (Wolfe *et al.*, 1996).

Contudo, é importante ressaltar que a adoção de um parâmetro para avaliar o grau de desidratabilidade do lodo deve ser realizada com critérios. A capilaridade, por exemplo, é outra forma de se medir a desidratabilidade dos lodos, e tem sido utilizada com grande frequência em diversos trabalhos (Wu *et al.*, 1997; Lee e Liu, 2001; Zhao *et al.*, 2002). Pan *et al.* (2003) avaliaram a correlação entre índices de medição de desidratabilidade (capilaridade e resistência específica) e o desempenho de alguns equipamentos de desidratação (filtro prensa, prensa desaguadora e centrífuga). Segundo os autores, em geral, a desidratabilidade na centrifugação pode ser melhor representada pela capilaridade, enquanto para filtros prensa a resistência específica seria o indicador mais apropriado.

Uma terceira forma de se medir a desidratabilidade dos lodos, seria a medição da parcela de “água presa” (*bound water*, correspondente ao somatório das parcelas capilar, vicinal e de hidratação). Sua análise pode ser realizada pelo método dilatométrico, baseado na teoria de que a fração de água presa tem ponto de congelamento inferior ao da água pura. Segundo Colin e Gazbar (1995), a medição desse parâmetro pode ser realizada em um equipamento denominado dilatômetro, onde a amostra e um fluido indicador são congelados (a uma temperatura entre 20 e 25° C, por 24 horas), e a variação volumétrica é registrada e utilizada nos cálculos necessários para determinação da parcela de *bound water*. Quanto maior essa fração, mais difícil a desidratação do lodo.

Para melhorar as condições de desidratabilidade dos lodos, e também da água de lavagem, pode-se efetuar o condicionamento químico desses resíduos com uma grande variedade de produtos, tais como sais de alumínio ou ferro, cal, polímeros ou por mecanismos físicos de condicionamento térmico (Wolfe *et al.*, 1996).

Dependendo do objetivo do condicionamento, podem ser utilizadas diversas outras substâncias para condicionamento dos lodos. Caso a desidratação seja por equipamentos de filtração forçada, podem ser adicionados ao lodo materiais que possibilitem formação de

uma estrutura no lodo, ou esqueleto, reduzindo assim sua compressibilidade e garantindo a permeabilidade na torta desidratada. Trata-se de um condicionamento físico, que pode ser realizado com materiais tais como serragem, gesso, cinzas e bagaço (Zhao, 2002).

Os polímeros podem ser naturais (amidos) ou sintéticos, podendo ser classificados também segundo a carga elétrica que possuem em solução aquosa (catiônicos, aniônicos ou não-iônicos), sua densidade de carga elétrica (baixa, média, alta) ou ainda de acordo com seu peso molecular (baixo, médio, alto, muito alto). Para melhorar a desidratabilidade dos lodos, geralmente é aplicado apenas um tipo de polímero. Contudo, Lee e Liu (2001) verificaram que a aplicação seqüencial com dois tipos diferentes de polímero pode levar a melhores resultados, em termos de desidratabilidade, do que no condicionamento com um único produto. Dessa forma, a escolha do tipo de polímero a ser utilizado deve ser avaliada com cuidado, testando-se a maior quantidade possível de produtos em ensaios em escala de bancada, piloto, ou mesmo na própria unidade de adensamento ou desidratação.

De acordo com Zhao *et al.* (2002), o condicionamento com polímeros altera as propriedades físicas do lodo, tais como diâmetro médio, compactidade, dimensão fractal, porosidade e suas propriedades reológicas. Segundo Wu *et al.* (1997), o condicionamento afeta também a distribuição de água no lodo, melhorando suas condições de desidratabilidade. Mas apesar dos numerosos estudos terem abordado o tema, a relação entre as propriedades físicas do lodo e seu potencial de desidratabilidade permanece pouco clara, havendo ainda discrepâncias a respeito de como as características físicas do lodo reagem à adição de polímero.

Wolfe *et al.* (1996) apresentam uma outra abordagem sobre a ação dos polímeros em relação à distribuição de água no lodo. Primeiramente, é necessário apresentar a terminologia adotada pelos autores, baseada em uma definição operacional em termos de potencial de desidratação, onde a água nos lodos é dividida segundo três categorias:

- Água removível dos flocos: água retida dentro dos flocos, de maneira similar a uma esponja;
- Água capilar: água presa entre as partículas, devido à ação da capilaridade;
- Água não removível: água associada à superfície das partículas (equivalente às frações de água vicinal e de hidratação, citadas anteriormente).

Tanto a água removível dos flocos quanto a água capilar podem ser removidas pela aplicação de pressão. Segundo os autores, a pressão aplicada é a principal variável operacional na desidratação. Quanto maior a pressão aplicada, maior a concentração de sólidos na torta, tendo em vista irão sendo diminuindo as parcelas de água removível e água capilar, simultaneamente. Até que, para o maior valor de pressão aplicada, reste apenas a parcela de água não removível.

Quanto ao condicionamento químico, os autores explicam que os polímeros interagem apenas com a superfície externa dos flocos, sem alterar sua estrutura interna. O condicionamento não afetaria nem as parcelas de água vicinal e de hidratação, nem o potencial de desidratação do lodo – em termos do teor de sólidos possível de se obter na torta desidratada.

Dessa forma, concluem os autores que o teor de sólidos de qualquer resíduo do tratamento de água é resultado de dois fatores principais: das características impostas na sua formação, nas etapas de coagulação/floculação do tratamento de água, e pela pressão aplicada no equipamento de desidratação. Uma vez formada a estrutura do floco (ainda durante o tratamento de água, na floculação), o único condicionamento que poderia afetar substancialmente a estrutura interna dos flocos seria pelo mecanismo de congelamento e descongelamento (*freeze-thaw conditioning*).

Uma análise promissora para otimização do condicionamento com polímeros, resulta dos estudos sobre os efeitos da viscosidade do sobrenadante na desidratabilidade dos lodos. Bache e Papavasiliopoulos (2000) descreveram que, à medida que a dosagem de polímero aumenta, inicialmente a viscosidade do sobrenadante diminui, passando por um valor mínimo (dosagem crítica), e então aumenta continuamente. A viscosidade da fase líquida seria, portanto, determinante para habilidade na remoção de água do lodo.

Zhao *et al.* (2002) apontam para as vantagens da definição da dosagem ótima pela viscosidade do sobrenadante, sendo que um dos motivos que tornam esse critério atraente seria sua vantagem em termos econômicos, pois o aumento da viscosidade é causado pelo excesso da aplicação de polímero. Ou seja, o método permite identificar o ponto que se atinge a saturação da capacidade de adsorção de polímeros dos flocos, e a partir do qual todo polímero adicionado contribui para o aumento da concentração residual de polímero

no sobrenadante, aumentando sua viscosidade e levando a condições mais desfavoráveis na operação de remoção de água.

Uma última característica relevante sobre a desidratabilidade dos resíduos de ETAs está relacionada às propriedades dos lodos de natureza orgânica. Segundo Pan *et al.* (1999), devido à incorporação das algas a sua estrutura, o lodo torna-se mais complexo, e de baixa desidratabilidade. Em contrapartida, os autores constataram que, durante o envelhecimento do lodo, até o quinto dia, a carga elétrica superficial do lodo se torna mais negativa devido ao material liberado pelas células das algas, levando a algum ganho na desidratabilidade do lodo. Trata-se de um processo de bio-floculação, cujas vantagens são perdidas com o avançar do tempo.

Conforme pode ser visto, são diversos os fatores que afetam a remoção de água dos lodos. Assim, a desidratabilidade dos resíduos de ETAs deve ser avaliada de forma abrangente, devido à dificuldade em se correlacionar um determinado parâmetro com a facilidade de remoção de água. Para lodos cujo coagulante utilizado tenha sido sulfato de alumínio, ou para lodos que contenham algas, a desidratabilidade é substancialmente comprometida, o que pode implicar em complicações especialmente quanto a questões legais, ambientais e financeiras envolvidas nas etapas de tratamento, transporte e disposição final.

Melhorar as condições de desidratabilidade dos lodos, otimizando assim seu adensamento e desidratação, são questões de extrema importância no manejo dos resíduos de ETAs. Uma alternativa é o condicionamento desses lodos, e a utilização de polímeros para esse fim tem-se mostrado eficiente, mas sua aplicabilidade deve ser avaliada com cuidado, tendo em vista a grande complexidade desse tema.

3.2.4 - Legislação aplicável

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que esses resíduos possam ser gerenciados adequadamente. Segundo essa norma, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água são resíduos sólidos, assim como outros resíduos resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição. A norma

estabelece duas classes, “I - Perigosos” e “II - Não perigosos”, sendo que a classe II pode ser subdividida em “II A - Não inertes” e “II B - Inertes”.

Em geral, os resíduos de ETA não possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade, sendo, portanto, considerados da “Classe II – Não perigosos”. Embora a patogenicidade seja uma característica dos resíduos “Classe I – Perigosos”, segundo a norma os resíduos gerados em estações de tratamento de esgotos não estão sujeitos ao critério de patogenicidade, e podendo-se inferir que essa exceção seja estendida também aos resíduos do tratamento de água.

Quanto a sua sub-classificação, os lodos de decantadores e flotadores, assim como a água de lavagem de filtros, tendem a ser classificados como “Classe IIA – Não inertes”, tendo em vista as altas concentrações de alguns metais incorporados em sua estrutura, tais como o alumínio presente nos coagulantes utilizados no tratamento de água. Como exemplo, Di Bernardo *et al.* (1999a), após realizar ensaios de caracterização dos sedimentos da ETA- Descalvado, em São Paulo, verificaram que o lodo em questão se tratava da “Classe II A – Não inertes”, devido às concentrações de alumínio, ferro e manganês presentes no lodo, superiores aos limites da norma para classificação como resíduo sólido inerte. Fica restringido, então, o lançamento desses resíduos diretamente nos corpos d’água, devendo-se recorrer a processos adequados de tratamento e disposição final.

A lei 9.605 – Lei de Crimes Ambientais (Brasil, 1998), dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Por essa lei, é definido como crime ambiental o ato de causar poluição em níveis tais que possam resultar em danos à saúde humana devido ao lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos em desacordo com as exigências estabelecidas em leis e regulamentos.

A resolução nº 357 (CONAMA, 2005) dispõe, entre outros assuntos, sobre os padrões de lançamento de efluentes em corpos d’água. Dentre as várias condicionantes apresentadas, uma em especial chama a atenção: o limite para o parâmetro sólidos sedimentáveis é de apenas 1 mL/L, sendo que para o lançamento em lagos e lagoas os materiais sedimentáveis devem estar virtualmente ausentes.

Dados apresentados por Di Bernardo *et al.* (1999a) exemplificam as restrições para manejo dos resíduos do tratamento: quatro ETAs estudadas pelos autores apresentaram águas de lavagem com concentração de sólidos sedimentáveis variando entre 3 e 74 mL/L. Tendo em vista que tanto os lodos de clarificadores quanto a água de lavagem de filtros possuem valores de sólidos sedimentáveis acima do limite estabelecido na resolução n° 357 (CONAMA, 2005) para esse parâmetro, o lançamento desses resíduos em corpos d'água vai contra as exigências da legislação. Dessa forma, é crime ambiental o lançamento de resíduos de ETAs nos corpos d'água, estando os infratores sujeitos às penalidades previstas na lei.

Por fim, a lei 9.433 (Brasil, 1997) apresenta a outorga de direitos de uso e a cobrança pelo uso da água como instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, induzindo assim ao uso racional da água. Implementados esses instrumentos, é estimulada a redução nos volumes captados, tanto pelo fator financeiro quanto por eventuais limitações nas outorgas autorizadas. Essa parcela pode ser então compensada pelo desenvolvimento de atividades que tenham por fim reduzir perdas em estações de tratamento, tais como o tratamento dos resíduos com recirculação dos clarificados.

Assim, o gerenciamento adequado dos resíduos de ETAs passa a ser um aspecto estratégico fundamental do planejamento das companhias de saneamento. Contudo, é importante destacar que não só as exigências da legislação e os instrumentos econômicos atuam nesse processo, mas também a crescente pressão da sociedade aliada ao aumento da consciência ambiental dos agentes do setor saneamento, dentre os quais as próprias companhias. Prova disso é o fato de que, apesar de todo esse conjunto de leis e regulamentos não terem sido totalmente consolidados, ainda assim ser possível observar iniciativas e estudos sendo desenvolvidos, conforme relatado ao longo deste trabalho.

3.3 - MÉTODOS DE MANEJO E TRATAMENTO

3.3.1 - Tratamento dos resíduos de ETAs

Tendo em vista as restrições da legislação para lançamento dos resíduos de ETAs em corpos d'água, o volume de água perdido e os impactos ambientais associados a essa

prática, há uma crescente necessidade de proporcionar uma destinação adequada ou um uso produtivo a esses resíduos, minimizando também a quantidade de subprodutos gerada.

As alternativas para disposição final são muitas, sendo que o método mais comumente empregado é a disposição em aterro sanitários. Contudo, para o transporte dos resíduos ser viável economicamente, ou mesmo para tornar possível sua disposição no solo, é necessário remover água desses resíduos até valores aceitáveis. Segundo Kawamura (2000), essa meta seria um teor de sólidos no mínimo entre 20% e 25%, sendo que alguns aterros sanitários exigem teores de sólidos acima de 40%.

O processo de tratamento de resíduos deve ser selecionado, portanto, conforme a alternativa de disposição final ou uso produtivo adotada. A parcela líquida removida, quando possível, deve retornar ao processo, reduzindo assim as perdas no tratamento de água. Segundo Russell *et al.* (1996), os processos de tratamento dos resíduos podem ser classificados de acordo com a concentração de sólidos obtida, conforme apresentado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Classificação dos processos de tratamento dos resíduos em função da concentração de sólidos obtida (Russell *et al.*, 1996)

Teor de sólidos totais obtido após tratamento	Processo de tratamento dos resíduos
< 8%	Adensamento
8 a 35%	Desidratação
> 35%	Secagem

A etapa de desidratação, ou desaguamento, geralmente permite alcançar os teores de sólidos recomendados para as alternativas de destinação mais exigentes. Esses processos são realizados principalmente por sistemas mecânicos, tais como centrifugação e filtração forçada (filtro-prensa, prensa desaguadora, filtro a vácuo), ou em sistemas naturais, como em lagoas de lodo e leitos de secagem.

Contudo, alguns desses métodos exigem um teor mínimo de sólidos no lodo para um funcionamento mais eficiente. Como exemplo, na centrifugação é recomendável que o lodo a ser desidratado apresente um teor de sólidos maior que 2%, tendo em vista que os equipamentos existentes no mercado exigem esse requisito para um funcionamento de forma adequada e econômica.

Dessa forma, o tratamento dos resíduos de ETAs pode necessitar de uma etapa anterior à desidratação, etapa essa denominada adensamento ou espessamento. Embora algumas tecnologias de tratamento de água, como a flotação, permitam obter diretamente um teor de sólidos aceitável para desidratação, a água de lavagem e a maioria dos lodos gerados em decantadores necessitam de prévio adensamento para serem submetidos aos equipamentos de desidratação.

As alternativas usuais para adensamento são as mesmas tipicamente selecionadas para clarificação da água bruta, a decantação e a flotação. Segundo Russell *et al.* (1996), os adensadores mecânicos de esteira também podem ser utilizados, permitindo obter teores de sólidos entre 2,5 e 4,5%.

Sobre o processo de secagem, onde é possível obter um teor de sólidos acima de 35%, podem ser utilizados leitos com secagem prolongada ou métodos de secagem térmica. Além desses, os mesmos filtros-prensa utilizados no adensamento podem permitir, sob certas circunstâncias, atingir teores de sólidos maiores que 35% (Russell *et al.*, 1996).

Uma outra forma de diminuir o volume de lodo a ser descartado é a recuperação de coagulantes a partir do lodo de ETAs, uma vez que entre 35 e 50% dos sólidos presentes no lodo são hidróxidos. Dessa forma, além de diminuir o volume de lodo a ser descartado, são reciclados os produtos químicos utilizados na coagulação (Gonçalves *et al.*, 1999). Essa prática, contudo, é desencorajada por Kawamura (2000), devido aos potenciais efeitos nocivos à saúde decorrentes da recirculação e acumulação de metais pesados no processo.

Embora tenha sido dado destaque ao tratamento dos resíduos com vistas à remoção de água do lodo, em determinados casos os requisitos para disposição final ou uso produtivo podem envolver também aspectos qualitativos. Nesse caso, o processo de tratamento do resíduo deve ser escolhido e projetado de forma a atender as limitações existentes, que podem englobar parâmetros tais como: residuais de ferro ou alumínio, potencial de formação de THM, traços de determinados metais, pH, COT, dentre outros (Russell *et al.*, 1996).

De uma forma geral, pode-se dizer que:

- O processo de tratamento dos resíduos, seja por adensamento, desidratação, secagem, ou ainda por uma combinação dos mesmos, será determinado em função dos requisitos da alternativa de disposição final ou uso produtivo escolhida;
- O lodo de decantadores costuma a ter como indicação o adensamento por gravidade, enquanto a água de lavagem pode ser adensada também por flotação;
- O condicionamento do lodo e da água de lavagem, geralmente pela adição de polímeros, melhora as condições de desidratação e adensamento;
- A torta, resultante da desidratação, deve resultar em uma concentração apropriada para a destinação final;
- A água retirada dos lodos e da água de lavagem, tanto nas etapas de adensamento quanto de desidratação, pode retornar ao processo, sob certas condições específicas. Esse processo é denominado recirculação, podendo haver desinfecção do recirculado;
- Em alguns casos, etapas podem ser suprimidas, e até mesmo a água de lavagem da filtração rápida pode retornar diretamente ao início do processo de tratamento, o que é chamado de recirculação direta.

Essas idéias estão representadas esquematicamente na Figura 3.7, onde são apresentados os caminhos possíveis das fases líquida e sólida dos resíduos de estações de tratamento de água com coagulação química ao longo do processo de tratamento até a disposição final. Da Figura 3.7, pode-se inferir que o processo de tratamento dos resíduos de ETAs nada mais é do que uma extensão do processo de tratamento de água, tendo em vista ser uma continuidade do processo de separação sólido-líquido. O que o torna diferente é que, até alguns anos atrás, não havia preocupação em se estender esse processo até às elevadas concentrações de sólidos possíveis de se obter atualmente, sendo que os dejetos eram lançados diretamente nos corpos d'água. Contudo, essa tendência foi recentemente alterada, e as novas ETAs têm sido projetadas e as existentes adequadas considerando o tratamento e disposição final de seus resíduos de uma forma ambientalmente correta e geralmente sustentável do ponto de vista financeiro.

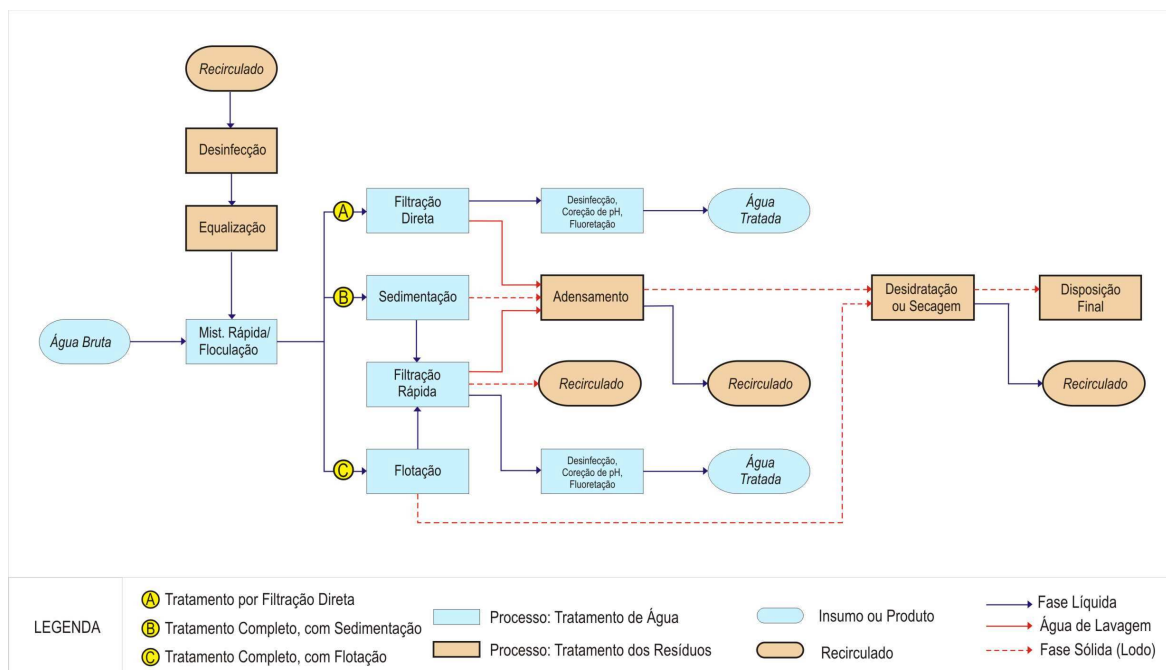


Figura 3.7 - Caminhos possíveis para as fases líquida e sólida no tratamento dos resíduos gerados em ETAs típicas, considerando todas opções de recirculação

Vários aspectos devem ser levados em conta para um eficiente manejo e tratamento dos resíduos de ETAs. Como exemplo, Schofield (1997) relata que um problema possível no tratamento dos lodos produzidos por unidades de flotação é o fato de que os sólidos podem reter as microbolhas, gerando uma estrutura difícil de se desestabilizar. Em outro caso, Ferreira Filho (1997), comparando o adensamento de ETAs com características da água bruta diferentes, constatou que a remoção de água dos resíduos será dificultada caso os lodos sejam provenientes do tratamento de águas de mananciais eutrofizados. Dessa forma, a natureza e a composição das águas tratadas pela flotação e o mecanismo pelo qual as impurezas são removidas faz com que o lodo produzido tenha características diferentes dos demais, dificultando a escolha do processo de tratamento

As opções de tratamento devem ser estudadas caso a caso, tendo em vista as particularidades de cada processo e também da própria água bruta. A realização de estudos de tratabilidade torna-se então fundamental para a escolha das opções mais vantajosas para tratamento dos resíduos gerados em ETAs, assim como para definição de parâmetros de projeto e de operação.

3.3.2 - Técnicas de adensamento

Conforme mencionado anteriormente, as alternativas mais usuais para o adensamento de resíduos de ETAs são a sedimentação e a flotação, sendo que a primeira a mais adotada, no Brasil.

Teixeira e Ferreira Filho (1999) estudaram a influência do condicionamento do lodo no adensamento por sedimentação. Foram avaliados diferentes tipos e dosagens de polímeros, aplicados no lodo proveniente de decantadores de uma ETA que utiliza sais de ferro como coagulante (ETA-Alto da Boa Vista, em São Paulo). Os resultados, obtidos após ensaios em colunas de sedimentação, mostraram diferentes comportamentos de acordo com o polímero adicionado. Os polímeros catiônicos e não-iônicos promoveram um aumento sensível da velocidade de sedimentação, enquanto o polímero aniônico atuou de forma contrária, diminuindo os valores de V_s .

Os autores explicam esse comportamento pelo fato das partículas presentes na água de lavagem serem negativas, e a adição de polímero aniônico pode ter incrementado ainda mais as forças de repulsão entre os flocos, piorando as condições de sedimentação. Concluem então sobre a importância de se realizar testes preliminares com diversos tipos de polímeros, visando a seleção daquele que proporcione melhores resultados. Nessa análise, foi selecionado o polímero catiônico de alto peso molecular, com dosagem de 2 g/kg de SST.

Em outro estudo, Scalize e Di Bernardo (2000) avaliaram a adensamento por sedimentação da água de lavagem de uma ETA que utiliza sulfato de alumínio como coagulante (ETA São Carlos, em São Paulo), utilizando colunas de sedimentação. Foram estudadas as características do sedimento e do clarificado de três amostras, após aplicação de polímero aniônico. Os resultados do adensamento com a água de lavagem pré-condicionada foram melhores do que na situação sem polímero, tanto em termos de qualidade do sobrenadante quanto de concentração do lodo, tendo sido para tal necessária a aplicação de elevada dosagem do produto, de 24 g/kg de SST. O lodo obtido nessas condições apresentou teor de sólidos entre 0,8 e 1,3%. Os autores verificaram também que a aplicação de polímero no adensamento pode facilitar a desidratação do sedimento, já que os resultados de resistência específica do lodo pré-condicionado foram menores do que no caso sem aplicação de

polímero (em torno de 3×10^{12} m/kg para o lodo condicionado e entre 7×10^{12} e 36×10^{12} m/kg para o lodo sem condicionamento).

Souza Filho e Di Bernardo (1999) realizaram experimentos de adensamento por sedimentação semelhantes, com água de lavagem de ETA que utiliza cloreto férrico como coagulante (ETA-Águas do Paiol, em São Paulo), mas testando diferentes polímeros em diferentes dosagens. Foi avaliada a evolução do clarificado em termos de turbidez, e para as melhores dosagens de cada tipo de polímero, procedeu-se à caracterização do sobrenadante e dos materiais sedimentados. O melhor resultado foi obtido com polímero aniônico (dosagem de 1 mg/L, gerando um lodo com teor de sólidos totais de aproximadamente 0,4%), e para todos ensaios realizados com aplicação de polímero a sedimentabilidade foi superior do que na situação sem polímero.

Desses experimentos, observa-se a importância do condicionamento na obtenção de melhores resultados no adensamento por sedimentação, tanto em termos do clarificado quando do adensamento do lodo. Além disso, é importante notar que a seleção do polímero mais indicado para condicionamento depende dos processos de tratamento adotados, do tipo de coagulante e dosagem aplicadas no tratamento, e ainda da qualidade da água bruta. Essa grande variabilidade de fatores confirma a necessidade de se avaliar cada caso cuidadosamente, levando ainda em consideração a possibilidade da aplicação de outras alternativas de tratamento existentes, tal como a flotação.

Arnold *et al.* (1995) apontam algumas das vantagens do processo de flotação a ar dissolvido em comparação à sedimentação, tais como: alta taxa de captura de sólidos, menor formação de lodo, baixa sensibilidade a variações na qualidade e na vazão afluente, e necessidade de menores áreas para instalação.

Eades *et al.* (2001) avaliaram, em escala piloto, o adensamento por flotação da água de lavagem da ETA Leopold Mobile, localizada nos Estados Unidos. Os experimentos mostraram a eficiência da FAD e a influência de alguns dos principais parâmetros de projeto. A adição de coagulantes primários para um bom adensamento não foi necessária, tendo sido suficiente a aplicação de polímero, com dosagens entre 0,1 e 0,5 mg/L. Segundo os autores, a utilização de dosagens tão baixas, aliadas a uma taxa de recirculação abaixo

de 25%, mostra a competitividade da flotação como opção para adensamento de água de lavagem de filtros.

De fato, também em termos qualitativos a FAD tende a ser competitiva, ou mesmo apresentar melhor desempenho, em relação à sedimentação. Patrizzi *et al.* (1999) compararam, em escala de bancada, os processos de adensamento por flotação e por sedimentação para tratamento do lodo de decantadores de ETA que utiliza sulfato de alumínio como coagulante (ETA-Capim Fino, em São Paulo). Foi obtido um teor de sólidos no lodo adensado em torno de 7% para flotação, e de aproximadamente 4,5% para sedimentação. O condicionamento com polímeros mostrou-se fundamental para obtenção de melhores resultados, tanto na flotação quanto na sedimentação. As dosagens de polímero selecionadas foram menores na FAD, na faixa entre 3,7 e 4,5 g/kg de SST, sendo que na sedimentação a dosagem foi de 10,3 g/kg de SST. Há de se ressaltar, contudo, que a taxa de recirculação adotada na flotação foi alta, de 120%, a necessária para se obter uma relação A/S entre 0,022 e 0,024 g de ar/g de SST.

