

**NOÇÕES GERAIS DE
TRATAMENTO
E DISPOSIÇÃO FINAL
DE LODOS DE ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ÁGUA**



REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS

NOÇÕES GERAIS DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

INSTITUIÇÕES PARTICIPANTES

**Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES**



AUTORES

Aloysio G. de Souza – USP

Elsa Barreto – UFES

Eraldo H. de Carvalho – USP

Janete Brandão – UFES

João Sérgio Cordeiro – UFSCar

Leila Jorge Patrizzi – USP

Luiz Di Bernardo – USP

Marco Antonio Penalva Reali – USP

Paulo Sérgio Scalize – USP

Ricardo Franci Gonçalves – UFES

Zeila Piotto – UFES



Apresentação

Esta publicação é um dos produtos resultantes da Rede de Pesquisas formada no âmbito do Edital 01 do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) em torno do tema *Técnicas de Tratamento de Efluentes Líquidos de Estações de Tratamento de Águas*, e que foi coordenada pelo Prof. Marco Antonio Penalva Reali, do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos-USP.

Gerido pela FINEP, o PROSAB tem por prioridade o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de tecnologias voltadas para a ampliação da cobertura dos serviços de saneamento e, conseqüentemente, para a melhoria das condições de vida da população brasileira. Para tanto, o programa financia redes cooperativas de pesquisas nas áreas de águas de abastecimento, águas residuárias e resíduos sólidos que tenham por base a revisão do padrão tecnológico atual, estabelecendo normas e padrões adequados às particularidades regionais e locais de um país com escassez de recursos e de dimensão continental como o Brasil, e que observem, sempre, a necessidade de preservar ou recuperar o meio ambiente.

A implementação do PROSAB por meio de redes de pesquisas cooperativas se deve a múltiplos fatores, dentre os quais destaca-se a abordagem integrada das ações dentro de um determinado tema, o que otimiza a aplicação dos recursos e evita a duplicidade e a pulverização de iniciativas. As redes incentivam a integração entre os pesquisadores das diferentes instituições, possibilitam a disseminação da informação entre seus integrantes e promovem a capacitação permanente de instituições emergentes, além de permitir a padronização de metodologias de análise e estimular o desenvolvimento de parcerias.

Um grupo interinstitucional, responsável pela coordenação do PROSAB, orienta as ações de fomento, definindo, periodicamente, os temas prioritários para a formação das redes cooperativas de pesquisas e que são tornados públicos por meio de editais. Esse grupo coordenador auxilia a FINEP e o CNPq na tomada de decisões, emitindo parecer sobre as propostas apresentadas, indicando consultores *ad hoc*, acompanhando permanentemente o programa e corrigindo desvios quando necessário. Já foram lançados, até o momento, dois editais do PROSAB envolvendo 17 e 27 grupos de pesquisa, respectivamente, contando com recursos financeiros da FINEP, CNPq, CAIXA e CAPES, e o apoio da ABES e da SEPURB.

A divulgação das realizações do programa é feita por meio da home page do PROSAB (<http://www.sanepar.pr.gov.br/prosab>), da publicação de artigos na revista *BIO* da ABES, da apresentação do programa em diversos eventos da área, do portfólio dos projetos e da publicação de livros e manuais para distribuição às prefeituras e aos órgãos de serviços de saneamento. Os resultados finais dos projetos desenvolvidos no âmbito de cada edital também são publicados sob a forma de coletânea de artigos.





GRUPO COORDENADOR DO PROSAB

Prof. Jurandyr Povinelli – EESC
jpovinel@sc.usp.br

Prof. Cícero O. de Andrade Neto – UFRN
cicero@ct.ufrn.br

Deíza Lara Pinto – CNPq
dcorrea@sc.usp.br

Wilson Auerswald – CNPq
Wilson_Auerswald@sirius.cnpq.br

Marcos Helano Montenegro – CAESB
marcoshelano@yahoo.com

Anna Virgínia Machado – ABES
annav@ax.apc.org

Sandra Bondarowsky – CAIXA
cbarroso@ruralrj.com.br

Dalmo Albuquerque Lima – MCT
dalmo@mct.gov.br

Elisabete Pinto Guedes – FINEP
epguedes@finep.gov.br

Célia Maria Poppe de Figueiredo
cmfigue@finep.gov.br



RECOPE – REDE COOPERATIVA DE PESQUISA

O RECOPE, subprograma do PRODENGE, apoiado com recursos do contrato de financiamento FINEP-BID 880-OC/BR, contempla o desenvolvimento de redes de pesquisas em áreas prioritárias da engenharia, envolvendo a interação entre instituições de pesquisa e empresas.