Arora *et al.* (1995), por sua vez, compararam o desempenho da FAD em escala de bancada com resultados operacionais obtidos por decantadores em diferentes ETAs, para adensamento dos resíduos de tratamento. Embora os resultados obtidos no adensamento por flotação tenham sido similares aos obtidos pela sedimentação, as taxas de recirculação adotadas foram de até 300%, em algumas das ETAs avaliadas. Essas taxas, excessivamente altas, podem levar a inviabilização do uso da FAD, em função do alto consumo de energia do sistema de saturação de ar. Contudo, a diferença entre os resultados apresentados para cada ETA avaliada mostra a necessidade de se estudar a aplicação da FAD em escala piloto ou de bancada, efetuando comparações com outras alternativas disponíveis. Uma particularidade pode ser destacada: os autores verificaram dificuldades na flotação para o adensamento do lodo de ETAs que utilizam cloreto férrico como coagulante.

3.3.3 - Técnicas de desidratação

No Brasil, a alternativa de desidratação mecânica mais utilizada tem sido a centrifugação. Outros equipamentos, baseados na técnica de filtração forçada, têm ganhado espaço nos últimos anos. Outras possibilidades para desidratação de resíduos são as baseadas em sistemas naturais, tais como a utilização de lagoas de lodo ou leitos de secagem.

Para avaliar a eficiência de desidratação de um determinado lodo, submete-se a amostra a desidratação em centrífuga de laboratório, sob condições específicas de trabalho. Conhecendo-se o teor de sólidos inicial da amostra de lodo, o volume submetido à centrifugação, e observando-se o volume de água clarificada ao final do período de centrifugação, é possível estimar o teor de sólidos no lodo por meio de balanço de massa. Para tal, considera-se que a concentração de sólidos no clarificado é desprezível e, portanto, todos os sólidos em suspensão tenham sido capturados na torta.

Realí *et al.* (1999b) destacam que a vantagem de se empregar esse método é operacional, no sentido que permite uma execução mais rápida do que no ensaio completo – onde se procede a determinação gravimétrica do teor de sólidos em cada tubo de centrifugação. Os autores comentam ainda que, caso se queira avaliar a eficiência do processo de centrifugação, deve-se construir curvas de centrifugação, para avaliação da rotação da centrífuga e do tempo de centrifugação. Já no controle rotineiro do condicionamento químico de um determinado tipo de lodo, pode ser escolhida uma rotação que permita visualizar com maior clareza a melhor dosagem, enquanto o tempo de centrifugação deve ser aquele a partir do qual não se observe variações significativas do teor de sólidos na torta.

É importante ressaltar que a rotação da centrífuga deve ser expressa em termos do parâmetro G^* , que indica quantas vezes a intensidade da força centrífuga do equipamento de desidratação é maior que a intensidade do campo gravitacional. A grande vantagem da utilização desse parâmetro é o fato de G^* ser função do raio da centrífuga, o que permite a comparação entre diferentes equipamentos. O valor desse parâmetro, para sistemas de centrífuga em geral, pode ser expresso pela Equação 3.1, onde a rotação R deve ser expressa em rpm e o raio de giração r em m.

$$G^* = 4,024 \cdot R \cdot r \quad \text{Equação 3.1}$$

Di Bernardo *et al.* (1999b) estudaram a desidratação por centrifugação de lodo obtido no adensamento, em colunas de sedimentação, da água de lavagem de filtros da ETA Descalvado, localizada em São Paulo. Concluem os autores que o condicionamento com polímero resultou um lodo mais fácil de ser desidratado, tendo em vista que a resistência específica do lodo condicionado foi menor do que na situação sem condicionamento.

Ainda segundo os autores, tal fato se confirmou nos ensaios de centrifugação, onde foram obtidos teores de sólidos na torta de 9,0%, para a amostra condicionada com polímero aniônico, e de 8,2%, na amostra sem aplicação de polímero. Ainda segundo os autores, com o uso de polímero, a resistência específica do sedimento diminui, indicando uma maior facilidade no desagumamento por centrifugação (de $30,6 \times 10^{12}$ para $5,0 \times 10^{12}$ m/kg).

Barbosa (1997) apresentou resultados obtidos pela Caesb, em escala real, na desidratação em centrífuga do lodo proveniente de adensadores de gravidade, responsáveis pelo adensamento da água de lavagem dos filtros, sendo que a estação em questão (ETA-Descoberto) utilizava sulfato de alumínio como coagulante. Era efetuada aplicação de polímeros tanto no adensamento (aniônico de baixa carga, com dosagens entre 2 e 11 mg/L) quanto na desidratação (aniônico de alta carga, com dosagem de 2 g/kg de sólidos secos). O lodo removido dos adensadores possuía teores de sólidos na faixa entre 2,5 e 3%, e a torta obtida na desidratação por centrífugas apresentou teores de sólidos entre 25 e 30%. Segundo informações do fabricante, a centrífuga utilizada pela ETA-Descoberto possui G^* médio de aproximadamente 2.500 g.

Os resultados apresentados por Barbosa (1997) mostraram um caso de excelente desempenho no processo de tratamento dos resíduos. No entanto, cabe ressaltar que a água tratada pela ETA-Descoberto apresenta baixos teores de matéria orgânica, e não se deve esperar a repetição de resultados semelhantes situações potencialmente mais desfavoráveis, tais como na desidratação de resíduos gerados no tratamento de águas com presença de algas (Schofield, 1997; Teixeira Filho, 1997; Pan *et al.*, 1999), ou oriundas do processo de flotação (Schofield, 1997).

Sobre a provável baixa desidratabilidade de lodos produzidos por flotação, Schofield (1997), discute que, em várias situações estudadas, a desidratação por centrífugas do lodo proveniente de FAD não foi capaz de fornecer torta com concentrações superiores a 17%. No caso da estação de tratamento de água de Frankley (Reino Unido), onde era necessário produzir um lodo com teor de sólidos superior a 25% para aceitação em aterro sanitário, testes em escala piloto indicaram que os únicos equipamentos mecânicos de desidratação capazes de produzir tortas com tal concentração de sólidos seriam o filtro prensa de placas (desidratou o lodo até um teor de sólidos de 24%, mas com doses excessivas de polímero) e o filtro prensa diafragma, no qual se obteve teores de sólidos na torta entre 25 e 30%.

Dos estudos apresentados até o momento, sobre desidratação em centrífuga, cabe apresentar algumas ponderações. Diferenças entre as concentrações de sólidos na torta obtidas com e sem condicionamento, como as observadas por Di Bernardo (1999b), devem ser interpretadas com cuidado, não necessariamente justificando a aplicação de polímero. O uso do indicador de resistência específica para avaliar condições de desidratabilidade em centrífuga pode não ser apropriado, tendo em vista que outros estudos demonstraram que a capilaridade apresenta melhor correlação com esse tipo de processo, enquanto a resistência específica corresponderia melhor como indicador de processos de filtração forçada (Pan *et al.*, 2003).

Para a filtração forçada, o condicionamento tende a ser decisivo na obtenção de melhores resultados na remoção de água do lodo. O objetivo principal do condicionamento, nesses casos, é evitar que haja uma colmatação excessiva da torta próxima à superfície de filtração, garantindo assim a passagem de água através do lodo, ou seja, sua filtrabilidade. O condicionamento deve emprestar ao lodo características diferentes daquelas desejadas na desidratação por centrifugação, já que deve ser formada uma estrutura no lodo que aumente sua porosidade, sem contudo aumentar sua compressibilidade. Diferentes materiais têm sido testados com esse objetivo, obtendo-se resultados promissores, tais como o condicionamento com serragem (Cordeiro, 1993) e com gesso (Zhao e Bache, 2001). Não só o condicionamento físico permite formar lodos com essas características, já que a aplicação de polímeros também permite condicionar os lodos para filtração forçada. Conforme demonstrado por estudos como os de Souza (2001), polímeros catiônicos são mais indicados para esse fim, em comparação com os aniônicos.

Mendes *et al.* (2001) avaliaram a utilização de filtro prensa de placas, em escala piloto, para desidratação de lodo gerado nos decantadores de estação que usa sulfato férrico como coagulante (ETA-Rio Grande, em São Paulo). A torta obtida apresentou teor de sólidos de aproximadamente 30%, para condicionamento com polímero catiônico na dosagem de 2,2 g/kg de ST. Um detalhe a ser observado é que a fração de sólidos voláteis representou cerca 30% do total de sólidos da torta obtida, ou seja, havia uma predominância de material inerte no lodo estudado.

Cordeiro (1993) realizou estudos voltados para a remoção de água de lodos de decantadores, avaliando opções para desidratação. O autor realizou ensaios com pressão maior que a atmosférica (filtro prensa), com pressão igual a atmosférica (leito de secagem) e com pressão menor que a atmosférica (filtração a vácuo). O melhor desempenho quanto à capacidade de desidratação, foi verificada na filtração a vácuo, que atingiu cerca de 90% de remoção de água independentemente da manta utilizada.

Embora os melhores resultados tenham sido obtidos na filtração a vácuo, cabe aqui discutir alguns aspectos relacionados aos ensaios com filtro prensa. Para esses ensaios, foi confeccionado um equipamento denominado filtro prensa de laboratório. Esse aparelho era composto por um tubo com 50 mm de diâmetro interno, moldado a partir de um tarugo de PVC. Nesse tubo eram colocadas as amostras, com volume de 500 mL, pré-condicionadas ou não. Na parte inferior, eram alojadas as mantas de filtração, com diferentes coeficientes de permeabilidade. A parte superior consistia em uma câmara de compressão, dotada de tomada de ar, válvula de alívio e manômetro.

Nos experimentos de Cordeiro (1993) com o filtro prensa de laboratório, o condicionamento do lodo mostrou-se extremamente importante, tendo em vista que sem condicionamento obteve-se apenas 30% de remoção de água, enquanto para o lodo condicionado esse valor foi superior a 80%. O condicionamento foi feito adicionando-se 15 g de serragem aos 500 mL de lodo utilizados em cada ensaio. O autor constatou que o tipo de manta utilizada não influi significativamente nos resultados, já que a filtração se dá no lodo, e não na manta. Ainda assim, o autor verificou que a manta de nylon multifilar com permeabilidade entre 0,6 e 0,7 m³/m².min foi a que apresentou melhores resultados, com a pressão de filtração de 6 atm.

Souza (2001) estudou outro processo de filtração forçada, a desidratação com filtro prensa de esteira (prensa desaguadora). Os ensaios foram realizados a partir do desaguamento dos lodos da ETA-Alto da Boa Vista e da ETA-Rio Grande, ambas em São Paulo. Foram avaliados diferentes polímeros, e o catiônico apresentou melhores resultados, o que é esperado para desidratação por filtração forçada, devido ao tipo de floco formado. Com uma dosagem de 6 g/kg de ST foi possível obter uma torta com teor de sólidos totais de cerca de 18%, para ambos os lodos.

Quanto a estudos voltados para a avaliação da pré-oxidação química como forma de melhorar a desidratabilidade do lodo proveniente do tratamento de águas eutrofizadas, os resultados obtidos não são muito otimistas. Kawamoto e Ferreira Filho (2000) estudaram a pré-oxidação do lodo de decantadores com permanganato de potássio (KMnO_4) e peróxido de oxigênio (H_2O_2) anteriormente a centrifugação. Os ensaios realizados indicaram que os valores de resistência específica e de tempo de filtração aumentaram com a oxidação, indicando que esses produtos não otimizaram o processo de desidratação. Marwell (2004), estudou se a pré-oxidação da água bruta favorecia a desidratação por centrífuga de lodo produzido no tratamento de água por flotação, em instalação piloto. O autor constatou que a pré-oxidação com dióxido de cloro acrescentou poucas vantagens ao processo, levando a um aumento pouco significativo de sólidos na torta.

Sobre sistemas naturais de desidratação, Cordeiro (1999b) comenta que esses sistemas são amplamente utilizados no mundo, mas poucas experiências têm sido registradas em estações de tratamento de água no Brasil. Segundo Achon e Cordeiro (2003), os leitos de secagem permitem remoções de água entre 75 e 85%. Contudo, para as lagoas de lodo foi verificado que não houve redução sensível no volume de lodo. Os ensaios foram realizados com lodo proveniente da descarga de fundo dos decantadores da ETA II de Rio Claro, em São Paulo.

3.3.4 - Disposição final

O tratamento de água gera resíduos que, por questões legais e ambientais, devem ser tratados. Contudo, o tratamento desses resíduos não deixará de formar um subproduto, ou resíduo final, que precisa ter uma forma de destinação adequada. Várias são as possibilidades de utilização ou disposição desses resíduos, e escolha da melhor alternativa disponível depende de critérios técnicos, financeiros, regulamentares, ambientais, e ainda da localização da estação e dos possíveis pontos de destino.

Embora a disposição dos resíduos em aterros sanitários seja a opção mais simples (desde que o resíduo atenda a eventuais exigências dos órgãos ambientais ou dos responsáveis pelo aterro), um uso produtivo tende a ser uma alternativa mais correta. Pesa contra essa alternativa o fato de ser geralmente mais cara, mas o valor agregado decorrente da proteção

ao meio ambiente é um benefício que deve ser considerado no processo de tomada de decisão.

Cabe lembrar novamente que o lançamento dos resíduos de tratamento diretamente nos corpos d'água não é mais permitido pela legislação, muito embora esse passivo ambiental seja uma realidade em inúmeras estações espalhadas por todo o país. Ressalta-se também que o lançamento dos resíduos do tratamento de água na rede coletora de esgotos, embora seja possível, deve ser avaliado em termos dos impactos na estação de tratamento de esgotos e em relação a aspectos hidráulicos da rede coletora.

Nesse sentido, Brink *et al.* (2005) avaliaram o desaguamento mecânico com filtro prensa de placas, em escala de bancada e piloto, do lodo de estações de tratamento de esgotos em conjunto com lodos de estação de tratamento de água. Os ensaios foram realizados com lodos da ETE-Barueri e da ETA-Guaráú, localizadas na região Metropolitana de São Paulo. Embora os testes de resistência específica tenham demonstrado uma menor eficiência no desaguamento conjunto desses lodos, essa tendência não foi verificada no filtro prensa de placas, constatando os autores que a alternativa em questão é tecnicamente viável.

Cabe ressaltar que, caso o lodo de uma ETA seja lançado na rede coletora o lodo passará por todas etapas do tratamento até a operação de desidratação, podendo afetar também as operações anteriores. Essa questão foi avaliada em estudos realizados por Carvalho e Di Bernardo (1999), onde foram simuladas em colunas de sedimentação as interferências desses lançamentos no desempenho dos decantadores primários e digestores de lodo, em ETEs. Os autores constataram que para o caso em questão não houve inibição no processo de digestão do lodo, nem prejuízos no desempenho dos decantadores primários.

Uma outra opção possível envolvendo a operação de estações de tratamento de esgoto, seria o uso planejado de lodos de alumínio para otimizar o tratamento físico-químico em ETEs. Silva e Brandão (2003) avaliaram a aplicação das tortas produzidas nas centrífugas das estações de tratamento de água ETA-Pipiripau e ETA-Descoberto como coagulante no polimento final (remoção de fósforo) de efluentes da ETE-Sul, comparando sua eficiência com o sulfato de alumínio. Embora os resultados para os testes com lodo da ETA-Descoberto tenham demonstrado uma baixa eficiência, o uso do lodo da ETA-Pipiripau

promoveu eficiências de remoção de fósforo similares ao da coagulação com sulfato de alumínio, mostrando-se uma alternativa viável. Todas estações citadas são localizadas no Distrito Federal.

A capacidade do uso de lodos de ETEs como insumos agrícolas tem sido confirmada nos últimos anos em diversos trabalhos, e recentemente sua aplicação vem sendo validada pelos órgãos ambientais. Machado *et al.* (2005) realizaram estudos sobre essa mesma aplicação, mas com lodos do tratamento de água. Os ensaios foram realizados com resíduos da ETA-Bolonha, situada na região metropolitana de Belém, onde o lodo é desaguado em leitos de secagem. Os autores concluíram que, embora a torta coletada tenha baixos valores de matéria orgânica e nutrientes em comparação à compostos orgânicos de lixo e de esterco bovino, suas propriedades eram melhores do que as do solo da região. Dessa forma, indicam o uso dos resíduos da ETA-Bolonha para recuperação de áreas degradadas, já que não foram verificadas concentrações de metais que possam ocasionar problemas de contaminação do solo. Esse destino é o mesmo adotado pela Caesb em algumas de suas estações de tratamento de água, onde as tortas produzidas pelas ETAs Descoberto e Pípiripau são destinadas à recuperação de cascalheiras desativadas.

Avaliando alternativas de uso produtivo que possam ser viáveis economicamente, vários autores têm estudado a aplicação desses lodos em usos relacionados à construção civil. Dessa forma, Hoppen *et al.* (2003) avaliaram a incorporação de lodo centrifugado na produção de concreto. Porras *et al.* (2005) estudaram a viabilidade da incorporação de lodos de decantadores em tijolos estabilizados com cimento, e Novaes *et al.* (2005) analisaram a possibilidade de incorporação desses mesmos lodos na fabricação de blocos cerâmicos. Em todos os casos, a incorporação do lodo levou a produtos com desempenho inferior aos tradicionais, sendo que no caso dos tijolos as normas da ABNT não foram sequer atendidas. O uso do lodo como insumo na produção de materiais da construção civil precisa, portanto, ser estudado mais a fundo. Além disso, embora sejam opções ambientalmente corretas, há de ser considerado que essas são alternativas cujos custos praticamente inibem sua adoção pelas companhias de saneamento.

Outros estudos têm sido realizados, e outras aplicações possíveis dos resíduos do tratamento são citadas por Tsuyta *et al.* (2001), como por exemplo para melhoria da sedimentabilidade em águas com baixa turbidez, para fabricação de cimento, cultivo de

grama comercial, plantação de cítricos, controle de sulfeto de hidrogênio em sistemas de esgotos, produção de solo comercial e para compostagem em conjunto com outros resíduos sólidos.

3.3.5 - Recirculação

Em estações de tratamento de ciclo completo, uma alternativa para reduzir as perdas e simplificar o processo de tratamento dos resíduos é efetuar a recirculação da água de lavagem de filtros. Tal procedimento é denominado recirculação, considerando-se como reciclo direto os casos em que não há nem tratamento nem equalização da água de lavagem. Considera-se recirculação também o retorno do clarificado de adensadores, tanto da água de lavagem de filtros, quanto do lodo de unidades de separação sólido-líquido por gravidade.

Nos Estados Unidos, a norma *Filter Backwash Recycling Rule* – FBRR (USEPA, 2002) traz recomendações e exigências para a recirculação desses resíduos. No Brasil, não há uma regulamentação específica para essa prática, embora a norma NBR-12.216 (ABNT, 1992) admita a reutilização da água de lavagem, desde que submetida a pré-sedimentação e cloração intensa. Essa recomendação, contudo, não tem sido observada pelas companhias de saneamento, sendo verificados casos com reciclo direto da água de lavagem – o que seria admitido por outras normas, como a FBRR.

Apesar da impressão inicial de que a recirculação poderia afetar o processo de tratamento de água, a dosagem de coagulante não necessita ser ajustada, caso a taxa de recirculação seja de até 10% (Kawamura, 2000). Dessa forma, para evitar impactos da recirculação na operação da ETA, a FBRR recomenda que o retorno se dê em taxas inferiores a esse valor, preferencialmente de forma contínua, sendo desejada ainda a implantação de reservatórios de equalização para um melhor controle do processo de recirculação.

No caso de reciclo da água de lavagem, não há a obrigatoriedade pela FBRR de tratamento do recirculado, embora a referida norma recomende que o recirculado seja submetido a um processo de separação de sólidos, por sedimentação, flotação ou filtração em membranas. Segundo Kawamura (2000), a meta do tratamento dos resíduos de ETAs deve ser a obtenção de um clarificado com qualidade igual ou superior à água bruta afluenta à

estação. Além disso, Di Bernardo *et al.* (1999a) recomendam que seja efetuado o descarte eventual da água de lavagem, uma vez que nem todas impurezas presentes no recirculado serão removidas nos clarificadores, evitando assim uma recirculação de contaminantes.

A vantagem de recircular a água de lavagem sem tratamento prévio não é simplesmente a economia na implantação e operação devido à ausência do processo de adensamento. Kawamura (2000), comenta que estudos têm demonstrado que a recirculação pode melhorar as condições de floculação e sedimentação. Saron e Silva (1997) demonstraram que a recirculação permitiu, no caso da recirculação da água de lavagem dos filtros da ETA-Guaraú, a redução na dosagem de coagulante, obtendo-se cerca de 10% de economia no consumo de sulfato de alumínio. Os autores explicam a melhoria no processo de floculação como resultado da adição dos flocos previamente formados, atuando como núcleos de formação adicionais, capazes de agregar partículas e impurezas.

Ainda assim, é importante ressaltar novamente os riscos envolvidos nessa prática, e pesquisadores como Cornwell e Macphee (2001) recomendam que sejam realizados estudos para um melhor entendimento do processo, comparando-se as situações com e sem reciclo, verificando os resultados quanto à possibilidade de recirculação de contaminantes. Nesse sentido, Edzwald e Tobiason (2001), realizando análise da recirculação da água de lavagem dos filtros em ETA que utiliza a flotação como alternativa para clarificação, não identificaram impactos nem na turbidez nem na remoção de *Cryptosporidium* nas etapas de flotação e filtração, comparando situações com e sem reciclo. O estudo foi em escala piloto, e a taxa de reciclo foi mantida em 10%.

Face ao risco de recirculação de patógenos, alguns autores recomendam a desinfecção do recirculado, geralmente efetuada por cloração (Kawamura, 2000). Caso a recirculação seja realizada em taxas entre 2 e 3%, e dependendo da qualidade microbiológica do recirculado, não deve haver riscos de formação de THMs devido à desinfecção (Kawamura, 2000). Além disso, a FBRR admite as vantagens da desinfecção para remoção de patógenos e até mesmo a possibilidade desse processo inativar os oocistos de *Cryptosporidium*, *Giardia* e ainda determinados tipos de vírus. Contudo, também alerta para os riscos da cloração levar a formação de THMs, tendo em vista a alta concentração de precursores e DQO quando o recirculado não é previamente tratado.

A recirculação do clarificado do processo de desidratação também é permitida pela FBRR, mas o retorno desses líquidos é desencorajado por Kawamura (2000), tendo em vista o significativo aumento de compostos indesejáveis na vazão afluyente à estação, trazendo inclusive riscos à saúde humana.

Uma exigência da FBRR é quanto ao ponto de retorno do recirculado: deve se dar antes da floculação, passando preferencialmente por todas etapas de tratamento. O objetivo dessa restrição é minimizar a possibilidade de recirculação de oocistos de *Cryptosporidium*, já que diversos estudos demonstraram que o processo de clarificação de água permite uma remoção de 2-log (99%) desses protozoários.

Conforme pode ser observado, o grande foco de preocupação é a possibilidade de acumulação de cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* no processo. Essa preocupação é justificada, tendo em vista relatos como os de Arora *et al.* (2001), onde foram citados registros de epidemia de criptosporidiose nos Estados Unidos e Inglaterra, todos associados ao sistema de abastecimento de água local, alguns dos quais com a recirculação da água de lavagem dos filtros sendo praticada.

Dessa forma, devido à relevância do assunto, é necessário que sejam desenvolvidos mais estudos sobre a recirculação, particularmente no caso do Brasil, tendo em vista as práticas operacionais diferenciadas e a ausência de regulamentação específica.

3.4 - EXPERIMENTOS REALIZADOS NA INSTALAÇÃO PILOTO DA ETA-BRASÍLIA

Segunda maior estação de tratamento de água do Distrito Federal, a ETA-Brasília vem apresentando problemas quanto a adequação de seu processo de tratamento, assim como em relação ao manejo de seus resíduos. Conforme será discutido no Item 4.1, a ETA-Brasília está passando por reformas, e com a proposta que está sendo implementada a ETA-Brasília passará a ser uma estação de tratamento completo por flotação a ar dissolvido, com aproveitamento da água de lavagem e dos lodos coletados nas unidades de flotação.

Lacerda (1997), em experimentos para otimizar parâmetros de flotação no tratamento de água com baixa turbidez e presença de algas, realizou adaptações na estação piloto da ETA-Brasília, aqui denominada ETA-Piloto, dotando-a de tanque de flotação e equipamentos para efetuar a recirculação e saturação de ar. Aproveitando essas instalações, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de estudar o processo de tratamento dos resíduos gerados pela ETA-Brasília.

Camelo e Marques (1998) avaliaram alternativas para melhoria do processo de tratamento de água utilizado na ETA-Brasília. Dentre seus objetivos, foi estudada a possibilidade da recuperação da água de lavagem dos filtros. Para tanto, testes preliminares, em escala de bancada, indicaram a maior adequabilidade da FAD frente à sedimentação para a clarificação da água de lavagem. Posteriormente, foram realizados experimentos em escala piloto para a avaliação da influência dos principais parâmetros operacionais da FAD, sobre a qualidade do clarificado com vistas a analisar a viabilidade de se efetuar a recirculação do clarificado.

Foram avaliados os seguintes parâmetros: razão de recirculação da flotação (6, 10, 15 e 17%), pressão de saturação (5 e 6 atm) e a taxa de aplicação (100 e 170 m/d). Os autores concluíram que a FAD mostrou-se uma alternativa adequada em termos de clarificação da água de lavagem, tendo, contudo, se mostrado dependente de um bom controle da etapa de coagulação no processo de tratamento e apresentado uma certa sensibilidade com relação a variações na qualidade da água de lavagem. Quanto aos parâmetros testados, não foram verificadas influências significativas devido às variações simuladas, embora os resultados com pressão de saturação de 6 atm e 10% de reciclo tenham sido levemente superiores aos demais. Cabe ressaltar que a possibilidade de condicionamento da água de lavagem não foi avaliada, e que o coagulante utilizado na época era o cloreto férrico.

Para avaliar a recirculação da água de lavagem, foram realizados ensaios em teste de jarros, misturando-se o clarificado da água de lavagem flotada na ETA-Piloto com água bruta, em razões de recirculação de 6, 10 e 20%. Segundo os autores, os resultados obtidos sugerem que a recirculação levou a resultados similares ao clarificado da própria ETA, sendo que a taxa de 20% foi a mais eficiente em termos de remoção de turbidez. Nesse trabalho, não foram avaliados aspectos de qualidade microbiológica.

Cordeiro *et al.* (2006) avaliaram a recirculação do clarificado produzido no adensamento da água de lavagem dos filtros da ETA-Brasília, a partir da caracterização do clarificado e dos sedimentos gerados no adensamento por flotação e por sedimentação. No adensamento, o teor de sólidos obtido por sedimentação foi substancialmente inferior ao da flotação. Enquanto a flotação permitia obter lodo com teor de sólidos acima de 2%, a sedimentação produzia lodo com apenas 0,7%, valor esse inferior ao necessário para proceder à desidratação por centrifuga. Outro fator destacado pelos autores é a baixa demanda de cloro no clarificado, indicando um baixo potencial de formação de THM, caso seja efetuada a desinfecção do recirculado. Contudo, os autores alertam para necessidade de maiores estudos sobre o assunto, tendo em vista as características microbiológicas do clarificado, já que em uma das amostras foi detectada a presença de cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium*.

Máximo (2003) realizou um estudo preliminar da tratabilidade dos lodos da ETA-Brasília, na configuração proposta para seu projeto de reforma e ampliação. O trabalho consistiu em ensaios em escala de bancada para estudar o processo de adensamento, comparando a sedimentação com a flotação. O autor realizou também avaliação do uso da centrifugação para desidratação do lodo gerado no flotador da ETA-Piloto, atuando como etapa de clarificação no tratamento de água. Na época, a ETA-Brasília já estava utilizando policloreto de alumínio (PAC) como coagulante.