O PROSAB inclui-se no RECOPE.



Marco Antonio Penalva Reali
(coordenador)

NOÇÕES GERAIS DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Rio de Janeiro – RJ
1999

Copyright © 1999 ABES – RJ

1ª Edição – tiragem: 1.500 exemplares

Projeto gráfico, revisão, editoração eletrônica e fotolitos:

RiMa Artes e Textos
Av. Dr. Carlos Botelho, 1816, salas 30/31
CEP 13560-250 – São Carlos-SP
Fone: 0xx 16 272-5269 – Fax: 0xx 16 2723264

Coordenador e revisor técnico:

Marco Antonio Penalva Reali
mapreali@sc.usp.br

Financiamento dos serviços de editoração eletrônica, revisão e projeto gráfico:

Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial – FIPAI,
da Escola de Engenharia de São Carlos – USP

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

T776 Noções gerais de tratamento e disposição final
 de lodos de estações de tratamento de água /
 Marco Antonio Penalva Reali (coordenador). --
 Rio de Janeiro : ABES, 1999.
 240 p. : il.
 Projeto PROSAB.

1. Lodos. 2. Lodos de ETAs. 3. Tratamento de
lodos. 4. Desidratação de lodos. 5. Resíduos de
ETAs. I. Reali, Marco Antonio Penalva.

Agradecimentos

Agradecemos ao Departamento de Hidráulica e Saneamento e à Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial (Fipai), ambos da Escola de Engenharia de São Carlos, USP, pelo financiamento dos serviços de revisão de texto e editoração eletrônica do presente livro.

Sumário

Prefácio	XIII
Capítulo 1 – Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs	1
1.1 Introdução	1
1.2 Os Sistemas de Tratamento de Água e os Resíduos Gerados	2
1.3 Estado da Arte e Características Gerais dos Resíduos	5
1.4 Impactos Ambientais e Toxicidade dos Resíduos de ETAs	8
1.5 Busca de Alternativas de Redução de Volume	15
1.6 Referências Bibliográficas	18
Capítulo 2 – Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAs	21
2.1 Considerações Iniciais	21
2.2 Lodos de ETAs: Estratégias Usuais de Remoção de Água e de Destinação Final	22
2.3 Origem e Caracterização Qualitativa e Quantitativa dos Lodos de ETAs Convencionais	28
2.4 Exemplo (Hipotético) Ilustrativo dos Volumes de Lodo Presentes nas Várias Etapas de Tratamento em ETAs Convencionais	36
2.5 Referências Bibliográficas	39
Capítulo 3 – Espessamento de Lodos de ETAs	41
3.1 Considerações Iniciais	41
3.2 Tipos de Unidades de Espessamento de Lodo	41
3.3 Parâmetros de Projeto e Ensaios de Laboratório para Análise do Espessamento de Lodo por Gravidade	46
Principais Parâmetros de Projeto de Espessadores por Gravidade	46
Análise da Sedimentação de Lodos Durante Seu Espessamento por Gravidade	48