Foram realizadas tentativas de se analisar a sedimentação a partir da velocidade de sedimentação da interface, verificada em coluna de sedimentação de 1 metro. Contudo, Máximo (2003) alega que não foi possível visualizar uma interface clara entre a massa de partículas em sedimentação e o líquido clarificado, devido à baixa concentração de sólidos em suspensão. Por esse fato, a análise da sedimentação baseou-se na análise da turbidez residual da água clarificada, por meio de ensaios de jarros, variando-se também a dosagem de polímero e comparando-se diferentes taxas. Análise semelhante foi realizada para flotação, em equipamento flota-teste.

Da comparação entre os dois processos, o autor concluiu que a flotação apresenta uma eficiência similar ou superior de remoção de turbidez, em relação à sedimentação. Além disso, enquanto o condicionamento (com polímero aniônico de baixa carga, dosagem de 0,5 mg/L) foi fundamental na melhoria das condições de sedimentação, na flotação a

remoção de turbidez foi bastante eficiente mesmo sem aplicação de polímero, atingindo índices de remoção de turbidez de até 96%

Os ensaios de desidratação em centrífuga foram realizados com lodo produzido pelo flotador da estação piloto, a partir da clarificação da água bruta. Foram testados diferentes polímeros, sendo que, dependendo proporção de mistura entre as águas aduzidas dos dois mananciais que alimentam a ETA-Brasília, os polímeros comportaram-se de maneira diferente, ora sendo mais efetiva a aplicação de polímero catiônico, ora aniônico. A concentração de sólidos obtida por Máximo (2003) na desidratação foi relativamente baixa, e essa deficiência na remoção de água do lodo produzido pela flotação foi confirmada em outros estudos.

Marwell (2004) estudou a desidratação por centrifugação do lodo produzido pelo flotador da ETA-Piloto, na clarificação de água. O autor comparou a utilização de sulfato de alumínio e do PAC como coagulante no tratamento de água, e seu impacto sobre as características do lodo flotado, avaliando também diferentes polímeros para condicionamento do lodo anteriormente à desidratação em centrífuga.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que o PAC é capaz de produzir um lodo mais denso na flotação, mas a desidratabilidade do lodo mostrou-se muito baixa, tanto em termos de resistência específica quanto pela análise da relação entre os sólidos na torta e os sólidos no lodo. Mesmo após efetuar correções, de forma a aproximar os resultados do desempenho de unidades em escala real, o teor de sólidos máximo possível de se alcançar, nas melhores condições de condicionamento, seria de cerca de 10%, valor muito abaixo do esperado ou mesmo de valores recomendados pela literatura quando para disposição no solo, onde seria desejado um teor de sólidos acima de 25%.

Avaliando o condicionamento para desidratação, a melhor situação encontrada tanto para o lodo flotado a partir da coagulação com sulfato quanto com PAC, foi com a utilização de polímero aniônico de alto peso molecular. As dosagens ótimas obtidas foram de 40 mg/L, equivalente a 1,84 g/kg de sólidos, para o lodo de PAC, e de 20 mg/L, ou 1,26 g/kg de sólidos, para o lodo de sulfato.

Comparando as características do lodo obtido com os de outras ETAs em operação pela Caesb, o autor verificou que o lodo da ETA-Brasília possui uma relação DQO/ST mais elevada que das ETAs Descoberto e Pipiripau. Contudo, diferentemente da centrifugação dos lodos da ETA-Brasília, nessas ETAs o processo de desidratação em centrífuga permite atingir teores de sólidos de até 30%. Segundo Marwell (2004), como a água tratada por essas unidades tem características predominantemente inorgânicas, é possível inferir que lodos que apresentam elevada quantidade de matéria orgânica em sua composição sejam mais difíceis de serem desidratados, como é o caso da ETA-Brasília.

A pouca desidratabilidade dos lodos da ETA-Brasília verificada por Marwell (2004) pode estar relacionada a interferências mencionadas anteriormente, tal como a presença de algas na água bruta, que emprestam características orgânicas ao lodo, ou a possibilidade dos lodos flotados reterem parte das microbolhas da flotação em sua estrutura, dificultando a etapa de desidratação (Schofield, 1997).

Dessa forma, para entender e identificar a origem dessa baixa eficiência, bem como complementar os estudos realizados sobre a ETA-Brasília, novas pesquisas devem ser realizadas, considerando outras alternativas de tratamento dos resíduos e investigando a fundo os processos de adensamento e desidratação previstos para essa estação.

4 - METODOLOGIA

Com o objetivo geral de estudar o adensamento e desidratação dos resíduos da ETA-Brasília, a metodologia experimental do presente trabalho buscou comparar a desidratação entre lodos produzidos pelo adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação e sedimentação, com o de outra estação de tratamento de água, abastecida por manancial com diferentes características.

O sistema de abastecimento do Distrito Federal, operado pela Caesb, é composto por nove estações de tratamento, sendo que as duas principais são as ETAs Descoberto e Brasília, responsáveis pelo atendimento de 85% da população da região, com uma vazão de aproximadamente 5.000 L/s. Conforme mostrado na Tabela 4.1, enquanto o lago Descoberto, com baixo teor de clorofila-*a*, abastece a ETA-Descoberto, o lago Santa Maria, de baixa turbidez mas com maior concentração de algas, abastece a ETA-Brasília. Apesar das diferenças nas características da água bruta dos dois mananciais, o processo de tratamento de ambas estações é por filtração direta, com aplicação de coagulantes à base de alumínio, sendo policloreto de alumínio no caso da ETA-Brasília e sulfato de alumínio na ETA-Descoberto.

Tabela 4.1 – Características da água bruta dos reservatórios que abastecem a ETA-Descoberto e a ETA-Brasília

Manancial	Fitoplâncton (org/mL)	Clorofila- <i>a</i> (µg/L)	Turbidez (UT)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	pH
Lago Descoberto	304	0,4	12,5	2,6	11,1	7,0
Lago Santa Maria	1.870	3,7	2,1	0,8	2,9	6,3

Legenda: SST (sólidos em suspensão totais); SDT (sólidos dissolvidos totais)

Conforme pode ser observado, o lago Descoberto tem como característica predominante a turbidez, enquanto o lago Santa Maria diferencia-se pela maior concentração de clorofila-*a*. Além disso, em estudos realizados por Marwell (2004), foram apresentados indicativos sobre o caráter inorgânico dos lodos da ETA-Descoberto (relação DQO/ST de 0,13), em contraste com o caráter orgânico dos lodos da ETA-Brasília (relação DQO/ST de 0,74). Dessa forma, devido às características de seu manancial e particularidades de seus resíduos, a desidratação de lodos produzidos com água de lavagem da ETA-Descoberto é tomada como referência para comparação com os resultados obtidos com a ETA-Brasília.

Nesse capítulo, inicialmente são descritas as ETAs Brasília, Descoberto e as instalações da ETA-Piloto. Em seguida, é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento da parte experimental.

4.1 - DESCRIÇÃO DA ETA-BRASÍLIA

A ETA-Brasília é uma importante unidade do sistema de abastecimento de água do Distrito Federal. Essa estação trata uma média de 1.500 L/s, abastecendo aproximadamente 400.000 habitantes, o equivalente a 17% da população do DF (Caesb, 2005). As localidades abastecidas pela ETA-Brasília são: Asa Sul, Asa Norte, Setor Sudoeste e Lago Norte. Além disso, complementa o abastecimento do Paranoá e Lago Sul.

Inaugurada em 1959, a ETA-Brasília já passou por diversas reformas, sendo que atualmente o processo de tratamento empregado é a filtração direta descendente, sem pré-floculação. A água de lavagem dos filtros não é reaproveitada, sendo lançada diretamente na rede de águas pluviais, tendo por destino o Lago Paranoá. Atualmente, essa ETA tem utilizado policloreto de alumínio (PAC) como coagulante.

Os mananciais utilizados, Torto e Santa Maria, estão inseridos no Parque Nacional de Brasília. Esses dois reservatórios possuem características distintas: enquanto o ribeirão do Torto tem sua captação realizada por meio de barragem de nível, um reservatório de 6 km² forma o lago Santa Maria, segunda maior reserva de água para abastecimento do Distrito Federal. Apesar de ambos mananciais estarem em área protegida e apresentarem água com baixa turbidez, o lago Santa Maria possui uma característica preocupante para tratamento por filtração direta: a ocorrência de florescimento sazonal de algas. Os valores médios de clorofila-a, nas águas do lago Santa Maria, variam de 2 a 15 µg/L, sendo que atualmente predominam os gêneros *Staurastrum* e *Cosmarium*.

As características das águas desse manancial são justamente as indicadas por diversos autores para tratamento pelo processo de flotação por ar dissolvido (Arora *et al.*, 1995; Schofield, 2001). Em função das dificuldades operacionais que vêm sendo enfrentadas, de estudos de tratabilidade favoráveis (Leme, 1996), além da crescente pressão por otimização de resultados de qualidade, minimização de impactos ambientais e redução de perdas no tratamento, foi prevista a obra de reforma e ampliação da ETA-Brasília. Essa

reforma incorpora às instalações existentes os processos de floculação e flotação a ar dissolvido, precedendo a filtração. Serão implantadas também as etapas necessárias para tratamento dos resíduos gerados na filtração e flotação. O fluxograma do processo de tratamento em fase de implantação é apresentado na Figura 4.1, e uma visão geral da ETA-Brasília pode ser visualizada na Figura 4.2.

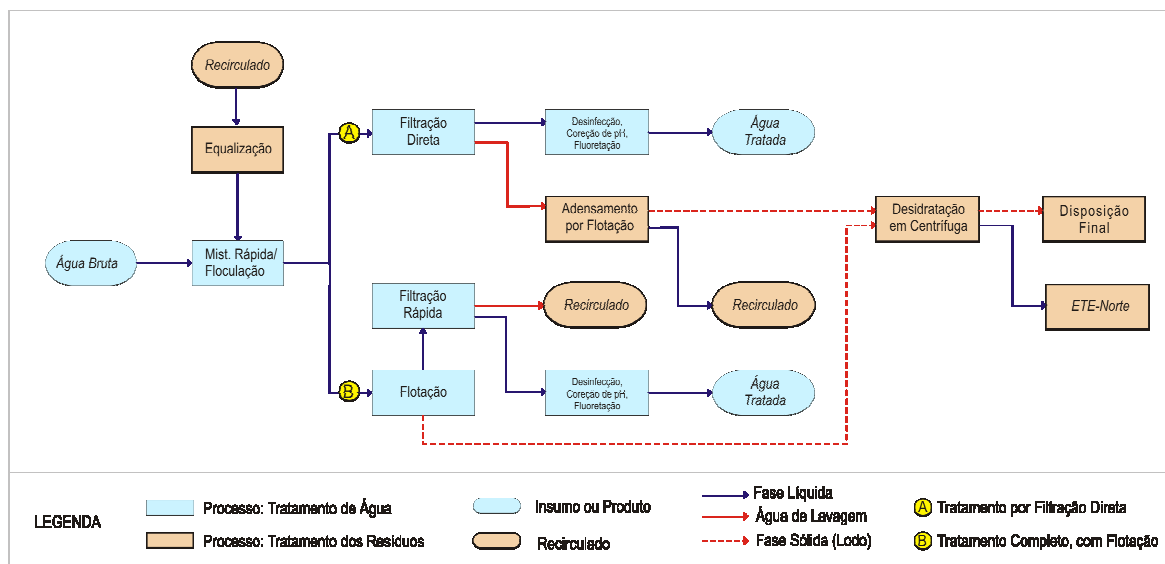


Figura 4.1 – Fluxograma de processo da ETA-Brasília, após obras de melhoria e ampliação

Do fluxograma apresentado na Figura 4.1, destaca-se a possibilidade de operar a ETA segundo duas alternativas, conforme a qualidade da água bruta:

- Por filtração direta: Nesse caso, a água de lavagem dos filtros é adensada por meio da flotação, com posterior recirculação do clarificado e o lodo formado sendo desidratado por centrífugas;
- Por tratamento completo: Nessa sequência, a água de lavagem dos filtros é equalizada e recirculada sem tratamento para a caixa de chegada de água bruta, com o lodo produzido no processo de flotação sendo direcionado diretamente para desidratação em centrífugas.

Quando estiver operando por filtração direta, a água de lavagem dos filtros da ETA-Brasília será adensada nas mesmas unidades de flotação utilizadas para clarificação da água bruta no tratamento de água. Para tanto, dois tanques de flotação (são oito no total) serão isolados para adensamento da água de lavagem. O lodo flotado é recalcado para o prédio de desidratação de lodo, onde serão instaladas as centrífugas. O clarificado será recirculado, tendo como ponto de retorno para o processo de tratamento a caixa de chegada de água bruta.

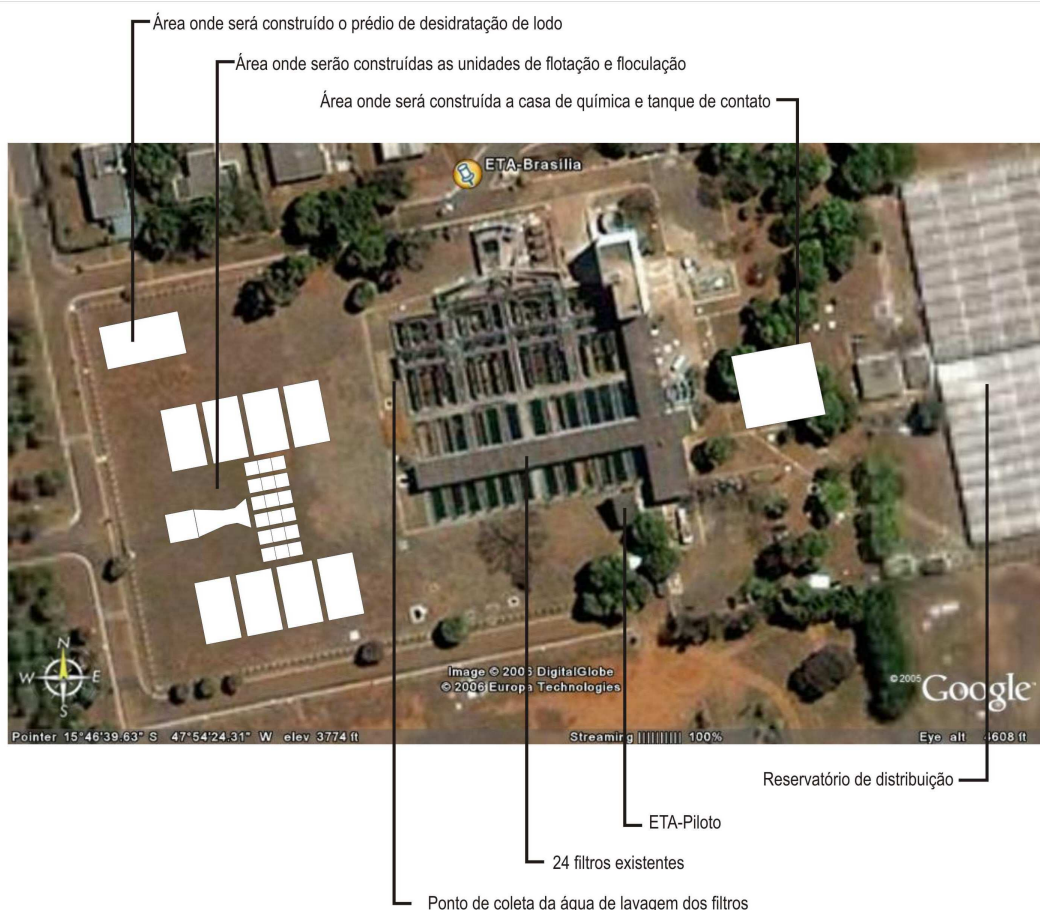


Figura 4.2 – Visão geral da ETA-Brasília, com indicação das principais edificações existentes e a serem implementadas na obra de reforma e ampliação (Google, 2006)

A torta obtida na desidratação deverá ter como destino final a disposição no solo, provavelmente para recuperação de áreas degradadas, sendo que a Caesb geralmente seleciona cascalheiras desativadas para tal finalidade.

A ETA-Brasília em sua configuração atual possui 24 filtros rápidos descendentes, cada um com 44 m² (taxa de filtração de 240 m/d), camada única de areia (espessura de 90 cm, D₁₀=2,1 mm, C.U.=1,4), e duração da carreira de filtração de aproximadamente 15 horas. A lavagem dos filtros é realizada inicialmente com aplicação de ar, durante 5 minutos, após o qual são acionadas as bombas de água para lavagem. As duas bombas, com capacidade total de 950 L/s, executam a lavagem do meio filtrante até que a água efluente se apresente visualmente limpa. Dessa forma, o tempo de lavagem com água varia conforme o filtro, a sensibilidade do operador e as condições da água bruta, oscilando entre 3 e 6 minutos, até atingir-se uma turbidez final na água de lavagem entre 4 e 15 UT, em média. Esse procedimento leva a formação de uma água de lavagem com características

bastante variáveis, sendo que nenhum tratamento é realizado: a água de lavagem escoar por galerias e canais de drenagem, tendo como destino atual o lago Paranoá.

4.2 - DESCRIÇÃO DA ETA-DESCOBERTO

A ETA-Descoberto é a principal estação de tratamento de água do sistema operado pela Caesb, tratando uma vazão média de 3.800 L/s. Abastece grande parte da população do DF, aproximadamente 1.400.000 habitantes, 66% do total (Caesb, 2005). As localidades abastecidas pela ETA-Descoberto são: Ceilândia, Taguatinga, Samambaia, Riacho Fundo, Recanto das Emas, Samambaia, Guará, Candangolândia e Gama, podendo ainda complementar o sistema distribuidor Torto/Santa Maria.

Inaugurada em 1986, a ETA-Descoberto passou por extensiva reforma finalizada em 1996. Atualmente, opera por filtração direta descendente, com pré-floculação, e seu único manancial é o lago Descoberto. A ETA-Descoberto utiliza sulfato de alumínio como coagulante, sendo que em determinadas épocas do ano pode vir a utilizar policloreto de alumínio ou proceder à aplicação de polímero como auxiliar de coagulação.

A ETA-Descoberto é um caso de excelente desempenho de desidratação em centrífuga. Os resultados obtidos na desidratação dos lodos dessa estação foram reportados por Barbosa (1997), tendo sido referenciados em diversos trabalhos.

A ETA-Descoberto possui 14 filtros rápidos descendentes, de 100 m² cada (taxa de filtração de 380 m/d), com camada única de areia (espessura de 120 cm, D₁₀ entre 1,2 e 1,3 mm, C.U.=1,25), e duração da carreira de aproximadamente 24 horas. Quando a turbidez da água filtrada de determinado filtro atinge 1 UT, é iniciado automaticamente o procedimento de lavagem. A lavagem de cada filtro é realizada inicialmente com aplicação de ar, durante 5 minutos, após o qual inicia-se a lavagem, até que a turbidez da água de lavagem atinja o valor de 5 UT, geralmente após 5 minutos. Um reservatório com volume de 1.000 m³ garante o volume necessário para efetuar a lavagem das duas câmaras que compõem cada filtro. A água de lavagem dos filtros é reutilizada, recirculando-se o clarificado do processo de adensamento. Uma visão geral da ETA-Descoberto é apresentada na Figura 4.3, com o fluxograma do processo sendo apresentado na Figura 4.4.

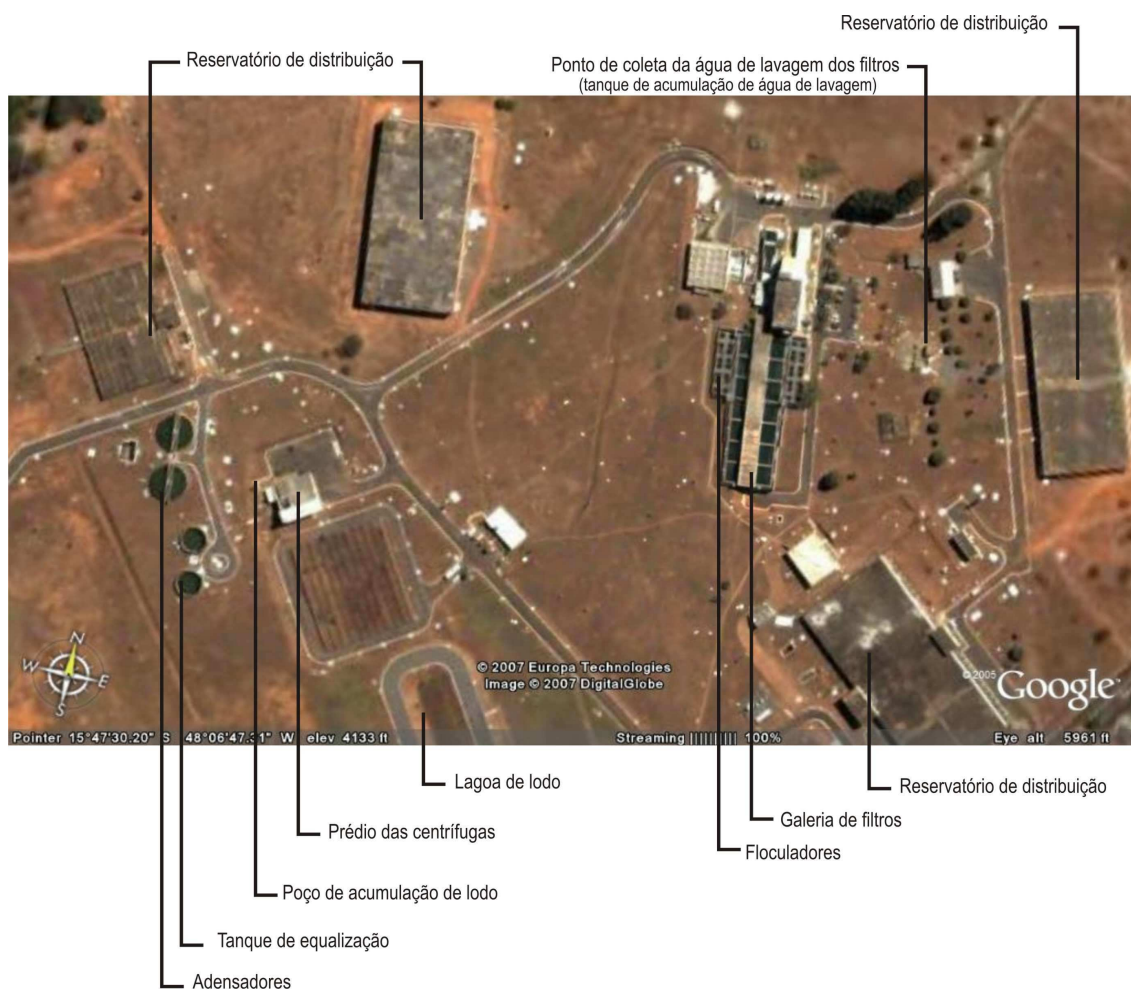


Figura 4.3 – Visão geral da ETA-Descoberto (Google, 2006)

A água de lavagem é coletada e segue para um reservatório, o tanque de acumulação de água de lavagem, sendo então recalçada para dois adensadores circulares, onde o adensamento por sedimentação ocorre a uma taxa de aplicação de 40 m/d, com aplicação de polímero aniônico. O clarificado é recolhido e acumulado em dois tanques de equalização, sendo recirculado a uma taxa não superior a 5% da vazão de água bruta.

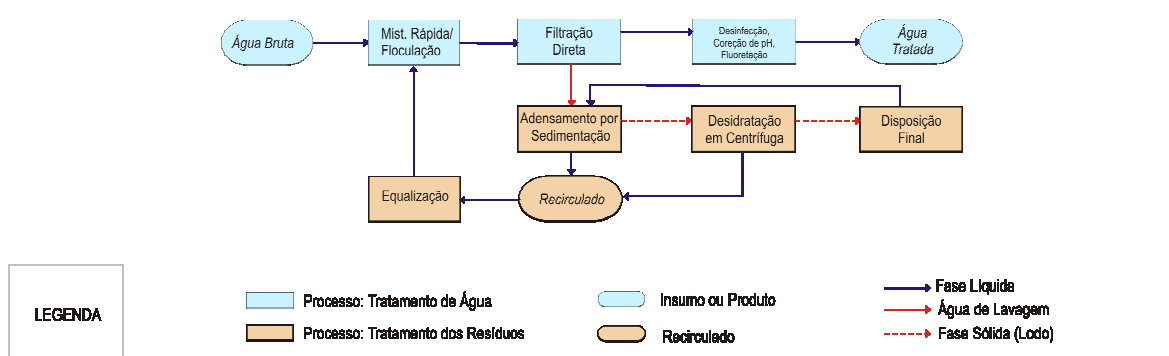


Figura 4.4 – Fluxograma de processo da ETA-Descoberto

O lodo sedimentado é descarregado para dois poços de acumulação de lodo, sendo pré-condicionado em linha, com polímero aniônico, e desidratado em duas centrífugas, com capacidades de 26 m³/h (ver Figura 4.5) e de 8,5 m³/h. A torta obtida na desidratação é destinada a recuperação de cascalheira desativada localizada na Região Administrativa de Ceilândia. Caso haja algum problema na unidade de desidratação de lodo, o lodo decantado pode ser descarregado para uma lagoa de lodo, situado próxima aos adensadores.



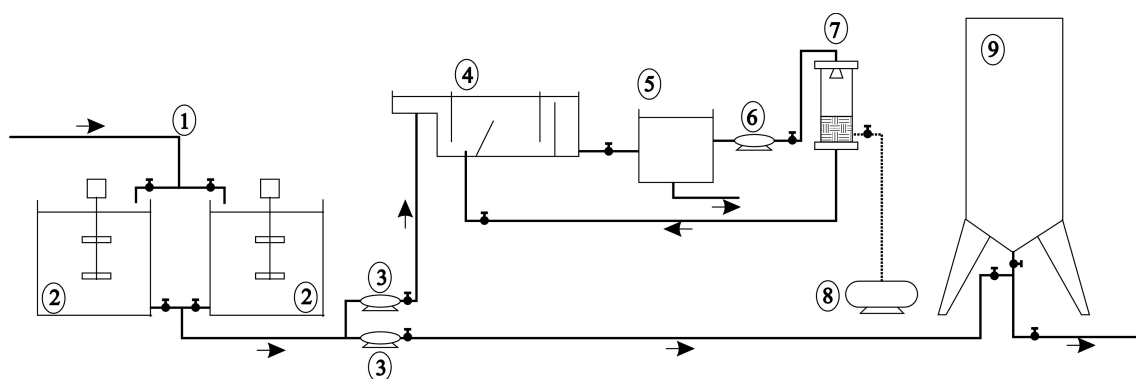
Figura 4.5 – Centrífuga da unidade de desidratação de lodo da ETA-Descoberto

4.3 - DESCRIÇÃO DA ETA-PILOTO

A estação piloto da ETA-Brasília foi concebida inicialmente para realização de estudos de tratabilidade pelo processo de tratamento convencional, tendo sido adaptada por Lacerda (1997) para simular as alternativas possíveis de tratamento da futura ETA-Brasília, ou seja, por filtração direta ou pela flotação seguida de filtração.

Para o presente trabalho, novas intervenções na estrutura da instalação piloto foram realizadas, com o objetivo de possibilitar o estudo do adensamento da água de lavagem dos filtros da ETA-Brasília, pelos processos de flotação e sedimentação. Dessa forma, foram instalados um sistema de coleta de água de lavagem, dois tanques de acumulação de água de lavagem, e uma coluna de sedimentação. O esquema da estação piloto adaptada para o presente trabalho é apresentado na Figura 4.6, sendo que na Figura 4.7 pode ser visualizada uma imagem dessa unidade, já com os tanques de acumulação e a coluna de sedimentação

instalados. Apesar das intervenções realizadas, as unidades e equipamentos originais foram mantidas, tais como câmaras de floculação e filtros rápidos.



1 - Entrada de água de lavagem	4 - Unidade de flotação	7 - Coluna de saturação
2 - Tanques de acumulação	5 - Coleta do clarificado	8 - Compressor de ar
3 - Bombas de recalque	6 - Bomba de recirculação	9 - Coluna de sedimentação

Figura 4.6 – Representação esquemática da instalação piloto da ETA-Brasília, adaptada para o presente trabalho



Figura 4.7 – Estação piloto da ETA-Brasília: (A) Chegada de água de lavagem; (B) Tanques de acumulação de água de lavagem; (C) Tanque de flotação; (D) Coluna de sedimentação;

O sistema de recalque da água de lavagem implementado foi baseado em experimentos anteriores, desenvolvidos por Camelo e Marques (1998). Foi instalada uma bomba em uma caixa de passagem da água de lavagem, para alimentação dos tanques de armazenamento da ETA-Piloto. Com esse sistema é possível, durante uma única lavagem, abastecer um dos tanques de 3.000 L, após bombeamento constante por aproximadamente 10 minutos – tempo durante o qual há escoamento na caixa de passagem.

A água coletada nos tanques de armazenamento constitui então uma amostra composta da lavagem dos filtros, em volume suficiente para preenchimento da coluna de sedimentação ou para execução do ensaio de flotação. Para evitar que ocorra sedimentação no tanque de armazenamento, e ainda para homogeneizar a amostra, foram instalados misturadores de hélice em ambos os tanques.

É possível também operar a ETA-Piloto para adensamento de outros efluentes além dos coletados na ETA-Brasília. Para tanto, basta transportar a amostra desejada em caminhões pipa, abastecendo então os tanques de acumulação. Esse procedimento foi realizado para coleta da água de lavagem da ETA-Descoberto, sendo que a coleta foi efetuada no tanque de acumulação de água de lavagem, conforme indicado anteriormente na Figura 4.3.

O sistema de flotação instalado na ETA-Piloto, idealizado e descrito detalhadamente por Lacerda (1997), consiste de: bomba de recirculação, com controle da vazão recirculada; sistema de saturação de ar com elementos de recheio, com possibilidade de controle da pressão de saturação; e tanque de flotação com área superficial de 0,26 m² (85 x 30 cm). Como dispositivo de redução de pressão foi utilizada uma válvula agulha, colocada entre o anteparo de entrada e a placa defletora, com inclinação de 60°. As dimensões, formas e equipamentos utilizados seguiram as recomendações da literatura, em parte já apresentadas no Item 3.1.1. O tanque de flotação e a coluna de saturação podem ser visualizados na Figura 4.8, e uma seção do tanque de flotação é apresentada na Figura 4.9.

Nos experimentos de flotação, a taxa de aplicação superficial pode ser controlada no registro de saída da bomba. A bomba de recalque instalada tem capacidade de até 0,6 L/s, suficiente para realização de estudos com as taxas de aplicação superficial previstas no projeto da ETA-Brasília. O sistema de recirculação permite selecionar diferentes razões de reciclo, e a pressão de saturação pode ser alterada no sistema de saturação de ar. No tanque de flotação, o lodo é removido manualmente, com pás, devendo-se tomar cuidado para que não haja um carregamento excessivo de água juntamente com o lodo.

A coluna de sedimentação foi confeccionada em oficina da Caesb (Figura 4.10), tendo sido dimensionada conforme as recomendações apresentadas no Item 3.1. Dessa forma, a coluna apresenta altura próxima às adotadas no projeto de decantadores, de 3 metros, e largura de 80 cm. Tomadas de amostragem foram instaladas a cada 50 cm, com

prolongamento de 5 cm para o interior da coluna, de forma a evitar interferências devido ao chamado “efeito parede”.



Figura 4.8 – Tanque de flotação e coluna de saturação de ar da ETA-Piloto

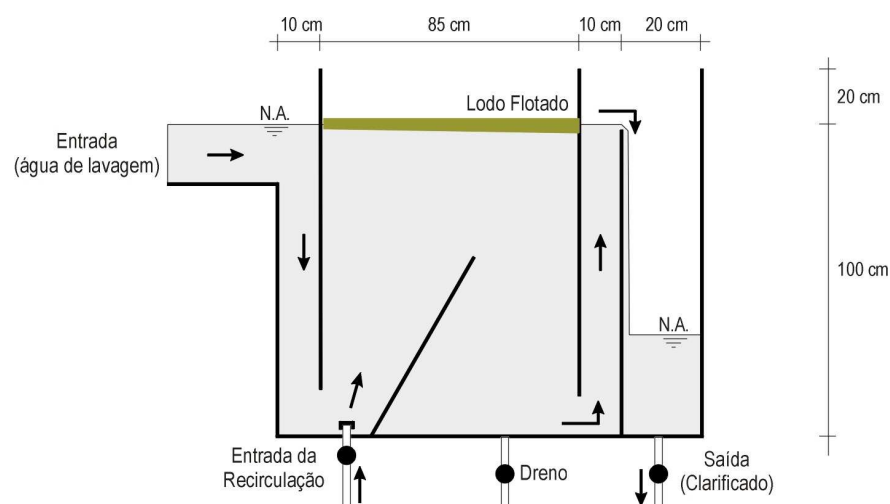


Figura 4.9 – Seção do tanque de flotação da ETA-Piloto (sem escala)

A turbulência formada durante o enchimento permite a homogeneização da água de lavagem no interior da coluna. A bomba instalada permite o enchimento da coluna em 10 minutos.

Para permitir que as descargas para coleta do lodo ocorram sem a indesejada mistura com o clarificado, o fundo da coluna foi confeccionado em forma de cone invertido, com inclinação de 45° , e tubulação de descarga de 50 mm em sua extremidade inferior. Visores em acrílico foram instalados na coluna, para possibilitar visualização do lodo sedimentado e auxiliar no procedimento de descarga.

Embora não tenha sido possível confeccionar a coluna com sistemas de controle de temperatura conforme recomendado pela literatura, a coluna de sedimentação foi instalada

em local protegido do sol, e eventuais gradientes de temperatura foram verificados por meio de termômetros com sensores distribuídos no interior da coluna.

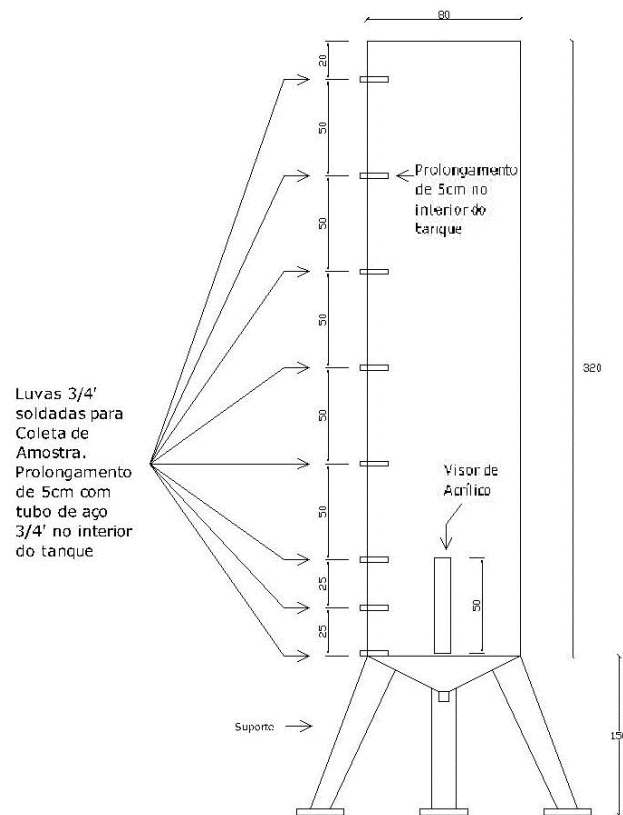


Figura 4.10 – Coluna de sedimentação instalada na estação piloto da ETA-Brasília

4.4 - DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS

A investigação experimental pode ser dividida em três etapas, sendo a primeira de estudos preliminares de adensamento e desidratação, e a segunda voltada para obtenção de resultados que permitissem avaliar a influência das microbolhas e ar e da presença de algas na desidratação por centrifuga. Uma terceira etapa foi necessária, com experimentos complementares de desidratação por filtração forçada e um único experimento prospectivo de condicionamento térmico. A Figura 4.11 ilustra a organização da investigação experimental segundo as três etapas descritas, indicando também os objetivos de cada fase ou análise.

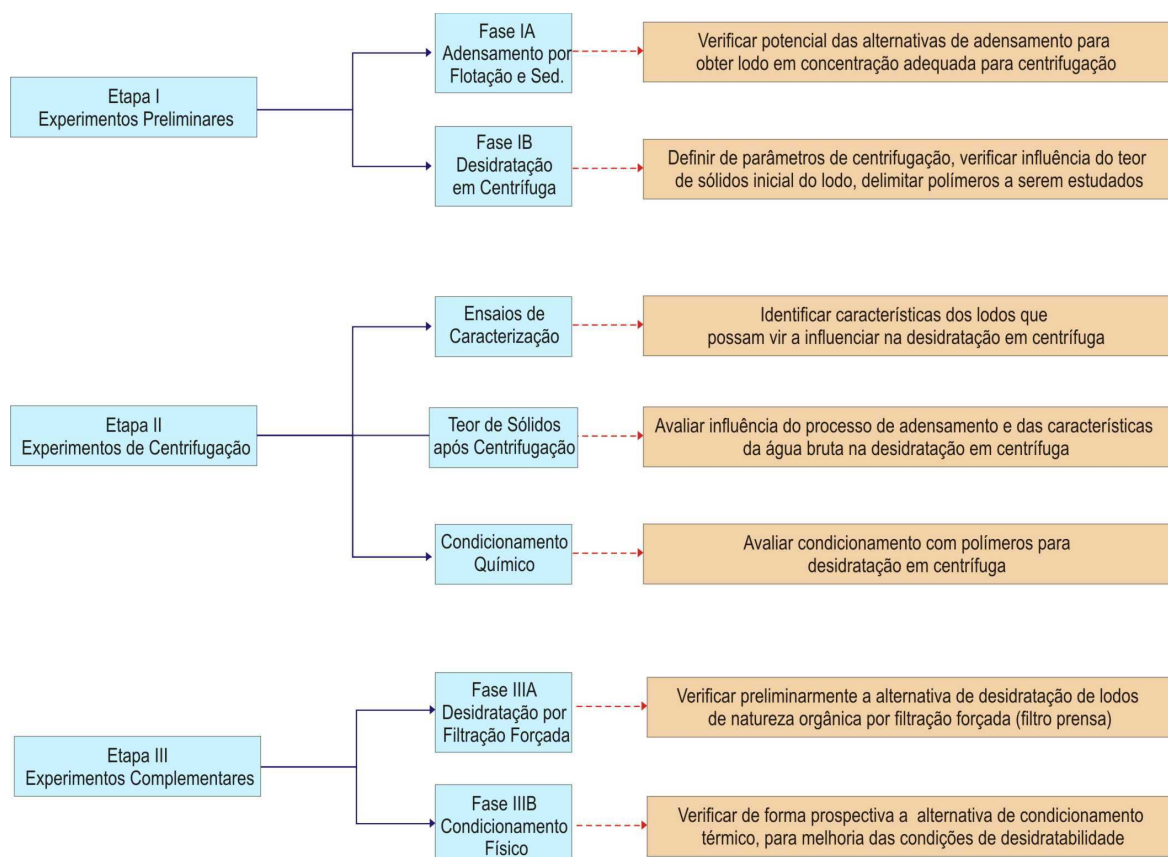


Figura 4.11 – Organização da investigação experimental em etapas

A Etapa I – Experimentos Preliminares, foi subdividida duas fases. Na primeira fase foram investigados aspectos do adensamento, principalmente em relação a estabelecer condições adequadas para centrifugação. A segunda fase foi voltada para estudos preliminares de desidratação em centrífuga, onde foram fixados os parâmetros de centrifugação (G^* e o tempo de centrifugação), definidos os tipos de polímero que seriam utilizados na etapa seguinte, e também avaliada a influência do teor de sólidos inicial do lodo no potencial de desidratação.

A Etapa II – Experimentos de Centrifugação, envolveu a realização dos experimentos de desidratação em centrífuga do lodo obtido no adensamento da água de lavagem das ETAs Brasília e Descoberto, por flotação e por sedimentação. O objetivo principal dessa etapa foi identificar e confirmar a origem da baixa capacidade de remoção de água dos lodos da ETA-Brasília, a partir da comparação entre a desidratabilidade de lodos com diferentes características. Foram avaliados, em especial, a influência do processo de adensamento, com foco no processo de flotação, e das características da água bruta.

Para orientar a discussão a respeito das possíveis alternativas para melhorar o processo de desidratação dos lodos da ETA-Brasília, foram realizados estudos preliminares de desidratação por filtração forçada e um experimento prospectivo de condicionamento do lodo adensado por congelamento e descongelamento, tendo em vista os indicativos da adequação desses processos para tratamento de lodos com baixa desidratabilidade. Esses experimentos constituíram a Etapa III – Experimentos Complementares.

Os métodos de análise adotados para caracterização dos objetos em estudo, e seus equipamentos correspondentes, são apresentados na Tabela 4.2. As rotinas analíticas utilizadas seguiram as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WPCF, 1999), exceto com relação aos parâmetros DQO e clorofila-*a*.

Os experimentos de adensamento foram desenvolvidos em instalação piloto, localizada na ETA-Brasília; e os ensaios de desidratação e principais análises laboratoriais no Laboratório de Análise da Água do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB – LAA.

Tabela 4.2 – Métodos e equipamentos utilizados nas determinações analíticas

Parâmetro	Método; Equipamento
Turbidez	Nefelométrico; Turbidímetro nefelométrico portátil – marca Hach, modelo 2.100 P
pH	Potenciométrico; pHmetro portátil – marca Orion, modelo 310
DQO	Digestão com dicromato de potássio; Espectofotômetro
Contagem de Algas	Câmaras de sedimentação; Microscópio invertido
Clorofila- <i>a</i>	Método de acetona 90%; Espectofotômetro
Resistência Específica	Metodologia baseada no ensaio de tempo de filtração; Bomba de vácuo, suporte de filtração
Sólidos Totais	Gravimétrico; Balança analítica, estufa
Sólidos em Suspensão	Gravimétrico; Balança analítica, bomba de vácuo, suporte de filtração, estufa
Sólidos Volatéis	Gravimétrico; Balança analítica, mufla
Sólidos Sedimentáveis	Gravimétrico; Cone Imhoff

4.4.1 - Fase IA – Ensaios preliminares de adensamento

O principal objetivo dessa fase foi investigar o potencial dos processos de flotação e sedimentação para adensamento das águas de lavagem das ETAs Brasília e Descoberto. Para tanto, era necessário verificar se em cada situação analisada seria possível produzir lodo adensado com aproximadamente 2% de teor de sólidos, valor esse correspondente à mínima concentração indicada para desidratação em centrífuga. A princípio, deveriam ser identificadas as taxas de aplicação, tanto para sedimentação quanto para flotação, capazes de produzir lodos com características similares em termos de concentrações de sólidos preferencialmente, de forma a minimizar a influência do teor de sólidos inicial do lodo no processo de desidratação.

Uma diretriz foi observada na definição da metodologia para os experimentos realizados durante as operações de adensamento: a não aplicação de polímero no adensamento, de forma a evitar possíveis interferências nas propriedades do lodo nas operações seguintes de condicionamento e desidratação.

4.4.1.1 - Adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação

Os parâmetros de adensamento por flotação foram fixados de acordo com os previstos pelo projeto de reforma e ampliação da ETA-Brasília, a saber:

- Taxa de aplicação superficial: 110 m/d (equivalente, na ETA-Piloto, a uma vazão de 0,31 L/s);
- Taxa de recirculação: 17% (0,06 L/s);
- Pressão de saturação: 5 atm;
- Relação A/S: 0,06 g de ar / g de SST.

Para definição do momento da coleta de lodo, foi efetuada análise da evolução do teor de sólidos da espuma, para permitir a definição do tempo necessário para se efetuar a coleta, ou seja, o tempo para se atingir uma concentração de sólidos acima de 2%.

Para caracterizar o efluente clarificado, foram coletadas amostras compostas ao longo de cada experimento. Já para a água de lavagem, foram coletadas amostras diretamente do tanque de acumulação da ETA-Piloto.

Para incorporar os efeitos da grande variabilidade de qualidade a que estão sujeitas as águas de lavagem dos filtros, os experimentos foram repetidos 5 vezes, permitindo assim uma aproximação do comportamento médio do adensamento do lodo em questão.

4.4.1.2 - Adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por flotação

Devido à dificuldade na coleta e transporte da água de lavagem da ETA-Descoberto para realização dos experimentos na ETA-Piloto, nessa etapa foi realizado um único experimento de adensamento por flotação. Os parâmetros operacionais foram os mesmos utilizados no adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, assim como os procedimentos de coleta.

A simplificação nos experimentos de adensamento com água de lavagem da ETA-Descoberto decorrem do fato de seu papel no presente trabalho, como uma referência para os resultados obtidos com a água de lavagem da ETA-Brasília.

4.4.1.3 - Adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por sedimentação

Nos experimentos de adensamento com água de lavagem da ETA-Brasília, por sedimentação, foi adotada a mesma metodologia sugerida por Cordeiro *et al.* (2006), de forma a simular o funcionamento dos adensadores da ETA-Descoberto, onde são realizadas descargas após adensamento do volume correspondente à coleta do efluente de 6 operações de lavagem dos filtros.

Dessa forma, o lodo sedimentado presente no fundo da coluna de sedimentação era mantido a cada descarga do clarificado, quando então se efetuava o enchimento da coluna com nova coleta de água de lavagem. Esse procedimento foi repetido entre 4 a 7 vezes, com o objetivo de melhorar as condições de adensamento. Os valores de V_s empregados oscilaram em torno de 2 m/d.

Assim como no caso do adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação, esses experimentos foram repetidos 5 vezes, visando aproximar o comportamento médio do adensamento.

4.4.1.4 - Adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por sedimentação

Não foram realizados experimentos para adensamento por sedimentação da água de lavagem da ETA-Descoberto. Devido às complicações envolvidas na coleta e transporte das amostras até a ETA-Piloto, e o papel referencial dos experimentos realizados com água de lavagem da ETA-Descoberto, optou-se por utilizar nos experimentos de desidratação o próprio lodo gerado nos adensadores da ETA-Descoberto. Além da facilidade na execução dos experimentos, a coleta do lodo diretamente dos adensadores da ETA-Descoberto permitiu comparar, de uma forma mais representativa, o desempenho da centrífuga de laboratório em relação ao equipamento em escala real.

Para avaliar o desempenho do adensamento por sedimentação da água de lavagem da ETA-Descoberto, nessa etapa foram levantados dados dos boletins operacionais da própria ETA, em termos da caracterização da água de lavagem, do lodo adensado, e do clarificado do adensamento.

Cabe lembrar que o adensamento do lodo na ETA-Descoberto é realizado com pré-condicionamento, com o mesmo polímero utilizado na desidratação (aniônico). Embora tenha sido comentado que nos experimentos realizados não seriam aplicados polímeros como forma de otimizar o adensamento, os riscos de eventuais interferências decorrentes do pré-condicionamento foram assumidos. Conforme será visto adiante, os resultados obtidos sugerem que não houve influência do pré-condicionamento da desidratação dos lodos.

4.4.1.5 - Ensaios de caracterização

Por se tratarem de experimentos iniciais, na Fase IA foram monitoradas apenas as características relacionadas na Tabela 4.3, suficientes para atender os objetivos estabelecidos. Os dados referentes à água bruta foram registrados para eventuais consultas, a partir dos boletins e relatórios de controle operacional de cada ETA. Além disso, foram registrados também alguns dados operacionais do tratamento, como, por exemplo, dosagem aplicada de coagulante.

Tabela 4.3 – Ensaios de caracterização realizados na Fase IA

Parâmetro	Laboratório	Água de Lavagem	Clarificado do Adensamento	Lodo Adensado
Turbidez	ETA	x	x	
Sólidos Totais	LAA			x
Sólidos em Suspensão Totais	LAA	x	x	
Legenda	ETA LAA	Laboratório operacional da ETA-Brasília Laboratório de Análise da Água do Depto Eng. Civil e Ambiental da Universidade de Brasília - UnB		

4.4.2 - Fase IB – Ensaios preliminares de desidratação em centrífuga

4.4.2.1 - Metodologia geral utilizada nos experimentos de desidratação em centrífuga

Os experimentos de centrifugação seguiram a seguinte rotina:

- Coleta da água de lavagem;
- Adensamento da água de lavagem na ETA-Piloto e/ou coleta do lodo a ser desidratado;
- Homogeneização da amostra coletada;
- Determinação da concentração de sólidos totais do lodo e, para algumas amostras, da concentração de sólidos voláteis;
- Distribuição de amostras de lodo em tubos de centrifugação com 40 mL de lodo em cada tubo;
- Aplicação de polímero em dosagens variadas (preferencialmente entre 0 e 5 mL);
- Agitação rápida por 30 segundos, para mistura, seguida de agitação lenta por 1 minuto, para floculação;
- Desidratação em centrífuga (Jouan, modelo CR 3-22);
- Leitura do volume do clarificado, com auxílio de uma proveta graduada de 50 mL;
- Estimativa, por balanço de massa, do teor de sólidos do sedimento (torta) acumulado no fundo de cada tubo de centrifugação utilizado.

Para preparação dos polímeros, foram seguidas as recomendações do fabricante para forma sólida, inicialmente em solução a 0,2 %, e posteriormente a 0,1%, para facilitar a operação

de mistura com o lodo. Após preparada, a solução era utilizada em um período não superior a 48 horas.

É importante comentar que outros trabalhos têm adotado a metodologia de deixar a solução preparada repousar por 24 horas antes da utilização (Zhao, 2002; Zhao *et al.*, 2002). Contudo, embora pertinente, esse procedimento não foi adotados no presente trabalho, tendo sido adotada a metodologia de preparação e utilização fornecida pelo fabricante.

4.4.2.2 - Definição dos parâmetros de centrifugação e avaliação da influência da concentração de sólidos inicial do lodo

Para definir os parâmetros de centrifugação (tempo de centrifugação e intensidade da força de centrifugação G^*), e também avaliar a influência da concentração de sólidos inicial do lodo no desempenho da desidratação em centrífuga, foram realizados ensaios específicos de desidratação.

Nesses ensaios, a água de lavagem dos filtros da ETA-Brasília foi submetida ao adensamento pelo processo de flotação, sendo coletadas amostras de lodo em diferentes tempos de operação (15, 30 e 90 minutos). Dessa forma, foi possível obter lodos com concentrações de sólidos distintas.

Esses lodos foram submetidos a ensaios de centrifugação sob diferentes valores de G^* (1.000, 2.500 e 2.850 g), e também a diferentes tempos de centrifugação (15, 30, 50, 80 e 100 minutos). Os ensaios de centrifugação seguiram a rotina descrita no Item 4.4.2.1, exceto pelo fato de que não foi realizado condicionamento das amostras. A partir dos dados obtidos, foram elaborados gráficos de “ G^* versus Teor de Sólidos Totais” e “Tempo de Centrifugação versus Teor de Sólidos Totais”.

Esses experimentos foram realizados exclusivamente para a desidratação do lodo obtido no adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação, uma vez que esse é o principal objeto de estudo do presente trabalho.

4.4.2.3 - Definição dos tipos de polímero a serem utilizados na Etapa II

Foram solicitadas a alguns fabricantes amostras de polímeros de diferentes cargas iônicas, com pesos moleculares preferencialmente altos. Tendo em vista a proposta de se avaliar o condicionamento com polímeros, optou-se por escolher um tipo de polímero de cada carga iônica, dentre os polímeros disponíveis. Para tanto, foram realizados experimentos de desidratação em centrífuga, tendo sido selecionados, para cada carga iônica, os polímeros de melhor desempenho em termos da concentração de sólidos na torta.

Os ensaios de centrifugação seguiram a rotina proposta no Item 4.4.2.1, utilizando os parâmetros G^* e tempo de centrifugação selecionados com base nos experimentos descritos no Item 4.4.2.2.

4.4.2.4 - Ensaios de caracterização

Para atender os objetivos da Fase IB, foram suficientes as análises físicas apresentadas na Tabela 4.4. Assim como na Fase IA, os dados referentes à água bruta também foram monitorados.

Tabela 4.4 – Ensaios de caracterização realizados na Fase IB

Parâmetro	Laboratório	Água de Lavagem	Lodo do Adensado	Clarificado do Adensamento	Torta da Centrifugação
Turbidez	ETA	x		x	
Resistência Específica	LAA		x		
Sólidos Totais	LAA		x		x
Sólidos em Suspensão	LAA	x		x	
Legenda	ETA	Laboratório operacional da ETA-Brasília			
	LAA	Laboratório de Análise da Água do Depto Eng. Civil e Ambiental da Universidade de Brasília - UnB			

4.5 - ETAPA II – EXPERIMENTOS DE CENTRIFUGAÇÃO

Para avaliar a influência do processo de adensamento por flotação e das características da água bruta na desidratabilidade dos lodos, foram realizados experimentos de desidratação em centrífuga, com lodos adensados tanto por flotação quanto por sedimentação, utilizando-se águas de lavagem oriundas das ETAs Brasília e Descoberto. É importante lembrar que essas estações tratam águas brutas com características distintas, sendo que na primeira predomina a presença de algas (*clorofila-a*) e, na segunda, a turbidez, conforme apresentado anteriormente na Tabela 4.1. Cada experimento foi repetido 5 vezes, de forma a aproximar o comportamento médio da desidratação de cada lodo.

Os parâmetros de adensamento e de desidratação foram definidos a partir dos experimentos da Etapa I, assim como os procedimentos para coleta de amostras, de operação da ETA-Piloto, de condicionamento das amostras, e para realização dos ensaios de centrifugação. Algumas dessas informações são resumidas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Detalhamento dos experimentos da Etapa II

Adensamento	Flotação	Taxa de aplicação: 110 m/d Taxa de recirculação: 17% Pressão de saturação: 5 atm Tempo de flotação: 2 horas
	Sedimentação	Coletas de água de lavagem, por experimento: 2 Vs: 2 m/d
Desidratação	Condicionamento	Polímeros aniônico, não-iônico e catiônico
	Centrifugação	G*: 2.500 g Tempo de centrifugação: 50 minutos

Os experimentos realizados nessa etapa permitiram realizar as comparações propostas na Tabela 4.6. No período de realização dos experimentos, a ETA-Brasília operava com água bruta captada exclusivamente no lago Santa Maria.

Tabela 4.6 – Comparações realizadas a partir de experimentos de desidratação com lodos provenientes dos processos por flotação e por sedimentação, atuando no adensamento de águas de lavagem com diferentes características predominantes

Processo de Adensamento (<i>Característica Predominante</i>)	Objetivo da Comparação
Flotação (<i>turbidez</i>) x Sedimentação (<i>turbidez</i>)	Avaliar a influência do processo de adensamento
Flotação (<i>clorofila-a</i>) x Sedimentação (<i>clorofila-a</i>)	
Sedimentação (<i>clorofila-a</i>) x Sedimentação (<i>turbidez</i>)	Avaliar a influência das características da água bruta
Flotação (<i>turbidez</i>) x Flotação (<i>clorofila-a</i>)	

Como os diferentes experimentos foram realizados para três tipos de polímeros, foi possível também avaliar a alternativa de condicionamento com polímeros para desidratação dos lodos estudados.