3.4	Parâmetros de Projeto e Ensaio de Laboratório para Análise do Espessamento de Lodo por Flotação por Ar Dissolvido (FAD)	51
	Principais Parâmetros de Projeto de Espessadores por Flotação	51
	Método Proposto para Obtenção de Parâmetros Básicos de Espessamento por Flotação com Base em Ensaio com Colunas de Flotação em Escala de Laboratório	54
3.5	Estudos de Casos	61
	Considerações Iniciais	61
	Estudo de Caso 1: Lodo da ETA Capim Fino de Piracicaba, SP	61
	Discussão dos Resultados Referentes aos Ensaio de Espessamento por Flotação (Lodo da ETA Capim Fino)	63
	Resultados dos Ensaio de Espessamento por Gravidade (Lodo da ETA Capim Fino)	68
	Comparação dos Resultados dos Ensaio de Espessamento por Flotação e por Gravidade do Lodo da ETA Capim Fino	71
	Conclusões Referentes ao Estudo de Caso 1	73
	Estudo de Caso 2: Lodo da ETA Paiol de Araraquara, SP	73
	Resultados Referentes aos Ensaio de Espessamento de Lodo por Flotação	74
	Resultados dos Ensaio de Espessamento por Gravidade (Lodo da ETA Paiol)	78
	Comparação dos Melhores Resultados dos Ensaio de Espessamento por Flotação e por Gravidade do Lodo da ETA Paiol	81
	Conclusões Referentes ao Estudo de Caso 2	83
3.4	Referências Bibliográficas	83
Capítulo 4 – Desidratação de Lodo por Centrifugação		85
4.1	Considerações Iniciais	85
4.2	Princípios Básicos da Centrifugação	87
4.3	Tipos e Características Básicas dos Equipamentos Utilizados em Centrifugação de Lodos	89
	A) Tambor cilíndrico	94
	B) Rosca sem fim	96
	C) Parâmetros básicos de interesse para o usuário de centrífugas	96
4.4	Descrição do Método para Realização de Ensaio de Laboratório Visando à Escolha do Tipo e Dosagem de Polímero na Centrifugação de Lodos	97
	Materiais e Equipamentos Necessários	97
	Procedimentos	99
	Aplicação do Método: Estudo de Caso	102
4.5	Referências Bibliográficas	105

Capítulo 5 – Remoção de Água de Lodos de ETAs Através de Filtração Forçada	107
5.1 Generalidades	107
5.2 Filtro-prensa	107
5.3 Prensa Desaguadora	117
5.4 Filtro a Vácuo	119
5.5 Considerações Finais	122
5.6 Referências Bibliográficas	123
Capítulo 6 – Remoção Natural de Água de Lodos de ETAs Utilizando Leitos de Secagem e Lagoas de Lodo	125
6.1 Generalidades	125
6.2 Sistemas de Leitos de Secagem Alternativos	128
Leitos de Secagem a Vácuo	128
Leito de Secagem de Tela em Cunha	129
6.3 Aplicações de Leitos de Secagem para Remoção de Água de Lodos de ETAs	130
6.4 Lagoas de Lodo	135
6.6 Considerações Finais	139
6.7 Referências Bibliográficas	140
Capítulo 7 – Água de Lavagem de Filtros Rápidos	143
7.1 Introdução	143
7.2 Origem e Caracterização Qualitativa e Quantitativa	143
7.3 Importância e Influência do Tipo de Operação da Filtração	144
7.4 Tratamento do Resíduo Líquido e Reuso da Fase Clarificada	146
Condicionamento/Adensamento dos Resíduos Líquidos das ETAs	149
Recirculação Água de Lavagem dos Filtros	150
Destinação do Lodo Resultante	151
7.5 Ensaio de Laboratório e Exemplos	153
7.6 Referências Bibliográficas	167
Capítulo 8 – Disposição de Resíduos Líquidos de ETAs em ETEs	169
8.1 Introdução	169
8.2 Fatores Relacionados à Operação das Estações de Tratamento de Água Que Interferem nas Características de Seus Resíduos Líquidos	170
Tipo de Decantador e Procedimento de Limpeza	170
Lavagem dos Filtros – Procedimento e Freqüência	173
8.3 Alternativas de Disposição dos Resíduos Líquidos Gerados nas ETAs nas Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs	176
Disposição dos Resíduos Líquidos de ETAs nas ETEs	176

Reuso da Fase Líquida dos Resíduos Líquidos da Limpeza de Decantadores e Filtros Após Clarificação e Lançamento do Lodo Resultante na ETE	176
Disposição do Lodo Obtido na Clarificação da Água de Lavagem de Filtros e os Resíduos Líquidos da Limpeza dos Decantadores na ETE	176
8.4 Estudos de Caso de Disposição dos Resíduos Líquidos de ETAs em ETEs	177
Estudo de Caso 1	177
Simulação do Lançamento Direto das Descargas de Decantadores e das Lavagens de Filtros na ETE	177
Simulação do Lançamento das Descargas dos Decantadores com o Lodo Obtido na Clarificação da Água de Lavagem dos Filtros na ETE	181
Estudo de Caso 2	185
Características das ETAs	185
Características dos Resíduos Líquidos	188
Clarificação do Resíduo Líquido da Lavagem do Filtro	190
Preparação e Caracterização das Amostras dos Resíduos da ETA a serem Misturadas com o Afluente à ETE	190
Caracterização do Esgoto Afluente à ETE	194
Ensaio com os Resíduos da ETA Misturados ao Esgoto Afluente à ETE	194
Interferência dos Resíduos da ETA na Digestão Anaeróbia de Lodo ...	195
Considerações Finais sobre o Estudo de Caso 2	198
8.9 Referências Bibliográficas	201

Capítulo 9 – Recuperação de Coagulantes de Lodos

de Estações de Tratamento de Águas	203
9.1 Introdução	203
9.2 Processos de Recuperação de Coagulantes	206
Recuperação de Coagulantes pela Via Ácida	207
Recuperação de Coagulantes pela Via Alcalina	208
Recuperação de Coagulantes via Extração com Solventes Orgânicos	209
Recuperação por Complexação/Quelação	209
9.3 Recuperação pela Via Ácida – Experimentos Realizados pela UFES	209
Características das ETAs e dos Lodos Estudados	209
Influência das Características do Lodo e da Água Bruta na Recuperação de Coagulantes dos Lodos	212
Utilização dos Coagulantes Recuperados	215
9.4 Noções de Custos	216
Situações Estudadas	220
9.5 Referências Bibliográficas	224

Capítulo 1

Importância do Tratamento e Disposição Adequada dos Lodos de ETAs

João Sérgio Cordeiro

1.1 Introdução

O homem busca, dentro de todas as suas atividades, a melhoria da qualidade de vida que se reflete, entre outras coisas, nas condições de habitação e infra-estrutura. Nas áreas urbanas, os sistemas de abastecimento de água e de coleta de esgotos sanitários são serviços essenciais.

O ar, a água e o solo são elementos fundamentais para que se estabeleça o equilíbrio homem–natureza. Observa-se, hoje, que essa harmonia não tem ocorrido adequadamente, acarretando a deterioração de recursos naturais, podendo prejudicar a utilização dos mesmos.

O crescimento populacional tem solicitado uma demanda sempre crescente de água com boa qualidade, enquanto a geração de águas residuárias sanitárias e industriais é cada dia maior, fazendo com que a degradação do meio ambiente aumente, quando esses problemas não são equacionados de forma coerente. O processo de urbanização provocou uma inversão na ocupação das áreas urbanas, fazendo com que, hoje, no Brasil, cerca de 75% habite nessas regiões.

As bacias hidrográficas dos grandes centros urbanos têm sofrido ações negativas intensas, com comprometimento rápido da qualidade. Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o reuso da água já é uma realidade, pois a disponibilidade de água com boa qualidade é cada vez mais rara.

A indústria da água de abastecimento, quando utiliza o tratamento completo ou convencional (coagulação, floculação, decantação e filtração), transforma água inadequada para o consumo humano em um produto que esteja em acordo com o padrão de potabilidade, utilizando, para isso, processos e operações com a introdução de produtos químicos, gerando resíduos. Estes têm origem nos decantadores, na lavagem dos filtros e na lavagem dos tanques de preparação de soluções e suspensões de produtos químicos.

Na América Latina e particularmente no Brasil poucos têm sido os estudos realizados sobre o assunto, que já começa trazer preocupações. A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) gerencia o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), que consome cerca de 60.000 L/s de água e gera, em suas estações de tratamento de água (ETAs), aproximadamente 2.200 L/s de águas de lavagem de filtros e resíduos dos decantadores Sabesp, RMSP, 1987,⁽²⁸⁾ que não têm sido dispostos adequadamente.

Vários questionamentos sobre as características, produção e impactos ambientais desses resíduos ainda não possuem respostas satisfatórias que possibilitem o equacionamento do problema. Isto se deve à grande carência de pesquisas científicas e tecnológicas sobre o tema, e os poucos dados existentes no Brasil estão totalmente dispersos, o que dificulta as ações nesse campo. Além disso, não existe, por parte da grande maioria dos técnicos envolvidos no setor, conscientização efetiva sobre a importância do assunto.

A indústria da água tem questionado, cada dia mais, a preservação da qualidade da água bruta captada, através de ações que lhe garanta a proteção dos mananciais, e, por outro lado, lança seus resíduos no corpo d'água mais próximo, sem se preocupar com os questionamentos levantados anteriormente, o que mostra certa incoerência.

1.2 Os Sistemas de Tratamento de Água e os Resíduos Gerados

Os sistemas de abastecimento de água para população urbana envolve uma série de sub-sistemas, dos quais a estação de tratamento de água é parte fundamental, quando se utilizam mananciais superficiais.