4.5.1.1 - Ensaio de caracterização

Para atender os objetivos da Etapa II, foram levantados os dados de água bruta e realizadas as análises indicadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Ensaio de caracterização realizados na Etapa II

Parâmetro	Laboratório	Água Bruta	Água de Lavagem	Lodo do Adensador	Clarificado do Adensamento	Torta da Centrifugação
Turbidez	ETA	X	X		X	
pH	LAA	X	X	X		
DQO	PHI		X	X		
Contagem de Algas	PHI	X				
Clorofila- <i>a</i>	PHI	X				
Resistência Específica	LAA			X		
Sólidos Totais	LAA			X		X
Sólidos Dissolvidos	PHI / LAA	X				
Sólidos em Suspensão	PHI / LAA	X	X		X	
Sólidos Voláteis	LAA		X	X		
Legenda	ETA	Laboratório operacional da ETA-Brasília				
	PHI	Laboratório Central da Caesb				
	LAA	Laboratório de Análise da Água do Depto Eng. Civil e Ambiental da Universidade de Brasília - UnB				

De uma forma geral, a importância de alguns desses parâmetros no contexto desse estudo é apresentada a seguir:

- A concentração de clorofila-*a* e a contagem de algas, como parâmetros de caracterização da água bruta quanto ao caráter orgânico do material particulado do manancial;
- A concentração de DQO, para avaliar os teores de matéria orgânica presentes em cada amostra;
- A concentração de sólidos voláteis, para análise similar, na caracterização da água de lavagem;

- A concentração de sólidos, sendo o principal parâmetro de avaliação dos processos de adensamento e desidratação, e de caracterização das diferentes fases do processo de tratamento dos resíduos;
- A resistência específica, como possível indicador do grau de desidratabilidade dos lodos gerados pela flotação e sedimentação.

Para apoiar a interpretação dos resultados obtidos, foram capturadas imagens dos flocos de cada lodo, obtidas por meio de microscópio eletrônico, tendo sido empregada uma diluição de 1:200, e uma ampliação de 100 vezes.

4.6 - ETAPA III – EXPERIMENTOS COMPLEMENTARES

4.6.1 - Fase IIIA – Experimentos preliminares de desidratação em filtro prensa

Tendo em vista os resultados obtidos na Etapa II e as recomendações da literatura quanto a aplicabilidade do processo de filtração forçada para desidratação de lodos gerados no tratamento de águas com presença de algas (Schofield, 1997), foram realizados experimentos preliminares de desidratação utilizando-se de um filtro prensa de laboratório, baseados em estudos desenvolvidos por Cordeiro (1993).

Os experimentos foram realizados para desidratação do lodo obtido no adensamento de água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação (três experimentos), e da ETA-Descoberto, por sedimentação (um experimento apenas). Em todos os casos, além da desidratação no filtro prensa, foram realizados também experimentos de desidratação em centrífuga, para comparações entre o desempenho dos dois processos.

O equipamento de filtração forçada, confeccionado na oficina da Caesb, é apresentado na Figura 4.12, sendo constituído por:

- Câmara superior, confeccionada a partir de tarugo de PVC, onde foram instalados manômetro, adaptador para ligação ao compressor, e válvula de alívio.
- Tubo intermediário, de diâmetro interno de 50 mm, confeccionado em PEAD, com volume total de 600 mL, onde são colocados a amostra (500 mL), a manta de filtração, e um suporte perfurado de alumínio;

- Câmara inferior, também confeccionada a partir de tarugo de PVC, onde se recolhe o clarificado diretamente para uma proveta graduada.

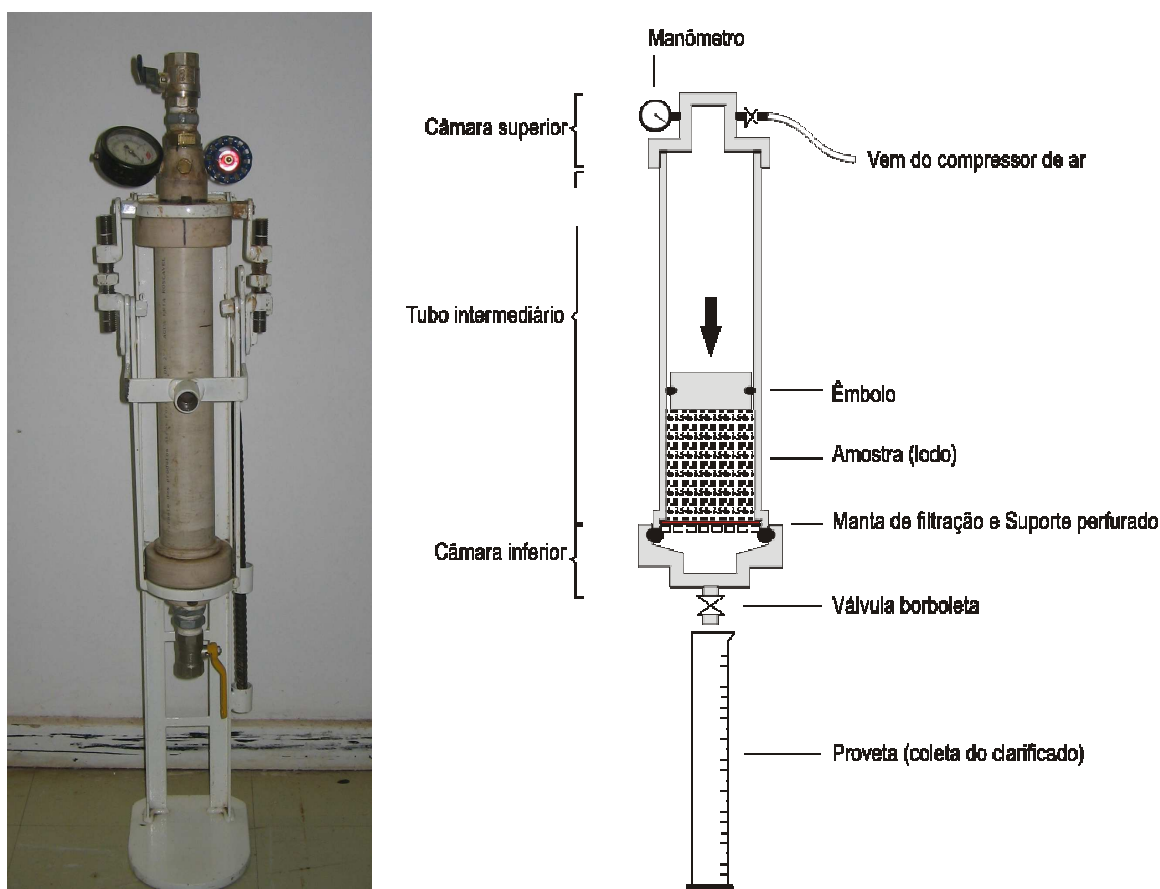


Figura 4.12 – Filtro prensa de laboratório, confeccionado na oficina da Caesb

Realizada a primeira bateria de experimentos, verificou-se a necessidade de colocação de um êmbolo no tubo intermediário, de forma a evitar o contato do ar diretamente com a amostra. Nessas condições, foram realizados dois novos ensaios, um para cada tipo de lodo.

Como esses experimentos tinham caráter preliminar, sem o objetivo de otimizar o processo de filtração forçada para desidratação dos lodos em estudo, a metodologia utilizada foi baseada nos estudos de Cordeiro (1993), tendo sido repetida a melhor condição de desidratação avaliada pelo autor, ou seja, com a utilização de manta de nylon multifilar de permeabilidade entre 0,6 e 0,8 m³/m².min e pressão de filtração de 6 atm.

Para condicionamento físico, assim como em Cordeiro (1993), também foi investigada a alternativa de condicionamento com serragem, peneirada previamente em peneira nº 10

ASTM, de abertura de 2 mm. Além disso, procedeu-se ao condicionamento químico com polímero catiônico. Dessa forma, para cada amostra, foram avaliadas as seguintes condições:

- amostra de lodo, sem condicionamento.
- amostra de lodo condicionada com serragem, com dosagem verificada em ensaio de resistência específica;
- amostra de lodo condicionada com polímero catiônico, com dosagem verificada em ensaio de resistência específica;
- amostra de lodo condicionada com serragem e polímero catiônico, nas melhores dosagens verificadas individualmente para cada opção de condicionamento;

A realização dos experimentos compreendeu as seguintes operações:

- Produção e/ou coleta do lodo;
- Ensaio de resistência específica para determinação da dosagem ótima, de serragem e de polímero;
- Condicionamento da amostra de lodo (500 mL) com a dosagem verificada anteriormente;
- Colocação da manta de filtração e do suporte perfurado;
- Preenchimento do tubo intermediário com a amostra;
- Fechamento e pressurização do equipamento, a 6 atm;
- Registro da porção de água clarificada removida, a cada 20 minutos;
- Finalização do experimento após 120 minutos;
- Cálculo por balanço de massa da concentração de sólidos da torta;
- Análises físicas de amostras do lodo e do clarificado, conforme Tabela 4.8.

A centrifugação foi realizada seguindo a mesma metodologia das etapas anteriores, sendo que para condicionamento foi aplicado polímero aniônico. A escolha do polímero utilizado na desidratação em cada equipamento baseou-se nas orientações dos fabricantes, que recomendam, de forma geral, o uso de polímero aniônico para centrifugação e de polímero catiônico para filtração forçada.

Tabela 4.8 – Ensaio de caracterização realizados na Fase IIIA

Parâmetro	Laboratório	Lodo do Adensado	Torta da Filtração Forçada	Clarificado da Filtração Forçada
Turbidez	ETA			X
Resistência Específica	LAA	X		
Sólidos Totais	LAA	X	X	
Sólidos Voláteis	LAA	X		
Sólidos em Suspensão	LAA			X
Legenda	ETA LAA	Laboratório operacional da ETA-Brasília Laboratório de Análise da Água do Depto Eng. Civil e Ambiental da Universidade de Brasília - UnB		

4.6.2 - Fase IIIB – Experimentos prospectivos de condicionamento térmico

Considerando a possibilidade do mecanismo de congelamento e descongelamento ser, segundo Wolfe *et al.* (1996), a única forma de condicionamento capaz de alterar significativamente a distribuição de água interna do lodo, melhorando as condições de desidratabilidade dos lodos, foi realizado experimento prospectivo de condicionamento térmico com vistas à desidratação em centrífuga.

Tendo em vista o caráter prospectivo dessa avaliação, foi realizado um único experimento para desidratação do lodo obtido no adensamento de água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação, e mais um experimento para desidratação do lodo coletado nos adensadores da ETA-Descoberto, para comparação. Para cada amostra, foram avaliadas as seguintes condições:

- amostra de lodo natural, sem condicionamento;
- amostra de lodo com condicionamento físico (congelamento e descongelamento), apenas;
- amostra de lodo natural com condicionamento químico (polímero aniônico), apenas;
- amostra de lodo com condicionamento físico e químico.

Para adensamento e desidratação, foram utilizadas a mesma metodologia dos ensaios anteriores, sendo que o condicionamento físico foi efetuado por meio do congelamento de 1 litro de cada amostra, por 48 horas, em freezer regulado para uma temperatura de 18°C negativos. As únicas análises laboratoriais realizadas foram a determinação do teor de sólidos totais e da fração de sólidos voláteis, para cada lodo utilizado.

5 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentadas relações com os experimentos válidos realizados, entre agosto de 2006 e maio de 2007, e que são discutidos nesse capítulo.

Os códigos utilizados para referenciar os experimentos ao longo do texto foram definidos de acordo com os seguintes critérios: as primeiras duas letras significam a origem da água de lavagem ou lodo (BS, ETA-Brasília; e RD, ETA-Descoberto); as três letras que se seguem, identificam o processo de adensamento utilizado (FAD, flotação; e SED, sedimentação); as últimas três letras indicam o processo de desidratação adotado (CEN, centrifugação; e FIL, filtração forçada); a numeração identifica os experimentos realizados com resíduos de cada estação, de forma sequencial, tanto para adensamento quanto para desidratação.

Tabela 5.1 - Relação dos experimentos realizados na Etapa I

Etapa	Fase	Experimento	ETA	Característica Predominante da Água Bruta	Processo de Adensamento	Processo de Desidratação
I	IA	BS.FAD1	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	-
		BS.FAD2	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	-
		BS.FAD3	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	-
		BS.FAD4	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	-
		BS.FAD5	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	-
		BS.SED1	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	-
		BS.SED2	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	-
		BS.SED3	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	-
		BS.SED4	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	-
		BS.SED5	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	-
		RD.FAD1	Descoberto	Turbidez	Flotação	-
	IB	BS.FAD6.CEN1	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Centrifugação
		BS.FAD7.CEN2	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Centrifugação
		BS.SED6.CEN1	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Centrifugação
		RD.SED1.CEN1	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Centrifugação
		BS.FAD8.CEN3	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Centrifugação
		BS.SED7.CEN2	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	Centrifugação
		RD.SED2.CEN2	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Centrifugação
		RD.FAD1.CEN1	Descoberto	Turbidez	Flotação	Centrifugação

Tabela 5.2 – Relação dos experimentos realizados nas Etapas II e III

Etapa	Fase	Experimento	ETA	Característica Predominante da Água Bruta	Processo de Adensamento	Condicionamento	Processo de Desidratação
II		BS.FAD.9.CEN4	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Polímero	Centrifugação
		BS.FAD.10.CEN5	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Polímero	Centrifugação
		BS.FAD.11.CEN6	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Polímero	Centrifugação
		BS.FAD.12.CEN7	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Polímero	Centrifugação
		BS.FAD.13.CEN8	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Polímero	Centrifugação
		BS.SED.8.CEN3	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
		BS.SED.9.CEN4	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
		BS.SED.10.CEN5	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
		BS.SED.11.CEN6	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
		BS.SED.12.CEN7	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
		RD.FAD2.CEN2	Descoberto	Turbidez	Flotação	Polímero	Centrifugação
		RD.FAD3.CEN3	Descoberto	Turbidez	Flotação	Polímero	Centrifugação
		RD.FAD4.CEN4	Descoberto	Turbidez	Flotação	Polímero	Centrifugação
		RD.FAD5.CEN5	Descoberto	Turbidez	Flotação	Polímero	Centrifugação
		RD.FAD6.CEN6	Descoberto	Turbidez	Flotação	Polímero	Centrifugação
		RD.SED3.CEN3	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
		RD.SED4.CEN4	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
		RD.SED5.CEN5	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
		RD.SED6.CEN6	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
		RD.SED7.CEN7	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Polímero	Centrifugação
III	IIIA	BS.FAD14.FIL1	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Pol./Serragem	Filtração forçada
		BS.FAD15.FIL2	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Pol./Serragem	Filtração forçada
		BS.FAD16.FIL3	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Pol./Serragem	Filtração forçada
		BS.FAD14.CEN9	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Pol./Serragem	Centrifugação
		BS.FAD15.CEN10	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Pol./Serragem	Centrifugação
		BS.FAD16.CEN11	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Pol./Serragem	Centrifugação
		RD.SED8.FIL1	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Pol./Serragem	Filtração forçada
		RD.SED8.CEN8	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Pol./Serragem	Centrifugação
		BS.FAD17.FIL4	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Pol./Serragem	Filtração forçada
		RD.SED9.FIL2	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Pol./Serragem	Filtração forçada
	IIIB	BS.FAD18.CEN12	Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	Térmico/Pol.	Centrifugação
		RD.SED10.CEN9	Descoberto	Turbidez	Sedimentação	Térmico/Pol.	Centrifugação
Legenda para codificação dos experimentos			ETA: [BS] Brasília [RD] Descoberto	Adensamento: [SED] sedimentação [FAD] flotação	Desidratação: [CEN] centrifugação [FIL] filtração forçada		

5.1 - ETAPA I – EXPERIMENTOS PRELIMINARES

5.1.1 - Fase IA – Experimentos preliminares de adensamento

5.1.1.1 - Adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação

Foram realizados 5 experimentos válidos para adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultados obtidos no adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação a ar dissolvido

Experimento	Turbidez Água de Lavagem (UT)	SST Água de Lavagem (mg/L)	Turbidez Clarificado (UT)	SST Clarificado (mg/L)	Captura de Sólidos (%)	ST Lodo (%)
BS.FAD1	74	135	3,4	10	93 %	1,84 %
BS.FAD2	40	80	13,1	26	68 %	1,74 %
BS.FAD3	34	40	14,3	16	60 %	2,10 %
BS.FAD4	44	108	14,6	20	81 %	2,89 %
BS.FAD5	31	84	7,0	14	83 %	2,00 %
Média	45	89	10,4	17	77 %	2,11 %

Legenda: SST (sólidos em suspensão totais); ST (sólidos totais)

Conforme pode ser observado nos dados da Tabela 5.3, a captura de sólidos foi satisfatória, em média de 77%, levando a valores de turbidez inferiores a 15 UT no efluente da unidade de flotação. Além disso, após 2 horas de flotação o lodo adensado apresentou valor médio de teor de sólidos de 2,11%, adequado, portanto, para desidratação em centrífuga, sem necessidade de pré-adensamento.

Para definição do tempo de flotação, foram coletadas amostras do lodo flotado em diferentes intervalos de tempo. Os dados apresentados na Figura 5.1 demonstram que o teor de sólidos no lodo tende a aumentar com o tempo do experimento de flotação. Esse comportamento difere do observado por Marwell (2004), que constatou que após 1 hora de experimento a concentração de sólidos na espuma se estabilizava, embora nesse caso os experimentos de flotação tenham sido realizados para clarificação da água bruta, no tratamento de água. Cabe ressaltar que para o experimento BS.FAD5 foram realizadas coletas de lodo somente após 120 minutos de flotação.

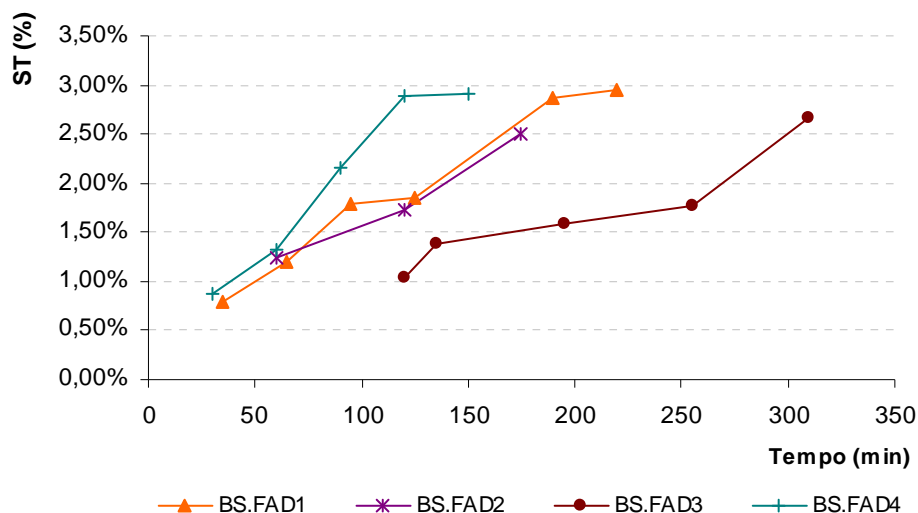


Figura 5.1 – Evolução do teor de sólidos do lodo flotado acumulado na superfície do tanque de flotação

O tempo para coleta do lodo flotado foi fixado em 2 horas, período após o qual o teor de sólidos no lodo coletado apresenta cerca de 2% de teor de sólidos, adensado o suficiente para desidratação em centrífuga.

5.1.1.2 - Adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por flotação

Devido à já mencionada dificuldade na coleta e transporte da água de lavagem da ETA-Descoberto até a ETA-Piloto, apenas um experimento foi realizado para adensamento por flotação dessa água de lavagem. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos no adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por flotação

Experimento	Turbidez Água de Lavagem (UT)	SST Água de Lavagem (mg/L)	Turbidez Clarificado (UT)	SST Clarificado (mg/L)	Captura de Sólidos (%)	ST Lodo (%)
RD.FAD1	145	54	95	34	33 %	3,08 %

Legenda: SST (sólidos em suspensão totais); ST (sólidos totais)

Apesar do lodo adensado ter apresentado teor de sólidos acima de 3%, os resultados preliminares obtidos sugerem que a flotação pode não ser o processo mais indicado para adensamento de águas de lavagem com características similares à da ETA-Descoberto. Isso porque, além da qualidade inadequada do clarificado, o lodo (escuma) formado

apresentava certa instabilidade, e uma baixa consistência que dificultava a coleta. Contudo, seria recomendável a realização de um maior número de experimentos, com o objetivo de otimizar esse processo, variando parâmetros como a taxa de aplicação e a vazão recirculada, e efetuando pré-condicionamento com polímeros.

5.1.1.3 - Adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por sedimentação

Foram realizados 5 experimentos válidos para adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por sedimentação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Resultados obtidos no adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por sedimentação

Experim.	Amostras de Água de Lavagem Coletadas	Vs Médio (m/d)	Turbidez Média Água de Lavagem (UT)	SST Médio Água de Lavagem (mg/L)	Turbidez Média Clarificado (UT)	SST Médio Clarificado (mg/L)	Captura de Sólidos (%)	ST Lodo (%)
BS.SED1	6	3,4	110	168	4	27	84 %	0,64 %
BS.SED2	6	0,6	73	161	15	32	80 %	0,28 %
BS.SED3	7	3,8	63	119	7	14	88 %	0,54 %
BS.SED4	7	1,0	81	-	6	-	-	0,52 %
BS.SED5	4	1,4	71	126	7	15	88 %	0,39 %
Média	6	2,0	80	143	7,8	22	85 %	0,47 %

Legenda: SST (sólidos em suspensão totais); ST (sólidos totais)

O desempenho do processo de sedimentação para adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília foi satisfatório em termos de captura de sólidos e turbidez do clarificado, melhor inclusive do que os resultados obtidos por flotação. Contudo, a sedimentação não produziu lodo com teor de sólidos compatível com as recomendações para uso da desidratação por centrifugação, tendo em vista que o teor de sólidos obtido foi, em média, de 0,47%. Embora a concentração de sólidos obtida no lodo sedimentado da ETA-Brasília tenha sido abaixo da faixa indicada para uso em centrífuga, os resultados obtidos nos experimentos de centrifugação não confirmaram a influência do teor de sólidos do lodo na desidratabilidade, dando indicativos de que essa recomendação seja válida apenas para equipamentos em escala real.

Cabe ressaltar ainda que as taxas de aplicação superficial (V_s) utilizadas foram muito baixas, inferiores a 4 m/d. Em termos práticos, essa taxa pode inviabilizar a adoção do

processo, face à grande área necessária para implantação das unidades equivalentes. Ainda assim, a taxa foi mantida nesse patamar para facilitar a operação da ETA-Piloto. Uma possibilidade para melhoria das condições de adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por sedimentação, seria a instalação de agitador no fundo da coluna, sendo recomendado que sejam efetuados novos ensaios para verificar a efetividade dessa intervenção

5.1.1.4 - Adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por sedimentação

Na Tabela 5.6. são apresentados dados do desempenho no adensamento da água de lavagem na ETA-Descoberto em escala real, em valores médios referentes ao período de realização dos experimentos dessa fase. Os resultados demonstram a compatibilidade do processo de sedimentação para adensamento da água de lavagem produzida nessa estação.

Tabela 5.6 – Caracterização do lodo adensado da ETA-Descoberto, por sedimentação

Turbidez Água de Lavagem (UT)	SST Água de Lavagem (mg/L)	Turbidez Clarificado (UT)	SST Clarificado (mg/L)	Captura de Sólidos (%)	ST Lodo (%)
420	380	35	24	94%	3,29%

Legenda: SST (sólidos em suspensão totais); ST (sólidos totais)

5.1.2 - Fase IB – Experimentos preliminares de desidratação em centrífuga

5.1.2.1 - Definição dos parâmetros de centrifugação e avaliação da influência da concentração de sólidos inicial do lodo

Foi realizado experimento de flotação para adensamento de água de lavagem da ETA-Brasília (BS.FAD6.CEN1), tendo sido coletadas amostras de lodo após transcorridos 15, 30 e 90 minutos de tempo de flotação. Cada amostra coletada apresentou diferentes níveis de adensamento, a saber:

- ST da amostra coletada com 15 minutos de flotação – 1,27 %;
- ST da amostra coletada com 30 minutos de flotação – 1,61 %;
- ST da amostra coletada com 90 minutos de flotação – 2,24 %.

Cada amostra foi submetida à desidratação em centrífuga, sem condicionamento, variando-se as condições de operação. As Figuras 5.2 (com tempo de centrifugação fixado em 50 minutos e diferentes valores de G^*) e 5.3 (com G^* fixado em 2.500 g e diferentes tempos de centrifugação) apresentam os resultados de teor de sólidos na torta, obtidos por balanço de massa.

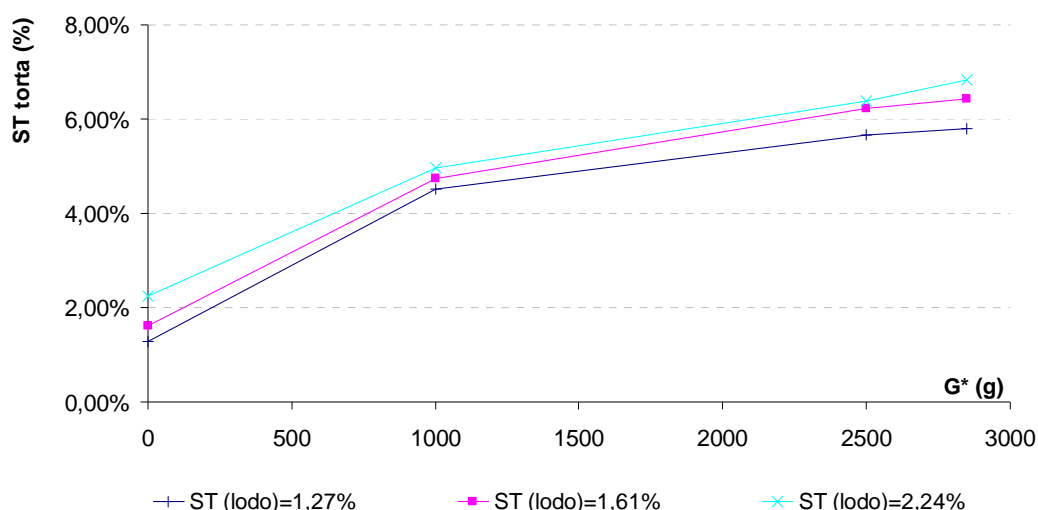


Figura 5.2 – Desidratação em centrífuga de lodos com diferentes teores de sólidos totais, para diferentes valores de G^* , com tempo de centrifugação fixado em 50 minutos

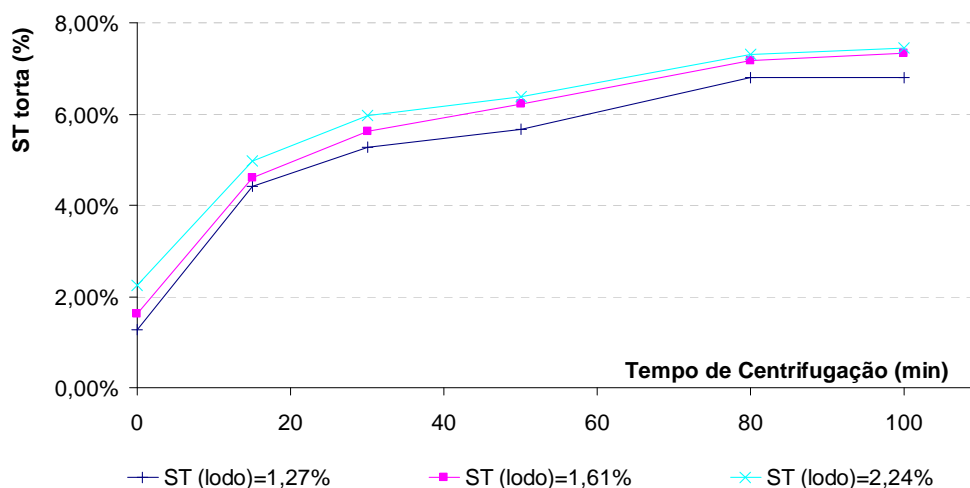


Figura 5.3 – Desidratação em centrífuga de lodos com diferentes teores de sólidos totais, para diferentes tempos de centrifugação, com G^* fixado em 2.500 g

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3 permitem a seguinte interpretação:

- G^* : As centrífugas previstas para a ETA-Brasília têm a mesma intensidade de força centrífuga dos equipamentos instalados atualmente na ETA-Descoberto,

correspondente a 2.500 g. Esse G^* mostrou-se adequado para realização dos experimentos, tendo em vista que a partir desse valor a capacidade de remoção de água do lodo parece ser esgotada, com o teor de sólidos na torta se estabilizando;

- Tempo de centrifugação: Reali *et al.* (1999b) sugerem que o tempo de centrifugação adotado nos ensaios de bancada seja àquele a partir do qual não se verifique variação significativa no teor de sólidos. A partir dos resultados apresentados na Figura 5.3, esse tempo corresponderia a 80 minutos de centrifugação. Contudo, considerou-se que 50 minutos seria um tempo satisfatório, uma vez que a operação da centrífuga pelo tempo adicional de 30 minutos não compensaria o ganho marginal obtido;
- Influência da concentração de sólidos inicial do lodo: conforme pode ser observado nas Figuras 5.2 e 5.3, as diferenças absolutas entre os teores de sólidos iniciais das três amostras desidratadas permanecem praticamente constantes a medida que se aumenta a intensidade da centrifugação ou se prolonga o tempo de centrifugação. Essa constatação sugere que o teor de sólidos do lodo não é um fator determinante na desidratabilidade do lodo.