Dentre essas *estações*, o sistema tradicional ou completo de tratamento é utilizado pela maioria. Esse sistema realiza a remoção de partículas finas em suspensão e em solução presentes na água bruta. Para que o processo seja bem-sucedido é necessária a aplicação de produtos químicos que possam desestabilizar as partículas coloidais, formando flocos com tamanho suficiente para sua posterior remoção. Nesse processo são utilizados sais de ferro e de alumínio, os quais, através de suas cargas, são capazes de provocar a desestabilização de partículas. A ação desses sais na formação dos flocos

exige operações unitárias de rápida mistura para dispersão desse coagulante e câmaras de mistura lenta para a formação final do floco.

Após a formação desses, é necessária sua remoção para clarificação da água, operação realizada nos decantadores, que são grandes tanques onde esse material sedimentado fica retido durante certo período de tempo.

A água decantada com parte dos flocos que não sedimentam é encaminhada aos filtros para clarificação final. Assim, grande parcela dos flocos fica retida nos decantadores e outra parcela, nos filtros. Por meio dessas operações, a estação de tratamento de água produz água para abastecimento e gera resíduos: lodos acumulados nos decantadores e água de lavagem dos filtros.

Os resíduos gerados nos decantadores, nos sistemas tradicionais, podem ficar retidos durante vários dias (30, 40, 60) ou algumas horas, dependendo da forma de limpeza utilizada nos tanques, e posteriormente são lançados no ambiente, normalmente cursos d'água próximos às ETAs. Essa prática vai de encontro à legislação vigente, pois pode alterar consideravelmente as características desse corpo receptor.

Levantamento realizado por Cordeiro⁽⁶⁾ mostrou que a sistemática de gestão das ETAs é bastante parecida em todo o Brasil, particularmente no Estado de São Paulo. Dessa forma, diariamente são gerados no Brasil alguns milhões de toneladas de rejeitos que são dispostos no ambiente.

No caso dos decantadores, os lodos são enquadrados como “resíduos sólidos” pela NBR-10004 (1989) e portanto, devem ser tratados e dispostos dentro dos critérios estabelecidos por essa norma.

Sistemas de tratamento de água de abastecimento têm características similares a qualquer indústria, onde uma determinada matéria-prima é trabalhada através de diversas operações e processos, resultando em um produto final. Esses sistemas podem, em diversas etapas, gerar resíduos, e estes podem possuir as mais diferenciadas características, relacionadas à matéria-prima, aos produtos químicos adicionados, ao *layout* da estação, às etapas definidas no projeto, às condições de operação entre outros.

Tradicionalmente, no Brasil, a maior preocupação tem sido em relação aos resíduos gerados em estações de tratamento de esgotos (ETEs), e pouco tem sido discutido em relação aos resíduos gerados em estações de tratamento de água de abastecimento (ETAs).

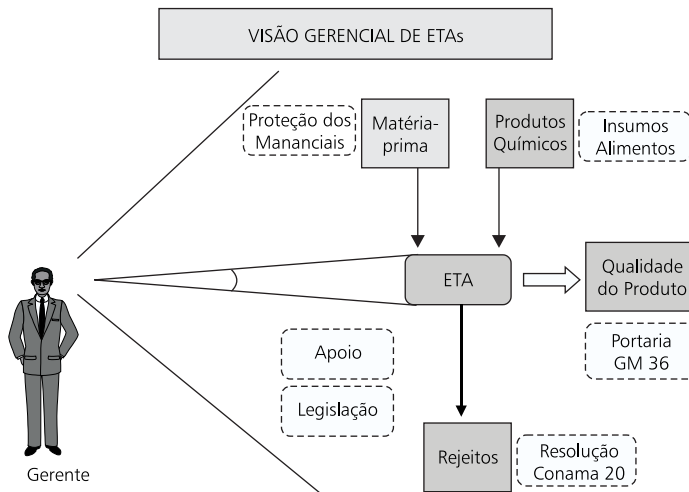
Esses resíduos gerados caracterizam-se por possuírem grande umidade, geralmente maior que 95%, estando, de maneira geral, sob forma fluida. Um dos objetivos de trabalhar com esse resíduo seria a redução de seu volume, para que o mesmo possa ser

disposto de forma adequada, diminuindo custos de transporte, disposição final e, obviamente, os riscos de poluição do meio ambiente.

Por outro lado, a introdução das séries de normas ISO 9000 e ISO 14000 tem propiciado discussões que apresentam como enfoque a melhoria dos serviços prestados à população. Nesse aspecto, o gerenciamento adequado dos sistemas de tratamento de águas de abastecimento e residuárias será fundamental para que os mesmos não prejudiquem o meio ambiente. Para tanto, os responsáveis por essa gestão devem estar devidamente preparados para equacionar os problemas que exigem ampla visão do funcionamento dos sistemas operados.

Analisando-se o esquema da Figura 1.1 pode-se observar que a visão hoje existente nas gerências de sistemas de tratamento tem sido restrita ao produto final, não havendo maior preocupação com aspectos como: proteção efetiva dos mananciais, qualidade dos produtos químicos empregados e quantidade e características dos resíduos gerados. Parsekian⁽¹⁸⁾ em seu trabalho detectou esses fatos.

A Figura 1.2 apresenta esquema de uma estação de tratamento de água convencional ou completa, onde os pontos de geração de resíduos podem ser observados.



Fonte: Parsekian.⁽¹⁸⁾

Figura 1.1 Visão holística do sistema de tratamento de água.

Os principais resíduos gerados na ETA são:

- água de lavagem dos filtros;
- lodos dos decantadores;
- rejeito de limpeza dos tanques de produtos químicos.

Esses resíduos têm características diferentes, como também frequências de descargas distintas, o que influencia no processo de tratamento ou “desidratação”. A “desidratação” ou remoção de parcela de água do lodo tem por objetivo a redução do volume.

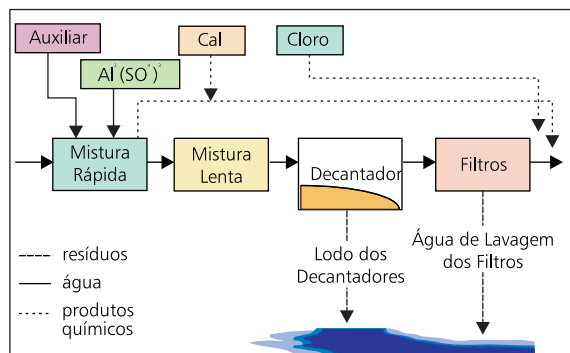


Figura 1.2 Pontos de geração de resíduos em uma ETA convencional.

1.3 Estado da Arte e Características Gerais dos Resíduos

Os lodos gerados nos decantadores das ETAs completas podem ter suas características bastante variadas, dependendo fundamentalmente das condições apresentadas pela água bruta, dosagens e produtos químicos utilizados, forma de limpeza dos decantadores, entre outros fatores.

Um dos grandes problemas hoje apresentados por essa questão é a falta de conhecimento sobre características não tradicionais dos sólidos presentes no lodo, tais como: tamanho e distribuição das partículas, resistência específica e compressibilidade. Mesmo as características tidas como tradicionais na engenharia sanitária e ambiental, têm pouca divulgação quanto aos lodos de ETAs. Na Tabela 1.1 apresenta-se um resumo de alguns parâmetros registrados na bibliografia consultada. Observando-se essa tabela pode-se verificar que os valores apresentados pelos parâmetros descritos mostram-se bem variáveis, evidenciando a diversidade entre as ETAs.

Cordeiro⁽⁶⁾ efetuou determinações de metais presentes nos sólidos dos lodos da ETA-São Carlos, Estado de São Paulo (Brasil), cujos resultados podem ser analisados na Tabela 1.2. Nessa tabela são também apresentados resultados de concentrações de metais em lodos gerados em decantadores em sistemas de tratamento de água na cidade de Piracicaba, São Paulo, Brasil.⁽²⁹⁾ Por meio desses resultados pode-se perceber que a concentração de metais predomina de maneira sensível na fase sólida do lodo.

Tabela 1.1 Características dos lodos gerados em ETAs.