5.1.2.2 - Definição dos tipos de polímero a serem utilizados na Etapa II

Na Tabela 5.7 são relacionadas as amostras de polímero avaliadas, sendo que o polímero “G” refere-se ao atualmente utilizado na ETA-Descoberto. Todos polímeros disponíveis foram testados, conforme pode ser observado na Tabela 5.8.

Tabela 5.7 – Características dos polímeros avaliados inicialmente

Código	Referência	Carga Iônica	Densidade de Carga	Peso Molecular
A	Magnafloc LT 20	Não-iônico	-	Alto
B	Magnafloc LT 22S	Aniônico	Média/baixa	Muito alto
C	Magnafloc LT 27	Aniônico	Média	Muito alto
D	Magnafloc 1011	Aniônico	Baixa	Alto
E	Zetag 7692	Catiônico	Baixa	Alto
F	Zetag 7689	Catiônico	Alta	Alto
G	Ônion Química	Aniônico	Média	Alto

Tabela 5.8 – Experimentos realizados na Fase IB, com indicação dos polímeros avaliados nos ensaios de desidratação em centrífuga

ETA	Característica Predominante	Processo de Adensamento	Experimento	Polímeros avaliados
Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	BS.SED6.CEN1	A, B, C, D, E, F
Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	BS.FAD7.CEN2	A, B, C, D, E, F
Descoberto	Turbidez	Sedimentação	RD.SED1.CEN1	A, B, C, D, E, F
Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	BS.SED7.CEN2	A, B, C, D, E, F
Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	BS.FAD8.CEN3	C, E, G
Descoberto	Turbidez	Sedimentação	RD.SED2.CEN2	C, E, G
Descoberto	Turbidez	Flotação	RD.FAD1.CEN1	C, E, G

A Figura 5.4 apresenta um resultado típico do comportamento dos diferentes lodos testados, em relação à aplicação dos vários polímeros na sua dosagem ótima. De um modo geral, o ganho em teor de sólidos com uso de polímeros no condicionamento do lodo para posterior centrifugação não excedeu a 25% em relação ao lodo centrifugado sem prévio condicionamento (branco). Outro aspecto a ser mencionado é que nenhum dos polímeros foi consistentemente melhor para os quatro tipos de lodo avaliados. Os resultados desses experimentos são apresentados no Apêndice A.

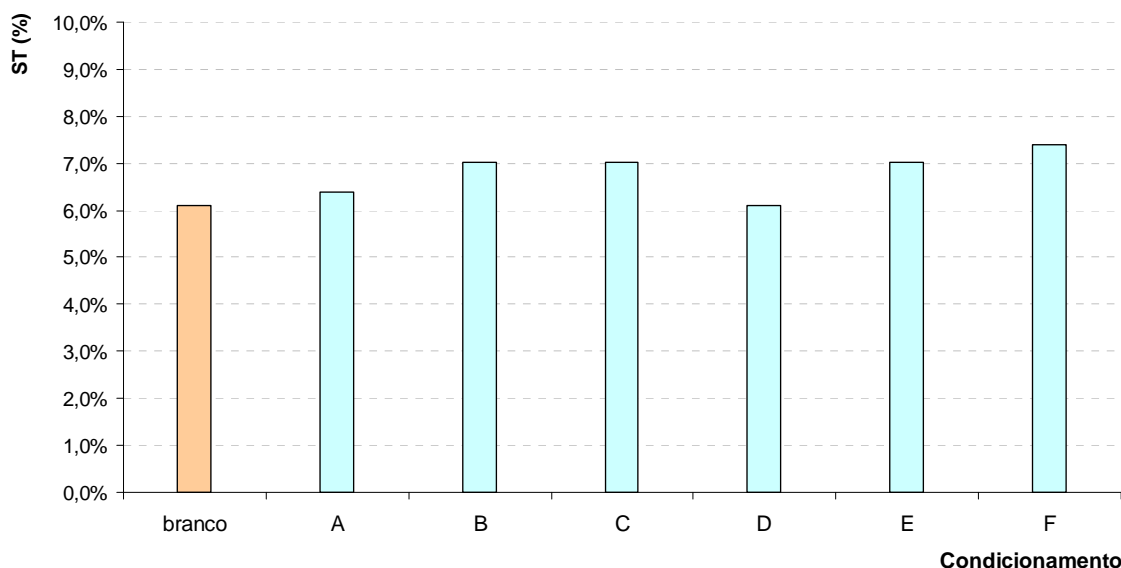


Figura 5.4 – Teores de sólidos obtidos na condição de dosagem ótima para os polímeros de A a F e para o branco, referentes ao experimento BS.FAD7.CEN2, de desidratação do lodo produzido no adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação

Dessa forma, embora a proposta inicial fosse selecionar os polímeros pelo desempenho na desidratação, devido à pequena diferença entre os resultados obtidos a seleção dos polímeros foi realizada por outros critérios, tendo sido escolhidos:

- Polímero A, por ser o único não-iônico testado;
- Polímero G, aniônico, por ser o polímero utilizado em escala real pela ETA-Descoberto, permitindo assim comparações entre os processos em escala real e de laboratório;
- Polímero E, catiônico, pois o outro polímero catiônico testado apresentou problemas durante sua preparação, tendendo a promover a formação de grumos.

Nas etapas seguintes, os polímeros selecionados serão referenciados unicamente pela sua carga iônica.

5.2 - ETAPA II – EXPERIMENTOS DE CENTRIFUGAÇÃO

Foram realizados 20 experimentos de desidratação em centrífuga, ou seja, 5 para cada tipo de lodo estudado. Em cada experimento realizado, foram avaliados os três polímeros selecionados, cada um correspondente a uma carga iônica diferente. Na Tabela 5.9, são relacionados os experimentos realizados.

Tabela 5.9 – Relação de experimentos realizados na Etapa II

ETA	Característica predominante da água bruta	Processo de Adensamento	Experimento	
Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	1º	BS.FAD.9.CEN4
			2º	BS.FAD.10.CEN5
			3º	BS.FAD.11.CEN6
			4º	BS.FAD.12.CEN7
			5º	BS.FAD.13.CEN8
Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Sedimentação	1º	BS.SED.8.CEN3
			2º	BS.SED.9.CEN4
			3º	BS.SED.10.CEN5
			4º	BS.SED.11.CEN6
			5º	BS.SED.12.CEN7
Descoberto	Turbidez	Flotação	1º	RD.FAD2.CEN2
			2º	RD.FAD3.CEN3
			3º	RD.FAD4.CEN4
			4º	RD.FAD5.CEN5
			5º	RD.FAD6.CEN6
Descoberto	Turbidez	Sedimentação	1º	RD.SED3.CEN3
			2º	RD.SED4.CEN4
			3º	RD.SED5.CEN5
			4º	RD.SED6.CEN6
			5º	RD.SED7.CEN7

5.2.1 - Caracterização dos resíduos das ETAs Brasília e Descoberto

A Tabela 5.10 apresenta valores médios de algumas características da água de lavagem da ETA-Brasília e da ETA-Descoberto, durante o período de produção ou coleta de lodo, para os 5 experimentos realizados.

Na Tabela 5.11 são apresentados resultados da caracterização dos lodos produzidos pelo adensamento por flotação e por sedimentação dessas águas de lavagem, também em termos dos valores médios dos 5 experimentos realizados.

Tabela 5.10 – Média (n=5) das características das águas de lavagem da ETA-Brasília e da ETA-Descoberto

ETA	Característica predominante da água bruta	Turbidez (UT)	SST (mg/L)	SV (% SST)
Brasília	Clorofila- <i>a</i>	85 ± 44	109 ± 79	52% SST ± 4,0%
Dscoberto	Turbidez	255 ± 113	226 ± 116	23% SST ± 2,1%

Legenda: SST (sólidos em suspensão totais); SV (sólidos voláteis); ST (sólidos totais)

Tabela 5.11 – Média (n=5) das características dos lodos da ETA-Brasília e da ETA-Descoberto, adensados por flotação e por sedimentação

ETA	Característica predominante da água bruta	Processo de adensamento	ST (%)	SV (% ST)	pH
Brasília	Clorofila- <i>a</i>	Flotação	2,09% ± 0,3%	52% ST ± 3,8%	6,4 ± 0,2
		Sedimentação	0,61% ± 0,1%	53% ST ± 4,2%	6,3 ± 0,3
Descoberto	Turbidez	Flotação	3,56% ± 1,3%	24% ST ± 2,4%	7,0 ± 0,5
		Sedimentação	5,52% ± 2,4%	25% ST ± 1,6%	6,5 ± 0,4

Legenda: ST (sólidos totais); SV (sólidos voláteis); ST (sólidos totais)

Comparando os dados das Tabelas 4.1, 5.10 e 5.11, pode ser observado que as características da água bruta são emprestadas à água de lavagem e aos lodos adensados. Conforme antecipado com base nos resultados obtidos por Marwell (2004), os resíduos da ETA-Brasília apresentam caráter predominantemente orgânico, devido principalmente à presença de algas, enquanto os resíduos da ETA-Descoberto apresentam maior proporção de material inerte, revelando, portanto, um caráter inorgânico. Resultados mais detalhados da caracterização dos lodos em estudo, para cada experimento, são apresentados no Apêndice B.

Conforme antecipado na Etapa I, não foi possível obter lodos com concentrações de sólidos próximas. Além das propriedades distintas da água bruta de cada ETA, e das diferenças entre os processos de flotação e sedimentação, têm-se também as variações das condições operacionais de cada ETA, levando a produção de resíduos com diferentes características físico-químicas. Alguns fatores relacionados ao processo de tratamento de água são: variações nas características da água bruta; condições operacionais do processo de tratamento (pré-alkalinização, dosagens de coagulante, etc.); características do filtro lavado (se houve peneiramento, jateamento ou troca de leito filtrante recente); e ainda por eventuais alterações em procedimentos operacionais, tais como na duração da carreira, taxa de filtração, ou mesmo na sequência de lavagem.

Todos processos apresentaram resultados satisfatórios, em termos de concentração de sólidos adequada para centrifugação, exceto o lodo obtido no adensamento por sedimentação da água de lavagem dos filtros da ETA-Brasília. Nesse caso, foram produzidos lodos com concentrações de sólidos baixas, inferiores a 1,0 %. Contudo, como foi verificado que a concentração de sólidos inicial do lodo não influencia na desidratabilidade dos lodos, em termos do teor de sólidos obtido na torta na centrifugação, a baixa capacidade de adensamento por sedimentação verificada deixou de ser um fator crítico. Dessa forma, foi possível executar as operações de adensamento dos demais lodos sem o comprometimento de se obter lodos com mesmo nível de adensamento. Devido à complexidade dos fatores que definem as características dos lodos e das águas de lavagem, essa liberdade foi um fator decisivo na investigação experimental nas etapas seguintes.

Uma explicação para esse comportamento pode estar relacionada ao fato de que, no adensamento, haja apenas remoção da parcela de água livre, que seria facilmente removida nos processos de desidratação. Dessa forma, obter lodos mais concentrados no adensamento não leva alterações importantes na quantidade de água presa (*bound water*) na estrutura do floco, além de não influenciar na sua desidratabilidade, como já havia sido indicado anteriormente por Wolfe *et al.* (1996). Cabe lembrar, contudo, que um adensamento pouco eficiente em termos de concentração de sólidos obtida no lodo pode implicar em custos operacionais maiores na etapa de desidratação, ou mesmo inviabilizar o funcionamento de equipamentos centrífugos. Ou seja, o adensamento com vistas à centrifugação deve ser estudado para obtenção de lodos com teores de sólidos adequados.

Após a desidratação, foram verificadas diferenças entre o teor de sólidos da torta, obtido na centrífuga de laboratório, e o obtido na centrífuga instalada na ETA-Descoberto. Esse mesmo comportamento também foi observado por Marwell (2004), conforme apresentado na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Comparação entre teores de sólidos totais obtidos na torta em experimentos em escala de laboratório e dados de operação em escala real

Fonte ou Experimento	[A] ST na torta obtido no Laboratório (%)	[B] ST na torta obtido na ETA-RD (%)	Diferença relativa (A-B/B)*100 %
Marwell (2004)	27,0 %	34,9 %	22,6 %
Média dos Experimentos	23,2 %	30,1 %	22,2 %

Legenda: ST (sólidos totais)

Nota: Como as centrífugas da ETA-Descoberto apresentaram defeitos durante a Etapa II, foi possível realizar comparações entre o desempenho da desidratação em escala real e de laboratório apenas para os experimentos RD.SED3.CEN3 e RD.SED4.CEN4.

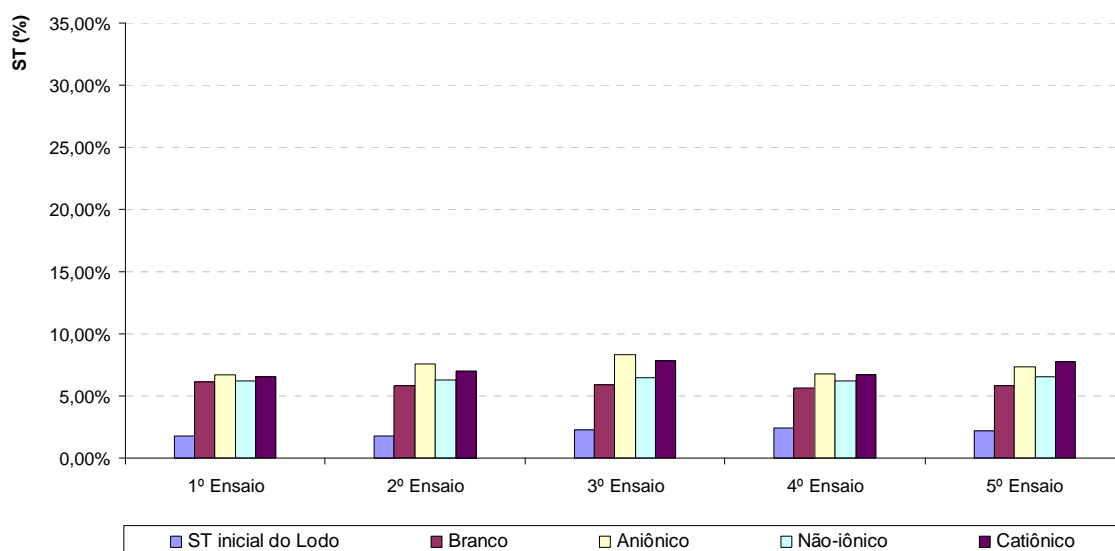
Caso tivessem sido adotados, em ambos trabalhos, tempos de centrifugação mais longos, provavelmente os valores obtidos em laboratório e em escala real seriam mais próximos. O tempo de centrifugação adotado, contudo, não comprometeu os objetivos estabelecidos, tendo em vista que para identificar as causas da baixa desidratabilidade dos resíduos da ETA-Brasília foi proposta uma comparação relativa entre experimentos realizados em diferentes condições. Para avaliar a maior concentração de sólidos possível de ser obtida pelo processo de centrifugação, o ideal seria ter prolongado o tempo de centrifugação, verificando-se assim o potencial de remoção de água para a rotação selecionada. Conforme citado anteriormente, esse tempo corresponderia a 80 minutos, sendo que foi adotado um tempo de centrifugação de 50 minutos, assim como o adotado por Marwell (2004).

Para estimar o teor de sólidos possível de se obter em escala real, em função dos dados obtidos na investigação experimental do presente trabalho, uma possibilidade então seria a adoção de fatores de conversão. Tendo em vista a diferença verificada em função do tempo de centrifugação adotado, e as diferenças existentes entre os equipamentos de escala real e de laboratório, sugere-se então a adoção de um fator de 1,25, a ser empregado multiplicando-se o teor de sólidos obtido na centrífuga de laboratório.

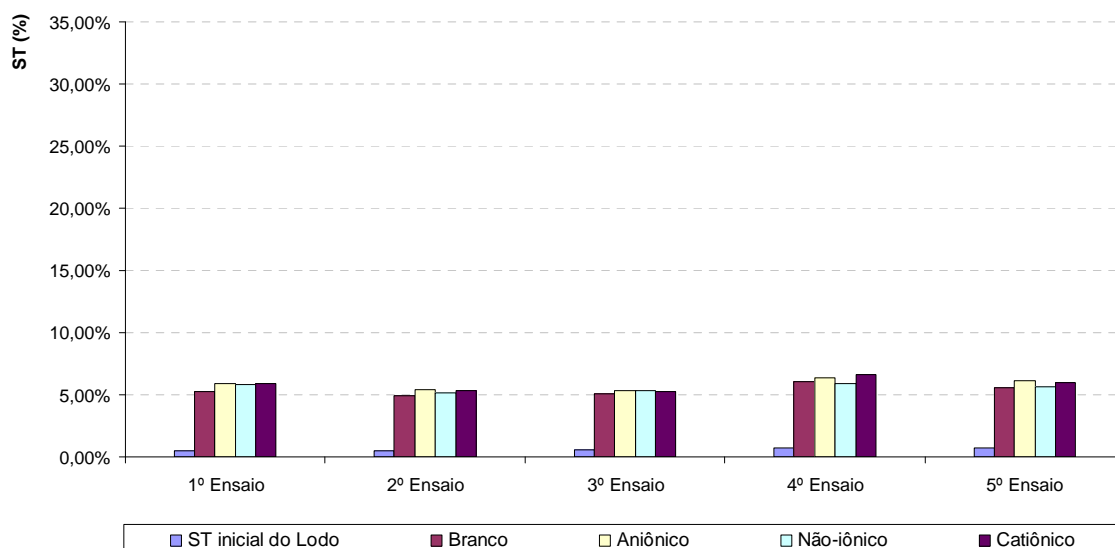
5.2.2 - Avaliação do condicionamento com polímeros

Para subsidiar a discussão a respeito do condicionamento com polímeros, nas Figuras 5.5 e 5.6 são apresentados dados relativos ao desempenho de cada polímero, em sua dosagem

ótima, em cada experimento realizado, para cada tipo de lodo. A concentração de sólidos referente à dosagem ótima foi determinada por análise gravimétrica, e a referência “branco” corresponde ao resultado da desidratação de amostra sem condicionamento. Dados complementares a esses experimentos são apresentados no Apêndice C.

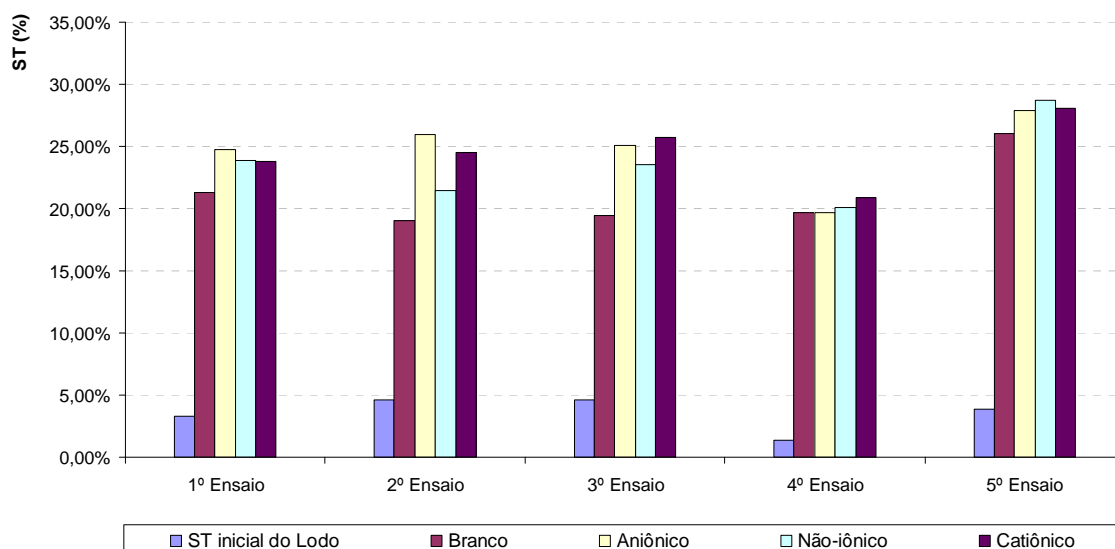


(a) Lodo da ETA-Brasília, adsensado por flotação

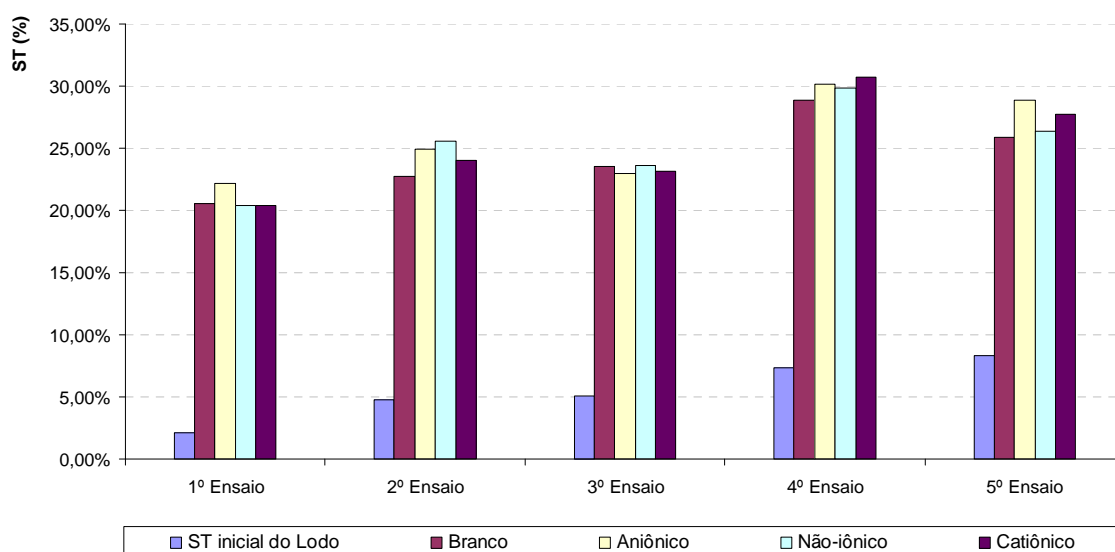


(b) Lodo da ETA-Brasília, adsensado por sedimentação

Figura 5.5 – Teores de sólidos obtidos na condição de dosagem ótima de cada polímero e para o branco, referentes aos experimentos da Etapa II, na desidratação dos lodos da ETA-Brasília, adsensados por: (a) flotação e (b) sedimentação



(a) Lodo da ETA-Descoberto, adensado por flotação



(b) Lodo da ETA-Descoberto, adensado por sedimentação

Figura 5.6 – Teores de sólidos obtidos na condição de dosagem ótima de cada polímero e para o branco, referentes aos experimentos da Etapa II, na desidratação dos lodos da ETA-Descoberto, adensados por: (a) flotação e (b) sedimentação

Pode ser observado que, em nenhum caso, o condicionamento com polímero levou a melhoras significativas no potencial de desidratação do lodo, tendo em vista que os teores de sólidos obtidos nas dosagens ótimas foram relativamente próximos ao das amostras sem

condicionamento (branco). Além disso, pouca diferença pode ser observada entre o desempenho de cada polímero aplicado, apesar de suas cargas iônicas distintas.

O ganho registrado em termos de desidratabilidade, de aproximadamente 20%, pode ser importante em termos de redução de volume de torta gerada. Esse acréscimo no teor de sólidos da torta após condicionamento foi similar aos verificados em outros trabalhos (Di Bernardo *et al.*, 1999b; Marwell, 2004), tendo sido inclusive interpretado como ganho importante em termos de desidratabilidade. Contudo, o condicionamento químico não pode ser considerado como a solução para o lodo da ETA-Brasília, tendo em vista o baixo teor de sólidos verificado na torta, sempre aquém do desejado, ou seja, um teor de sólidos totais acima de 25%.

Mais uma vez, parecem estar coerentes as observações feitas por Wolfe *et al.* (1996), em relação aos efeitos do condicionamento com polímeros para desidratação em centrífuga. Como os polímeros não alteram a estrutura interna dos flocos, e devido à elevada força gravitacional empregada (G^* de 2.500 g), pouca diferença pode ser observada em termos de desidratabilidade após condicionamento.

Essa constatação não representa que a aplicação de polímero seja dispensável na centrifugação em escala real. Além dos efeitos do condicionamento em relação à melhor qualidade do clarificado, verifica-se também que há um aumento da consistência do lodo. Essa maior consistência é extremamente importante para o funcionamento eficiente da centrífuga, tendo em vista seus mecanismos internos de separação sólido-líquido, sendo também essencial caso o transporte da torta para a caçamba se faça por equipamentos tais como roscas parafuso. Uma torta mais consistente também terá vantagens em relação ao transporte em caminhões ou quando da disposição no solo. Dessa forma, embora os resultados obtidos em escala de bancada não demonstrem, a aplicação de polímeros é importante para o sucesso do processo de desidratação em centrífuga, em escala real, conforme verificado em testes realizados na operação da centrífuga da ETA-Descoberto (Caesb, 2006).

Ressaltada a importância operacional do condicionamento com polímeros, cabe analisar o comportamento da desidratação em função das diferentes dosagens aplicadas de um determinado polímero, tendo em vista aspectos relacionados à eficiência do equipamento e

a questões econômicas. Para auxiliar essa análise, uma curva típica mostrando resultados obtidos na desidratação é apresentada na Figura 5.7, sendo que os dados de teor de sólidos apresentados no gráfico foram estimados por balanço de massa.

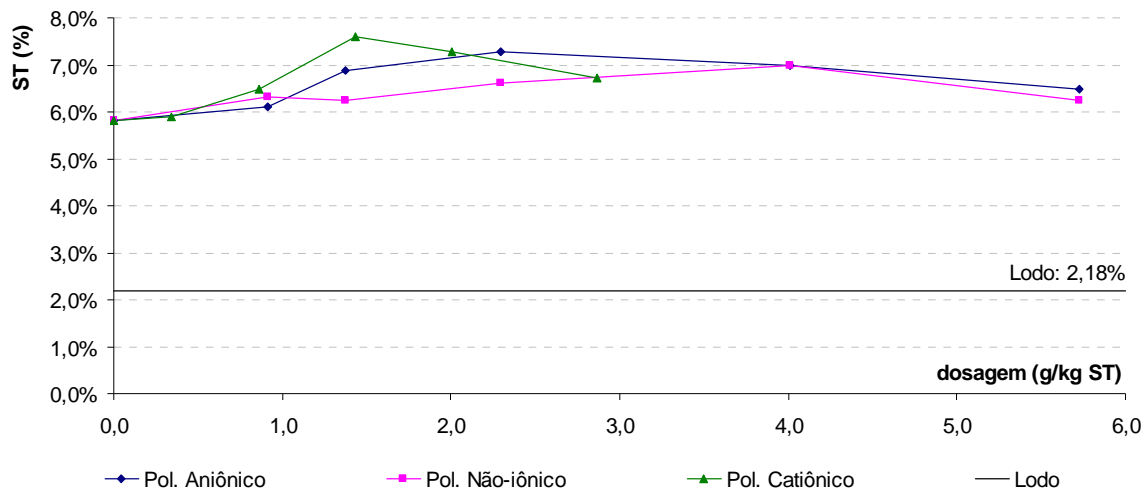


Figura 5.7 – Teores de sólidos na torta, obtidos para cada tipo de polímero, referentes ao experimento BS.FAD13.CEN8, de desidratação do lodo produzido no adensamento de água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação

Das curvas apresentadas na Figura 5.7, nota-se que, conforme se aumenta a dosagem, há um aumento na concentração de sólidos da torta, até que seja atingido um valor máximo. A partir desse ponto, a desidratabilidade do lodo passa a diminuir, e o aumento da dosagem não mais contribui para remoção de água do lodo, levando a valores de concentração de sólidos na torta algumas vezes inferior mesmo em relação ao branco. A dosagem equivalente à maior concentração de sólidos obtida pode ser interpretada como a dosagem ótima, também referenciada como dosagem crítica.

Uma melhor visualização das diferenças de desempenho de cada polímero poderia ser obtida caso os experimentos tivessem ter sido realizados com rotações mais baixas da centrífuga, conforme recomendado por Reali *et al.* (1999b). Contudo, essa metodologia não contribuiria para atendimento dos objetivos principais do presente trabalho, já que se pretende avaliar o máximo teor de sólidos possível de se alcançar com cada processo.

Embora alguns autores avaliem que a baixa desidratabilidade do lodo em dosagens elevadas de polímero ocorra devido à reversão da carga dos flocos, os resultados obtidos

parecem estar de acordo com outras abordagens, mais especificamente em relação ao observado por Bache e Papavasiliopoulos (2000). Esses autores verificaram que, em dosagens maiores que a dosagem ótima, a floculação ocorria de forma efetiva (não indicando reestabilização), porém observava-se ao mesmo tempo uma maior dificuldade na remoção de água do lodo. Esse mesmo comportamento foi verificado no presente trabalho e atribui-se esse efeito ao aumento na viscosidade. mas nota-se claramente um contínuo aumento da viscosidade do líquido sobrenadante. Nos experimentos realizados, as dosagens ótimas variaram bastante, entre 0,4 e 1,5 g/kg de ST, para os lodos da ETA-Descoberto, e entre 1,2 e 3,7 g/kg de ST, para os lodos da ETA-Brasília.

Devido às dificuldades e à demanda de tempo para o ensaio completo, a definição da dosagem ótima de polímero em equipamentos em escala real geralmente é feita por tentativa e erro, alterando-se a dosagem de polímero no próprio equipamento de mistura. Contudo, conforme observado anteriormente, seria recomendável proceder à determinação das dosagens ótimas em função da viscosidade do sobrenadante, uma vez que esses ensaios apresentam maior rapidez de execução e razoável precisão, conforme relatado por Bache e Papavasiliopoulos (2000). Outra alternativa seria realizar essa análise não em função de características reológicas do lodo, como, por exemplo, em função de limites de liquidez e plasticidade.

5.2.3 - Influência das características da água bruta e do processo de flotação na desidratação por centrifugação

Na Figura 5.8 é apresentada a comparação proposta na Tabela 4.6. Os dados são referentes ao teor de sólidos na torta equivalentes à dosagem ótima de polímero aniônico. De forma a facilitar a interpretação dos experimentos realizados em termos da avaliação da influência das características da água bruta e do processo de flotação, os resultados obtidos foram reorganizados, sendo que os dados apresentados nas Figuras 5.8 (a) e 5.8 (b) são os mesmos, mas com diferentes arranjos.

Conforme pode ser observado na Figura 5.8(a), as microbolhas de ar, ou, em uma abordagem mais ampla, as características dos flocos formados pelo processo de adensamento por flotação, não mostraram uma influência apreciável na desidratação em centrífuga. A desidratação dos lodos da ETA-Brasília, quer adensados por flotação ou por

sedimentação, apresentou tortas com concentrações de sólidos próximas, tendo sido mantidas as diferenças iniciais de concentração de sólidos no lodo. Comportamento idêntico pode ser observado na desidratação dos lodos da ETA-Descoberto, mostrando que, nesse caso, também não houve influência do processo de adensamento no potencial de desidratação desse lodo.

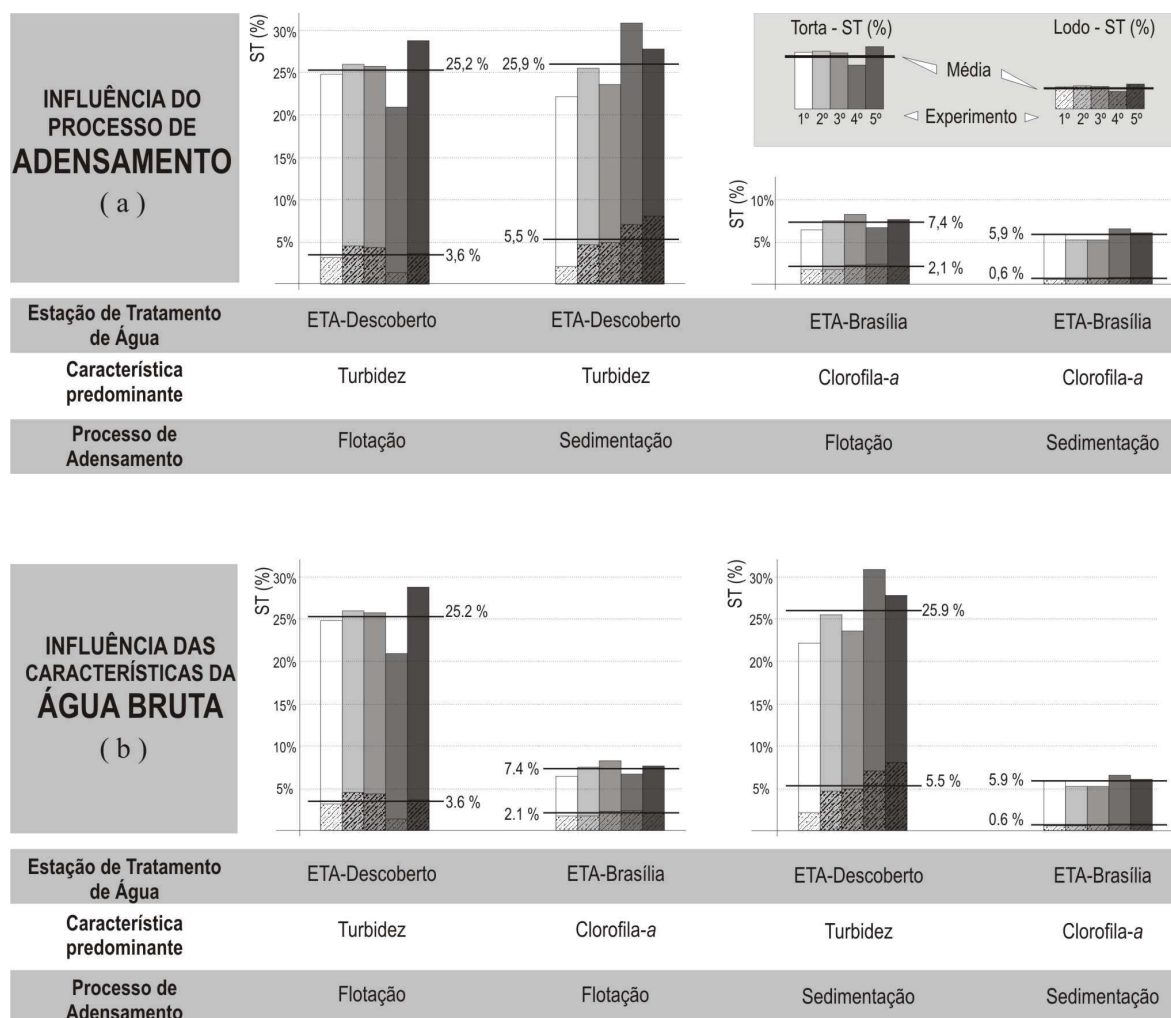


Figura 5.8 – Teores de sólidos totais obtidos na centrifugação dos lodos da ETA-Brasília e ETA-Descoberto, adensados por flotação e sedimentação, de forma a avaliar: (a) influência do processo de adensamento; (b) influência das características da água bruta

Assim, a hipótese de que as microbolhas de ar incorporadas aos flocos durante o processo de flotação serem o fator limitante com relação a desidratabilidade do lodo da ETA-Brasília pode ser descartada. Além dos dados apresentados, cabe relatar também a observação visual de que as microbolhas presentes no lodo coletado foram facilmente removidas durante as operações de homogeneização do lodo e de mistura com o polímero. É importante destacar que, em escala real, o ar presente no lodo está sujeito a gradientes e

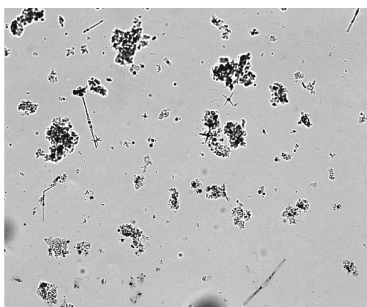
períodos de agitação ainda maiores que os proporcionados em escala de bancada, ocorrendo a expulsão das microbolhas presentes durante as operações de raspagem, transporte, mistura e recalque do lodo.

Em relação à influência das características da água bruta, as comparações apresentadas na Figura 5.8(b) sugerem que o caráter orgânico dos lodos resultantes do adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília influencia notadamente nas suas condições de desidratabilidade, independentemente do processo de adensamento utilizado. Enquanto a desidratação dos lodos originário do adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília resultou em tortas com teores de sólidos inferiores a 9%, a desidratação dos lodos da ETA-Descoberto, de caráter inorgânico, permitiu produzir tortas com teores de sólidos entre 20 e 30%.

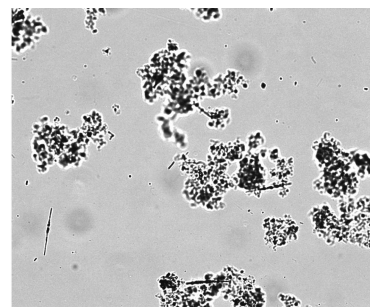
Embora o processo de tratamento ou adensamento utilizado leve a flocos de características morfológicas distintas entre si, as características físicas, químicas e biológicas da água bruta parecem ser o fator de maior influência na distribuição de água no lodo e, conseqüentemente, na sua desidratabilidade. Dessas características, o caráter orgânico devido à presença de algas parece ser o fator decisivo no grau de desidratabilidade do resíduo obtido, na medida em que podem levar a formação de flocos com menor capacidade de remoção de água nos processos de desidratação.

5.2.4 - Morfologia dos flocos e resistência específica

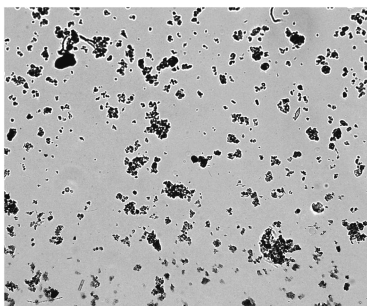
A Figura 5.9 apresenta imagens representativas da morfologia dos flocos presentes nos lodos da ETA-Brasília e da ETA-Descoberto, adensados pelos processos de flotação e de sedimentação. Nelas podem ser visualizadas diferenças entre os flocos de cada lodo, com destaque para a presença de espécies de algas nos lodos produzidos pelo adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, principalmente dos gêneros *Cosmarium* e *Staurastrum*. Além disso, verifica-se também a ausência de micro-bolhas de ar aderidas ou presas aos flocos nos lodos produzidos por flotação.



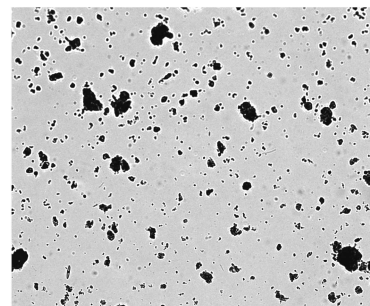
(a) BS.FAD12



(b) BS.SED1



(c) RD.FAD5



(d) RD.SED6

Figura 5.9 – Imagens representativas (aumento de 100 vezes; diluição de 1:200) dos flocos presentes nos lodos obtidos no: (a) adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação; (b) adensamento da água de lavagem da ETA-Brasília, por sedimentação; (c) adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por flotação; (d) adensamento da água de lavagem da ETA-Descoberto, por sedimentação

As imagens capturadas permitem inferir que a presença de algas nos lodos da ETA-Brasília leva a formação de flocos com características morfológicas distintas daquelas observadas nos lodos da ETA-Descoberto. Os flocos presentes nos lodos da ETA-Brasília têm maior porosidade e diâmetro médio. Já os flocos dos lodos da ETA-Descoberto tendem a ser mais compactos e de menor tamanho, levando à maior facilidade de remoção de água verificada nos ensaios de centrifugação. Essas características do lodo da ETA-Descoberto parecem se traduzir em uma distribuição mais favorável das frações de água nos flocos, o que pode explicar sua melhor desidratabilidade.

Contudo, observa-se também diferenças entre os lodos produzidos por flotação e por sedimentação, sendo que essas diferenças não refletiram na maior ou menor desidratabilidade de um lodo da mesma origem durante a desidratação em centrífuga. Esse efeito pode vir a ser mais marcante caso a desidratação seja efetuada por processos de filtração forçada, conforme sugerem os resultados de resistência específica, mostrados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Valores médios de resistência específica para os lodos estudados (sem condicionamento)

ETA	Processo de Adensamento	Resistência Específica (m/kg)	Desvio Padrão
Brasília	Flotação	$3,6 \times 10^{12}$	$2,3 \times 10^{12}$
	Sedimentação	$0,9 \times 10^{12}$	$0,6 \times 10^{12}$
Descoberto	Flotação	$4,7 \times 10^{11}$	$3,3 \times 10^{11}$
	Sedimentação	$2,1 \times 10^{11}$	$1,5 \times 10^{11}$

Os dados de resistência específica são um indicativo de que o lodo da ETA-Brasília tem desidratação mais difícil do que o da ETA-Descoberto. Conforme citado anteriormente, lodos com resistência específica de até 1×10^{12} m/kg são considerados de fácil desidratação, enquanto aqueles com resistência específica acima de 10×10^{12} m/kg têm baixa desidratabilidade (Wolfe *et al.*, 1996).

5.3 - ETAPA III – EXPERIMENTOS COMPLEMENTARES

5.3.1 - Fase IIIA – Experimentos preliminares de desidratação em filtro prensa

Nessa fase, inicialmente foram realizados os experimentos relacionados na Tabela 5.14, referentes a desidratação, por centrifugação e por filtração forçada, de lodos gerados pelo adensamento de água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação (três repetições), e do lodo coletado nos adensadores da ETA-Descoberto (um único experimento). A concentração de sólidos da torta foi calculada por balanço de massa, a partir da concentração de sólidos inicial do lodo. As taxas de remoção de água referentes a experimentos representativos podem ser avaliadas na Figura 5.10.

Tabela 5.14 - Resultados obtidos na Fase IIIA, para desidratação por centrifugação e por filtração forçada

Experimento	Lodo		Centrifugação		Filtração Forçada			
	ST (%)	SV (%ST)	Branco ST (%)	Polímero Aniônico ST (%)	Branco ST (%)	Serragem ST (%)	Polímero Catiônico ST (%)	Pol. Cat. e Serragem ST (%)
BS.FAD14	1,88 %	55,9 %	6,22 %	7,67 %	2,32%	2,74%	3,97% *	4,64% *
BS.FAD15	1,54 %	55,3 %	6,05 %	6,82 %	2,24%	2,59%	2,96%	4,39% *
BS.FAD16	1,47 %	57,1 %	6,24 %	7,41 %	2,01%	2,29%	3,87% *	3,92 % *
RD.SED8	3,56 %	24,7 %	17,91 %	19,16 %	4,40%	4,69%	17,99% *	17,30% *

Obs: (*) Filtração interrompida antes dos 120 minutos previstos, devido à passagem de ar

Legenda: SV (sólidos voláteis); ST (sólidos totais)

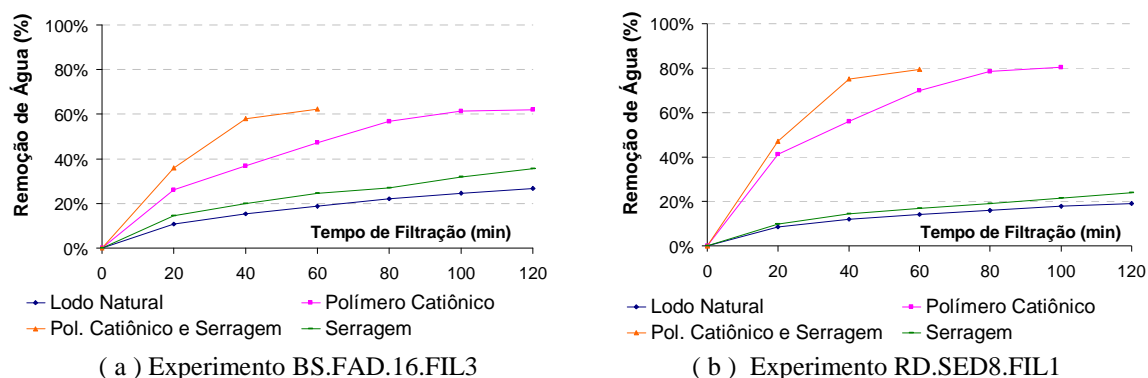


Figura 5.10 – Porcentagem de remoção de água para experimentos representativos de filtração forçada

Comparando a desidratação de ambos os lodos por filtração forçada, verifica-se que, após condicionamento, a remoção de água do lodo da ETA-Descoberto ocorreu em taxas mais elevadas do que para o lodo da ETA-Brasília. Além disso, assim como na centrifugação, o teor de sólidos verificado na torta foi maior também para o caso da ETA-Descoberto. Esses fatos sugerem a maior desidratabilidade dos lodos de caráter inorgânico, tanto por centrifugação quanto por filtração forçada

Nos casos sem condicionamento, o desempenho do equipamento em termos de remoção de água foi desprezível. Essa baixa eficiência decorre da compactação excessiva do lodo na região próxima à manta, impedindo assim a passagem de água. Esse fato ressalta a importância do condicionamento na filtração forçada, com o objetivo de reduzir a compressibilidade do lodo, aumentando assim suas características de filtrabilidade. Dessa forma, diferentemente da centrifugação, o condicionamento mostrou-se fundamental para obtenção de melhores resultados na desidratação por filtração forçada.

Avaliando isoladamente os efeitos de cada opção de condicionamento, verifica-se que o condicionamento com serragem não proporcionou vantagens importantes, nos experimentos realizados. Já o condicionamento com polímero catiônico mostrou-se uma alternativa ainda mais eficaz. Esse fato sugere que o condicionamento do lodo com determinados tipos de polímero pode formar um lodo com características estruturais adequadas para a filtração forçada, semelhantes ou mesmo melhores do que aquelas obtidas no condicionamento físico.

A melhor alternativa de condicionamento verificada foi a aplicação combinada de serragem e polímero, que possibilitou atingir acima de 60% de remoção de água, para o lodo da ETA-Brasília, e de aproximadamente 80%, para o lodo da ETA-Descoberto. Além de permitir obter uma torta mais concentrada, o condicionamento possibilitou melhores taxas de remoção de água, fator extremamente importante na operação de equipamentos desse tipo em escala real.

É importante ressaltar que o condicionamento com serragem implica em um maior volume de resíduo ao final do processo de desidratação, sendo recomendável estudar outros métodos de condicionamento físico que possibilitem uma menor incorporação de volume ao lodo, tal como a aplicação de gesso, que proporcionou bons resultados nos experimentos realizados por Zhao (2002).

Conforme indicado na Tabela 5.14, o período de filtração foi inferior ao previsto na metodologia (120 minutos), para algumas condições testadas. Essa interrupção no processo de filtração ocorreu devido a uma falha verificada na concepção do filtro prensa de laboratório, comprometendo a realização dos ensaios. Removida determinada fração de água no lodo (60% para o lodo da ETA-Brasília e 80% para o lodo da ETA-Descoberto), a porção de torta acumulada no interior do tubo intermediário apresentava uma pequena retração, se descolando da parede do tubo. A partir desse momento, podia ser verificada passagem de ar na descarga no equipamento, com a conseqüente interrupção da remoção de água do lodo.

Para solucionar esse problema, foi confeccionado um dispositivo para transmissão da pressão aplicada sobre o lodo, sendo constituído de um simples êmbolo de PVC com anel de vedação. Dessa forma, a passagem de ar foi evitada, podendo-se inclusive prolongar os experimentos por qualquer tempo desejado. Foi realizada então uma nova repetição do experimento de desidratação de filtração forçada, para cada tipo de lodo estudado nessa fase, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.15 e na Figura 5.11.

Os resultados sugerem a aplicabilidade da filtração forçada, por filtro prensa, para desidratação de lodos do tratamento de água, tendo em vista que os resultados obtidos foram semelhantes àqueles verificados em outros experimentos, para centrifugação.

Contudo, eram esperados melhores resultados, tendo em vista a indicação da filtração forçada para desidratação de lodos orgânicos produzidos por flotação (Schofield, 1997).

Tabela 5.15 - Resultados obtidos na Fase IIIA, para desidratação por filtração forçada, após correção de falha do equipamento de filtro prensa de laboratório

Experimento	Lodo		Torta obtida após filtração forçada		
	ST (%)	SV (%ST)	Branco ST (%)	Polímero Catiônico ST (%)	Pol. Catiônico e Serragem ST (%)
BS.FAD17.FIL4	1,90 %	60,4 % ST	2,29 %	4,88 %	6,56 %
RD.SED9.FIL2	3,39 %	27,6 % ST	4,82 %	21,16 %	29,70 %

Legenda: ST (sólidos totais); SV (sólidos voláteis)

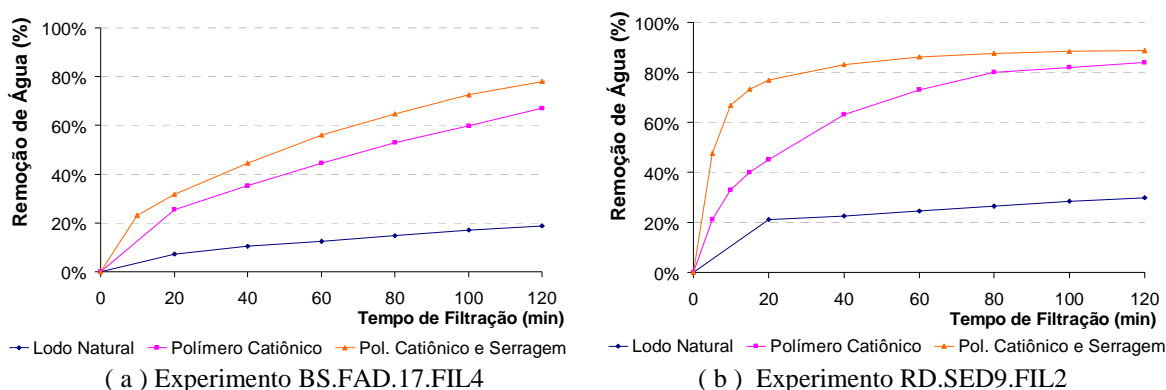


Figura 5.11 – Porcentagem de remoção de água para experimentos de desidratação por filtração forçada, após correção de falha do equipamento de filtro prensa de laboratório

É importante ressaltar que essa análise trata-se apenas de uma avaliação preliminar. Para uma melhor discussão a respeito da desidratação em filtros prensa, seria necessário a realização de um maior número de experimentos, investigando principalmente aspectos relacionados à pressão aplicada e quanto à duração do experimento, associando esses parâmetros ao desempenho do equipamento em escala real. Sem compreender esses aspectos, não é possível avaliar de uma forma definitiva a eficiência da filtração forçada.

Outros dois aspectos, em especial, poderiam ter sido abordados nesses experimentos: a comparação entre a desidratabilidade da filtração forçada de lodos gerados por flotação e por sedimentação; e uma verificação da correlação entre os resultados obtidos na desidratação por diferentes processos, tais como por filtração a vácuo (filtração forçada com pressão inferior à atmosférica), pelo filtro prensa de laboratório (filtração forçada com pressão superior à atmosférica) e por centrifugação.

5.3.2 - Fase IIIB – Experimentos prospectivos de condicionamento térmico

Nessa fase, foram realizados os experimentos relacionados na Tabela 5.16, referentes a desidratação, por centrifugação, de lodos gerados pelo adensamento de água de lavagem da ETA-Brasília, por flotação, e do lodo coletado nos adensadores da ETA-Descoberto, efetuado-se pré-condicionamento das amostras por congelamento e descongelamento, com e sem (branco) aplicação de polímero. Foi realizado um único experimento para cada tipo de lodo, sendo que a concentração de sólidos da torta foi calculada por balanço de massa.

Tabela 5.16 - Resultados obtidos na Fase IIIB, para desidratação por centrifugação com lodos naturais e pré-condicionados por mecanismo de congelamento e descongelamento

Experimento	Lodo		Centrifugação com Lodo Natural		Centrifugação com Lodo submetido a Condicionamento Térmico	
	ST (%)	SV (%ST)	Branco ST (%)	Polim.An. ST (%)	Branco ST (%)	Polim.An. ST (%)
BS.FAD18.CEN12	1,71 %	59,5 % ST	5,70 %	7,60 %	15,21 %	21,39 %
RD.SED10.CEN9	2,48 %	26,1 % ST	18,63 %	23,61 %	26,12 %	29,57 %

Legenda: SV (sólidos voláteis); ST (sólidos totais)

Dos resultados apresentados, observa-se que o condicionamento térmico levou a produção de lodos com melhores características de desidratabilidade. Chama a atenção, contudo, o ganho em desidratabilidade para o lodo da ETA-Brasília, de caráter orgânico. O condicionamento térmico permitiu a obtenção de um lodo com concentração de sólidos três vezes maior do que na desidratação com lodo natural. Para o lodo de caráter inorgânico, da ETA-Descoberto, esse ganho foi muito menor, de cerca de 25 %.

Esses resultados sugerem que o lodo da ETA-Brasília possui uma maior fração de água presa (*bound water*) na estrutura interna dos flocos, e que o mecanismo de congelamento e descongelamento libera parte dessa água. Para os lodos da ETA-Descoberto, a distribuição de água parece ser diferente, sendo que, mesmo sem condicionamento térmico, a força centrífuga aplicada seria suficiente para remover grande parte da água interna.

Dessa forma, os resultados obtidos direcionam a discussão a respeito da desidratabilidade dos lodos para a abordagem apresentada por Wolfe *et al.* (1996). Esses autores verificaram que a facilidade ou não de remoção de água do lodo é determinada no momento da formação do floco matriz, isso é, por fatores inerentes às características da água bruta, ao coagulante utilizado, e ao processo de coagulação e floculação.

A viabilidade da aplicação do condicionamento térmico poderia ser investigada em outros estudos, avaliando aspectos técnicos, ambientais, e em relação a custos. Contudo, a princípio, as condições climáticas de países como o Brasil podem inviabilizar a adoção desse tipo de processo.

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para estudar a desidratabilidade dos resíduos da ETA Brasília, foram realizadas comparações entre a desidratação em centrifuga de lodos orgânicos e inorgânicos, adensados pelos processos de sedimentação e flotação por ar dissolvido.

Para uma determinada água de lavagem, os processos de adensamento utilizados, flotação e sedimentação, promoveram a formação de flocos com diferentes características morfológicas: diâmetro efetivo, dimensão fractal, porosidade, entre outros. Embora existam grandes discrepâncias na literatura a respeito de como as características físicas dos flocos influenciam na desidratabilidade do lodo adensado, no presente trabalho as diferenças nessas características não foram determinantes na capacidade de remoção de água de cada lodo. De fato, mesmo a concentração de sólidos no lodo não afetou a desidratação em centrífuga, pelo menos em experimentos em escala de bancada.

Foi verificado que, além de não haver diferenças, em termos de desidratabilidade, entre os lodos produzidos por flotação e sedimentação para água de lavagem de uma determinada origem, também não houve incorporação definitiva de ar nos flocos durante o processo de flotação, não acarretando em prejuízos na etapa seguinte de tratamento, de desidratação. As microbolhas de ar pareceram não exercer influência na desidratabilidade dos lodos, uma vez que foram facilmente expulsas nas operações de homogeneização e mistura durante o condicionamento químico.

A comparação efetuada entre a desidratação em centrífuga, com lodos das ETAs Brasília e Descoberto, sugere que caso o resíduo tenha um caráter orgânico – isto é, seja um subproduto do tratamento de água bruta com presença de algas – a desidratabilidade será inferior àquela de lodos de caráter inorgânico, cuja origem remonta a uma água bruta com composição predominante de material sólido inerte.

Embora a literatura recomende a filtração forçada como alternativa para o tratamento de resíduos de caráter orgânico, os experimentos realizados indicaram desempenhos similares na desidratação em centrífuga e no filtro prensa de laboratório, em termos da concentração

de sólidos na torta. Apesar do caráter preliminar dos experimentos de filtração forçada, os resultados obtidos sugerem que, caso haja algum ganho em desidratabilidade, esse estaria relacionado a uma maior pressão ou força aplicada na operação de remoção de água, e não a uma adequabilidade do processo de filtração forçada para desidratação de lodos produzidos por flotação ou de caráter orgânico devido à presença de algas.

Os experimentos realizados ao longo desse trabalho demonstraram ainda que o condicionamento químico, com vistas à desidratação em centrífuga, em escala de bancada, foi uma operação pouco vantajosa, já que o incremento no teor de sólidos na torta foi pouco significativo, não se configurando como uma solução para a questão da baixa desidratabilidade dos resíduos de caráter orgânico. Apesar disso, cabe ressaltar a importância do condicionamento para operação de centrífugas em escala real, sendo que nesse caso as vantagens do condicionamento estão relacionadas ao princípio de funcionamento desses equipamentos, possivelmente devido a aspectos ligados à viscosidade ou consistência do lodo.

Para os experimentos no filtro prensa de laboratório, o condicionamento mostrou-se fundamental. Conforme verificado experimentalmente, na filtração forçada é necessário adicionar substâncias ao lodo que garantam a formação de uma estrutura pouco compressível e de alta filtrabilidade. Essa estrutura pode ser obtida tanto pelo condicionamento físico, quanto pelo condicionamento químico.

A pouca efetividade da aplicação de polímeros na desidratação em centrífuga havia sido sugerida em alguns trabalhos. Como os polímeros interagem apenas com a superfície dos flocos, não há alterações importantes na distribuição de água na estrutura interna dos flocos. Uma vez formados os flocos, o único meio de modificar sua estrutura, propiciando uma melhora substancial na desidratabilidade dos resíduos, seria pelo mecanismo de congelamento e descongelamento.

Essa hipótese foi avaliada, ainda que de forma prospectiva, e os resultados obtidos demonstraram que o condicionamento térmico altera substancialmente as condições de desidratabilidade dos lodos de caráter orgânico. A desidratação em centrífuga, após congelamento e descongelamento das amostras, permitiu um ganho significativo em termos de desidratabilidade em relação às alternativas testadas, especialmente para o lodo

da ETA-Brasília, de caráter orgânico. Essa análise ressalta a importância da distribuição de água na estrutura do floco matriz, isto é, aquele gerado no processo de tratamento de água.

A distribuição de água na estrutura interna dos flocos é definida nas etapas iniciais do tratamento e sofre grande influência das características da água bruta. O total de água presa (*bound water*) mantém-se aproximadamente constante ao longo do processo de tratamento dos resíduos, determinando o potencial de remoção de água independentemente do equipamento de desidratação utilizado. A baixa desidratabilidade dos resíduos da ETA-Brasília está, portanto, prioritariamente associada às características da água bruta, de caráter essencialmente orgânico. Não sendo possível intervir nas características da água bruta, as etapas iniciais do tratamento de água – com ênfase para os mecanismos de coagulação e floculação – seriam então os focos de novos estudos para a otimização da desidratabilidade dos resíduos, podendo levar a formação de flocos com maior facilidade de remoção de água.

Recomenda-se, portanto, proceder à investigação do processo de coagulação e floculação em relação a desidratabilidade dos resíduos, envolvendo aspectos tais como:

- Avaliação da influência do pH de coagulação e do tipo de coagulante utilizado, associando com os mecanismos de coagulação;
- Influência do uso de auxiliares de coagulação no processo de tratamento;
- Gradiente e tempo de mistura rápida;
- Gradiente e tempo de floculação.

Desde que se obtenha um clarificado na flotação com turbidez inferior a 1 UT (para não comprometer as carreiras de filtração), proceder à escolha do coagulante ou dos auxiliares de coagulação, ou ainda determinar os parâmetros de coagulação e floculação em função das características do lodo, não parece acarretar em nenhum problema operacional. Afinal, o fator crítico operacional da nova ETA-Brasília está relacionado aos seus resíduos, e não à qualidade da água tratada, já que se dispõe de uma estação com barreiras suficientes para fornecer água dentro dos padrões exigidos e recomendados pela Portaria 518/MS (Brasil, 2004).

Outros aspectos de caráter mais pontual merecem ser também investigados em trabalhos futuros:

- Realizar estudos para avaliar a influência do condicionamento com polímeros com vistas à desidratação em centrífuga, em escala real, e como o condicionamento altera as propriedades morfológicas dos lodos;
- Avaliar em escala de bancada e real a utilização da viscosidade do sobrenadante da centrifugação como indicador de dosagens ótimas o condicionamento de com polímero;
- Avaliar a correlação de parâmetros físicos dos flocos com a desidratabilidade dos lodos;
- Realizar estudos para avaliar o uso de materiais alternativos para condicionamento físico para filtração forçada, como por exemplo resíduos de outras atividades industriais ou materiais de baixo custo disponíveis localmente
- Realizar estudos para avaliar, no filtro prensa de laboratório, a influência da pressão aplicada e do tempo de realização do experimento, buscando uma correlação desses parâmetros com resultados obtidos por equipamentos em escala real;
- Avaliar, de forma mais aprofundada, a aplicabilidade da alternativa de condicionamento térmico pelo mecanismo de congelamento e descongelamento.

De uma forma mais abrangente, é sugerida uma reflexão sobre a abordagem das pesquisas sobre tratamento de resíduos de ETAs realizadas no Brasil, uma vez que se tem investigado preferencialmente a influência dos processos de adensamento, desidratação e de condicionamento em relação a desidratabilidade dos resíduos, enquanto a efetividade da desidratação parece ser mais afetada pelas características da água bruta e flocos formados nas etapas do tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004. (1987). *Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.216. (1992). *Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Achon, C.L., Cordeiro, J.S. (2003). “Gerenciamento de lodo de ETAs – Remoção de água livre através de leitos de secagem e lagoas.” *Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Joinville, Brasil.
- APHA, AWWA, WPCF (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20ª edição, Washington, E.U.A.
- Arnold, S.R., Grubb, T.P., Harvey, P.J. (1995), “Recent applications of dissolved air flotation pilot studies and full scale design.” *Water Science and Technology*, **31**(3-4), 327-340.
- Arora, H., De Wolfe, J.R., Lee, R.G. e Grubb, T.P. (1995). “Evaluation of dissolved air flotation process for water clarification and sludge thickening.” *Water Science and Technology*, **31**(3-4), 137-147.
- Arora, H., Giovanni, G.D. e Lechevallier, M. (2001). “Spent filter backwash water contaminants and treatment strategies.” *Journal of American Water Works Association*, **93**(5), 100-112.
- Bache, D.H., Papavasiliopoulos, E.N. (2000), “Viscous behaviour of sludge centrate in response to polymer conditioning.”, *Water Science and Technology*, **34**(1), 354-358.
- Barbosa, A.B.D. (1997). “A experiência da Caesb em recuperação de água de lavagem de filtros e desidratação de lodo de ETA.” *Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1501-1507, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Brasil (1997). Lei 9.433, de 08/01/1997. “Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da CF, e altera o artigo 1º da Lei 8.001 de 13/03/1990 que modificou a Lei 7.990, de 28/12/1989.” *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 09/01/1997.
- Brasil (1998). Lei 9.605, de 12/02/1997. “Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras

- providências.” *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 13/02/1998.
- Brasil (2004). Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25/03/2004. “Procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.” *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 26/03/2004.
- Brink, N.C.P., Freitas, J.G., Ferreira Filho, S.S. (2005). “Desaguamento mecânico de lodos de estação de tratamento de esgotos em conjunto com lodos de estação de tratamento de água.” *Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1031-1039, Campo Grande, Brasil.
- Caesb (2005). “SIÁGUA - Sinopse do sistema de abastecimento de água do Distrito Federal.” Versão dezembro/2005. Caesb, Brasília, Brasil, 121p.
- Caesb (2006). “Relatório de Atividades - PPAS.” Versão novembro-dezembro/2006. Caesb, Brasília, Brasil.
- Canale, R.P. e Borchardt, J.A. (1972). “Sedimentation.” In: Weber Jr., W.J. (ed.). *Physicochemical Processes for Water Quality Control*. 1ª edição. John Wiley & Sons, Inc., E.U.A., 111-138.
- Camelo, A.S. e Marques, S.F.C. (1998). *Avaliação de Alternativas para Melhoria do Processo de Tratamento de Água Utilizado na ETA-Brasília*. Monografia de Projeto Final, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil, 105p.
- Carvalho, E.H. e Di Bernardo, L. (1999), “Interferência dos despejos de estações de tratamento de água nas estações de tratamento de esgoto.” *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1230-1239, Rio de Janeiro, Brasil.
- Colin, F. e Gazbar, S. (1995). “Distribution of water in sludges in relation to their mechanical dewatering.” *Water Research*, **8**, 2000-2005.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2005). Resolução nº 357, de 17/03/2005. “Dispõe sobre a Classificação dos corpos d’água e diretrizes Ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes”. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 18/03/2005.
- Cordeiro, B.S., Guimarães, G.C. e Brandão, C.C.S. (2006). “Avaliação da recirculação do clarificado produzido pelo adensamento da água de lavagem dos filtros da ETA

- Brasília.” *Anais do I Simpósio de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro-Oeste*, Brasília, Brasil.
- Cordeiro, J.S. (1993). *O Problema dos Lodos Gerados nos Decantadores em Estações de Tratamento de Água*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil, 341p.
- Cordeiro, J.S. (1999a). “Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs.” In: Reali, M.A.P. (coord.) *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 natural de água de lodos de ETAs utilizando leitos de secagem e lagoas de lodo” In: Reali, M.A.P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 125-141.
- Cornwell, D.A. e Macphee, M.J. (2001). “Effects of spent filter backwash recycle on *Cryptosporidium* removal.” *Journal of American Water Works Association*, **93**(4), 153-162.
- Di Bernardo, L., Scalize, P.S. e Souza Filho, A.G. (1999a). “Água de Lavagem de Filtros Rápidos.” In: Reali, M.A.P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 169-202.
- Di Bernardo, L., Scalize P.S, Fragiaco, P., Trofino, J.C. e Viudes, M.A.P. (1999b). “Clarificação da água de lavagem de filtros de sistemas de filtração direta ascendente e desaguamento do lodo por centrifugação.” *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1555-1565, Rio de Janeiro, Brasil.
- Di Bernardo, L. e Dantas, A.B. (2005). *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*, **vol. 1 e 2**. RiMa, São Carlos, Brasil, 1565p.
- Doe, P.W. (1990). “Waste Treatment Plant Waste Management.” In: Pontius, F.W. (ed.). *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. 4ª edição. American Water Works Association. McGraw-Hill, Inc., E.U.A., 955-995.
- Eades, A., Bates, B.J. e Macphee, M. J. (2001). “Treatment of spent filter backwash using dissolved air flotation.” *Water Science and Technology*, **43**(8), 59-66.
- Edzwald, J. e Tobiason, J. (2001). “Fate and removal *Cryptosporidium* in a dissolved air flotation water plant with and without recycle of waste filter backwash water.” *Anais do II World Water Congress*, IWA, Berlin, Alemanha, 7p.

- Ferreira Filho, S.S. (1997). “Pré-condicionamento de lodos de estações de tratamento de água visando o seu adensamento por gravidade.” *Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1181- 1192, Rio de Janeiro, Brasil.
- Freitas, J.G., Ferreira Filho, S.S. e Brink, N.C.P. (2005). “Análise do comportamento da etapa de condicionamento e desidratação de lodos de ETAs e ETEs mediante a execução de ensaios de resistência específica e tempo de filtração.” *Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1-13, Campo Grande, Brasil.
- Gonçalves, R.F., Barreto, E., Brandão, J. e Piotto, Z. (1999). “Recuperação de coagulantes de lodos de estações de tratamento de águas.” In: Reali, M.A.P. (coord.) *Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 203-225.
- Gregory, R. e Zabel, T.F. (1990). “Sedimentation and Flotation.” In: Pontius, F.W. (ed.). *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. 4ª edição. American Water Works Association. McGraw-Hill, Inc., E.U.A., 367-451.
- Harbour, P.J., Anderson, N.J., Aziz, A.A.A, Dixon, D.R., Hillis, P., Stickland. A.D. e Tillotson, M. (2004). “Fundamental dewatering characteristics of potable water treatment sludges.” *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, **53**(1), 29-36.
- Hoppen, C., Portella, K.F., Sales, A., Joukoski, A. (2003). “Estudo da incorporação do lodo centrifugado da estação de tratamento de água de Passaúna em matriz de concreto com dosagem de 3%.” *Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Joinville, Brasil.
- Janssens, J G. e Buekens, A. (1993). “Assesment of process selection for particle removal in surface water treatment.” *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, **42**(5), 279-288.
- Kawamoto, P.H. e Ferreira Filho, S.S. (2000). “Efeito da oxidação química no processo do condicionamento e desidratação de lodos de estações de tratamento de água.” *Anais do IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 409-418, Porto Seguro, Brasil.
- Kawamura, S. (2000). *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*. John Wiley & Sons, Inc., New York, E.U.A., 691p.
- 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, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil, 118p.
- Lee, C.H., Liu, J.C. (2001). "Sludge dewaterability and floc structure in dual polymer conditioning." *Advances in Environmental Researches*, **5**, 129-136.
- Leme (1996). *Melhoria e Ampliação da ETA-Brasília – Experimentos Piloto e de Laboratório – Relatório*. Leme Engenharia, Brasília, Brasil.
- Marwell, D.T.B. (2004). *Estudo da Desidratação por Centrifugação do Lodo Produzido do Flotador da ETA Piloto Brasília*. Monografia de Projeto Final, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil, 62p.
- Máximo, M.C. (2003). *Estudo Preliminar da Tratabilidade dos Lodos da Futura ETA Brasília*. Monografia de Projeto Final, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil, 95p.
- Mendes, R.L., Ferreira Filho, S.S., Scian, J.B. (2001) "Desaguamento mecânico por filtro prensa de placas de lodos gerados em estações de tratamento de água." *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil.
- Metcalf & Eddy (1991). "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse." McGraw-Hill, Inc., International Edition, Singapura, 1333p.
- Novaes, R.M., Isaac, R.L., Morita, D.M., Andrade, P.S. (2005). "Viabilidade técnica da incorporação do lodo dos decantadores das estações de tratamento de água 3 e 4 de Campinas em blocos cerâmicos." *Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Campo Grande, Brasil.
- Pan, J.R., Huang, C., Chuang, Y., Wu, C. (1999). "Dewatering characteristics of algae-containing alum sludge." *Colloids and Surfaces*, **150**, 185-190.
- Pan, J.R., Huang, C., Cherng, M., Li, K., Lin, C. (2003). "Correlation between dewatering index and dewatering performance of three mechanical dewatering devices." *Advances in Environmental Research*, **7**, 599-602.
- Patrizzi, L.J., Reali, M.A.P. e Cordeiro, J. S. (1999). "Redução de volume de lodo gerado em decantadores de estações de tratamento de água utilizando espessamento por flotação e por gravidade." *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1126-1135, Rio de Janeiro, Brasil.
- Porras, A.C., Isaac, R.L., Morita, D.M. (2005). "Viabilidade técnica da incorporação do lodo dos decantadores das estações de tratamento de água 3 e 4 de Campinas em tijolos estabilizados com cimento." *Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Campo Grande, Brasil.

- Reali, M.A.P. (1999). “Principais características quantitativas e qualitativas do lodo em ETAs.” In: Reali, M.A.P. (coord.) *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 21-41.
- Reali, M.A.P. e Patrizzi, L.J. (1999). “Espessamento de lodos de ETAs.” In: Reali, M.A.P. (coord.) *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 41-84p.
- Reali, M.A.P., Patrizzi, L.J. e Cordeiro, J.S. (1999a). “Desidratação de lodo por centrifugação.” In: Reali, M.A.P. (coord.) *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água*. ABES, Rio de Janeiro, Brasil, 85-106.
- Reali, M.A.P., Patrizzi, L.J. e Cordeiro, J.S. (1999b). “Proposição de método para ensaios de remoção de água de lodos por centrifugação.” *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Richter, C.A. (2001). *Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água*. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 102p.
- Russel, J, Peck, J., Stephens, T., Browne, D., Semon, J., Shepherd, Newkirk, D.D. (1996). “Water treatment residuals processing.” In: EPA, NRMRL, ASCE e AWWA (coord.) *Manuals and reports of engineering practice, nº 88 - management of water treatment plant residuals*. E.U.A., 17-40p.
- Russell, J.S., Peck, B.E. (1997). “Process Residuals.” In: Hager, L. (ed.) *Water Treatment Plant Design*. 3ª edição. American Water Works Association/American Society of Civil Engineers. McGraw-Hill, Inc., E.U.A., 485-530p.
- Saron, A. e Silva, E.P. (1997). “Redução na dosagem de sulfato de alumínio na ETA Guaraú com a utilização do sistema de recuperação de água de lavagem dos filtros.” *Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1089-1095, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Sartori, H.J.F., Nunes, M.S. (1997). “Caracterização geotécnica de lodos provenientes de estações de tratamento de água e de esgotos sanitários.” *Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária*, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Scalize. P.S., Di Bernardo, L. e Seixas, A.S.S. (1997). “Pesquisa parasitológica no sobrenadante e no sedimento resultante após clarificação por sedimentação de água de lavagem de filtros de estações de tratamento de água.” *Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1127-1132, Rio de Janeiro, Brasil.

- Scalize, P.S. e Di Bernardo, L. (2000). “Caracterização da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água e dos filtros sobrenadantes e sedimentos obtidos após ensaios de clarificação utilizando polímero aniônico.” *Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Schofield, T. (1997). “Sludge removal and dewatering process for dissolved air flotation systems.” *Dissolved Air Flotation - International Conference April 1997*. CIWEM, 309-322, Londres, Inglaterra.
- Silva, M. e Brandão, C.C.S. (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.” *Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1031-1039, Joinville, Brasil.
- Souza, C.A. (2001). “Adensamento mecânico e desidratação por filtro prensa de esteira de lodos gerados em estações de tratamento de água.” *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil.
- Souza Filho, A.G. e Di Bernardo, L. (1999). “Caracterização e clarificação da água de lavagem dos filtros de uma ETA que utiliza cloreto férrico como coagulante primário.” *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1379-1387, Rio de Janeiro, Brasil.
- Teixeira, L.C.G.M. e Ferreira Filho, S.S. (1999). “Influência do tipo e da dosagem de polímero na capacidade de pré-adensamento de lodos gerados em estações de tratamento de água.” *Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1031-1039, Rio de Janeiro, Brasil.
- Tsutiya, M.T., Hirata, A.Y. (2001). “Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo.” *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa, Brasil.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency (2002), *Filter Backwash Recycling Rule – Technical Guidance Manual*. USEPA, E.U.A., 166p.
- Von Sperling, M. (1996). *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 211p.
- WHO – World Health Organization. (1993). *Guidelines for Drinking Water Quality – Vol. 1, Recommendations*. 2ª edição. WHO, França, 188p.

- Willis, J.R. (1997). "Clarification." In: Hager, L. (ed.). *Water Treatment Plant Design*. 3ª edição. American Water Works Association/American Society of Civil Engineers. McGraw-Hill, Inc., E.U.A., 111-152.
- Wolfe, T.A., Mickley, M., Novak, J., Harms, L., Sorg, T.J. (1996). "Characterization of Water treatment plant residuals." In: EPA, NRMRL, ASCE e AWWA (coord.) *Manuals and reports of engineering practice, nº 88 - management of water treatment plant residuals*. E.U.A., 41-72p.
- Wu, C.C., Huang, C., Lee, D.J. (1997). "Effects of polymer dosage on alum sludge dewatering characteristics and physical properties." *Colloids and Surfaces*, **122**, 89-96.
- Zhao, Y.Q., Papavasiliopoulos, E.N., Bache, D.H. (1998). "Clogging of filter medium by excess polymer during alum sludge filtration." *Filtration & Separation*, **35** (10), 947-950.
- Zhao, Y.Q. (2002). "Enhancement of alum sludge dewatering capacity by using gypsum as skeleton builder." *Colloids and Surfaces*, **212**, 205-212.
- Zhao, Y.Q., Papavasiliopoulos, E.N., Bache, D.H., Mackinnon, P.A. (2002). "Polymer conditioning of alum sludge and discrepancies between estimates of the optimum dosage." *Water Science and Technology*, **46** (10), 115-121.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA IB

ETA	Adensamento	Experimento	ST inicial Lodo (%)	Teor de sólidos na torta após desidratação em centrifuga (%), determinado por balanço de massa							
				Branco (sem condicionamento)	Pol. A	Pol. B	Pol. C	Pol. D	Pol. E	Pol. F	Pol. G
Brasília	Sedimentação	BS.SED6.CEN1	0,45%	5,09%	5,94%	5,94%	7,75%	7,13%	7,13%	5,94%	-
Brasília	Flotação	BS.FAD7.CEN2	1,75%	6,10%	6,38%	7,02%	7,02%	6,10%	7,02%	7,39%	-
Descoberto	Sedimentação	RD.SED1.CEN1	3,08%	24,64%	27,38%	30,80%	30,80%	30,80%	27,38%	30,80%	-
Brasília	Sedimentação	BS.SED7.CEN2	0,44%	5,55%	-	-	9,87%	-	-	8,08%	8,88%
Brasília	Flotação	BS.FAD8.CEN3	1,90%	6,32%	-	-	8,43%	-	-	8,62%	7,74%
Descoberto	Sedimentação	RD.SED2.CEN2	2,80%	32,03%	-	-	35,03%	-	-	35,03%	35,03%
Descoberto	Flotação	RD.FAD1.CEN1	3,06%	30,58%	-	-	33,06%	-	-	29,12%	29,12%

Legenda: ST – Sólidos Totais

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS ESTUDADOS NA ETAPA II

ETA	Adensamento	Característica	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Média	Desvio Padrão
Brasília	Flotação	Sólidos Totais (%)	1,81%	1,77%	2,29%	2,40%	2,18%	2,09%	0,3%
		Sólidos Voláteis (%ST)	48%	51%	58%	54%	52%	52%	3,8%
		relação DQO/ST	0,66	0,68	0,45	0,49	0,69	0,59	0,11
		pH	6,6	6,5	6,2	6,5	6,2	6,4	0,2
		Resistência Específica (m/kg)	3,5E+13	5,4E+13	1,8E+13	6,5E+13	1,1E+13	3,6E+13	2,3E+13
	Sedimentação	Sólidos Totais (%)	0,47%	0,51%	0,59%	0,73%	0,76%	0,61%	0,1%
		Sólidos Voláteis (%ST)	51%	50%	60%	53%	52%	53%	4,2%
		relação DQO/ST	0,56	0,61	0,47	0,47	0,77	0,57	0,12
		pH	6,6	6,5	6,3	5,9	6,0	6,3	0,3
		Resistência Específica (m/kg)	5,3E+12	1,3E+13	7,0E+12	1,8E+13	3,6E+12	9,4E+12	6,0E+12
Descoberto	Flotação	Sólidos Totais (%)	3,33%	4,62%	4,59%	1,39%	3,84%	3,56%	1,3%
		Sólidos Voláteis (%ST)	23%	22%	26%	28%	22%	24%	2,4%
		relação DQO/ST	0,17	0,13	0,47	0,17	0,12	0,21	0,1
		pH	7,1	6,9	6,6	6,5	7,8	7,0	0,5
		Resistência Específica (m/kg)	7,1E+12	3,4E+12	3,1E+12	9,1E+12	8,1E+11	4,7E+12	3,3E+12
	Sedimentação	Sólidos Totais (%)	2,10%	4,78%	5,06%	7,35%	8,32%	5,52%	2,4%
		Sólidos Voláteis (%ST)	23%	23%	27%	24%	25%	25%	1,6%
		relação DQO/ST	0,15	0,16	0,50	0,18	0,11	0,22	0,2
		pH	6,9	6,2	6,1	6,5	6,8	6,5	0,4
		Resistência Específica (m/kg)	4,6E+12	2,5E+12	1,2E+12	8,3E+11	1,4E+12	2,1E+12	1,5E+12

APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA II

ETA	Adensamento	Experimento	ST inicial Lodo	Sólidos totais na torta após desidratação em centrífuga, calculado por determinação direta			
				Branco (sem condic.)	Polímero aniônico	Polímero não-iônico	Polímero catiônico
Brasília	Flotação	Experimento 1	1,81%	6,10%	6,67%	6,24%	6,56%
		Experimento 2	1,77%	5,77%	7,58%	6,26%	7,05%
		Experimento 3	2,29%	5,93%	8,28%	6,46%	7,84%
		Experimento 4	2,40%	5,65%	6,74%	6,20%	6,66%
		Experimento 5	2,18%	5,83%	7,37%	6,57%	7,78%
		Média	2,09%	5,86%	7,33%	6,34%	7,18%
		Desvio Padrão	0,29%	0,17%	0,66%	0,16%	0,61%
	Sedimentação	Experimento 1	0,47%	5,23%	5,91%	5,79%	5,88%
		Experimento 2	0,51%	4,91%	5,37%	5,13%	5,36%
		Experimento 3	0,59%	5,05%	5,33%	5,28%	5,28%
		Experimento 4	0,73%	6,07%	6,37%	5,88%	6,60%
		Experimento 5	0,76%	5,54%	6,15%	5,64%	5,94%
		Média	0,61%	5,36%	5,83%	5,54%	5,81%
		Desvio Padrão	0,13%	0,46%	0,46%	0,32%	0,53%
Descoberto	Flotação	Experimento 1	3,33%	21,31%	24,74%	23,90%	23,80%
		Experimento 2	4,62%	19,06%	25,95%	21,48%	24,54%
		Experimento 3	4,59%	19,45%	25,05%	23,54%	25,71%
		Experimento 4	1,39%	19,71%	19,66%	20,11%	20,92%
		Experimento 5	3,84%	26,07%	27,87%	28,73%	28,03%
		Média	3,56%	21,12%	24,66%	23,55%	24,60%
		Desvio Padrão	1,33%	2,90%	3,05%	3,28%	2,61%
	Sedimentação	Experimento 1	2,10%	20,55%	22,16%	20,38%	20,38%
		Experimento 2	4,78%	22,76%	24,92%	25,53%	24,01%
		Experimento 3	5,06%	23,56%	22,98%	23,59%	23,13%
		Experimento 4	7,35%	28,91%	30,18%	29,83%	30,74%
		Experimento 5	8,32%	25,86%	28,87%	26,36%	27,73%
		Média	5,52%	24,33%	25,82%	25,14%	25,20%
		Desvio Padrão	2,43%	3,19%	3,56%	3,49%	4,06%