Autor/Ano	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SS %ST
Neubauer (1968)	30 a 150	500 a 15.000	6,0 a 7,6	1.100 a 16.000	20% a 30%	-
Sutherland (1969)	100 a 232	669 a 1.100	7,0	4.300 a 14.000	25%	80%
Bugg (1970)	380	1.162 a 15.800	6,5 a 6,7	4.380 a 28.580	20%	-
Albrecht (1972)	30 a 100	500 a 10.000	5,0 a 7,0	3.000 a 15.000	20%	75%
Culp (1974)	40 a 150	340 a 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	20,7%	-
Vidal (1990)	449	3.487	6,0 a 7,4	21.972	15%	-
Vidal (1990)	173	1.776	6,7 a 7,1	6.300	73%	-
Cordeiro (1993)	-	5.600	6,4	30.275	26,3%	-
Patrizze (1998)	-	-	5,55	6.112	19%	-
Patrizze (1998)	-	-	6,8	6.281	-	-

Fonte: Cordeiro,⁽⁶⁾ adaptada.

Pode-se observar por meio dessas tabelas que existe grande diferença entre os resíduos gerados em estações de tratamento de água, mostrando a necessidade de equacionar o problema de forma quase individualizada.

Analisando-se as questões discutidas anteriormente nota-se que, no Brasil, pouca experiência existe em relação aos resíduos gerados em decantadores de ETAs completas. Esse aspecto mostra que, dessa forma, o impacto provocado pelo lançamento desse rejeito em cursos d'água é relativamente desconhecido. Estima-se que cerca de 2.000 toneladas de sólidos são lançados em coleções de água brasileiras sem nenhum tratamento.

Tabela 1.2 Concentração de metais presentes na fase sólida nos lodos de ETAs.

Metais	ETA 01*	ETA 02*	ETA 03*
Alumínio (mg/L)	3965,00	391	325
Bário (mg/L)	-	0,22	0,18
Cádmio (mg/L)	0,14	0,02	0,02
Cálcio (mg/L)	142,00	-	0,08
Chumbo (mg/L)	2,32	0,20	0,30
Cloreto	-	35	36,3
Cobre	1,47	0,12	0,20
Cromo total	3,82	0,06	0,09
Ferro total	3381,00	129	166
Ferro solúvel	-	6,14	0,12
Magnésio	27,00	2,87	1,38
Manganês	1,86	7,80	3,44
Manganês Solúvel	-	4,57	1,00
Mercurio	-	-	-
Níquel	2,70	0,14	0,12
Potássio	49,97	7,37	7,55
Sódio	311,00	29,3	63,0
Zinco	2,13	0,70	0,98

* Situadas no Estado de São Paulo.

Fonte: Cordeiro.⁽³⁾

O grande problema enfrentado diz respeito à ETAs que dispõem seus resíduos em intervalos de tempo acima de 20 dias. Esses rejeitos normalmente possuem concentrações de sólidos maiores que 2,5%, podendo provocar alterações consideráveis nessas águas. Por outro lado, esses resíduos são considerados pela legislação como “resíduos sólidos”, mostrando que os mesmos não poderiam estar sendo lançados dessa maneira. Assim, deve-se exigir dos gerentes de sistemas de tratamento de água uma nova postura diante dessa situação.

Dentre os parâmetros considerados não tradicionais necessários à caracterização dos lodos, o tamanho de partícula é fundamental. Os lodos dos decantadores apresentam partículas de pequeno tamanho, dificultando a remoção de água livre para redução de volume. Esse fato implica aumento da *resistência específica* que define a resistência oferecida pelo lodo à passagem de água por ele. Assim, quanto maior a resistência

específica, menor a capacidade de filtração da água. Esses parâmetros tornam-se fundamentais na caracterização dos lodos.

1.4 Impactos Ambientais e Toxicidade dos Resíduos de ETAs

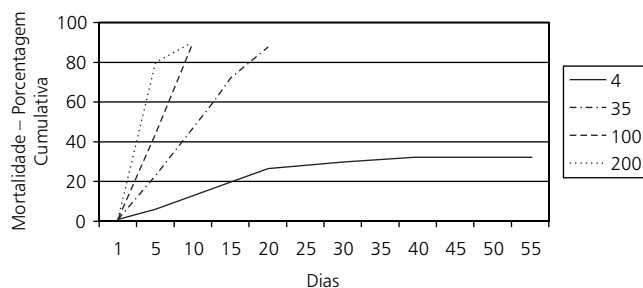
A toxicidade potencial dos lodos de estações de tratamento de água, para plantas, seres humanos e organismos aquáticos, depende de fatores tais como: características da água bruta; produtos químicos utilizados no tratamento; possíveis contaminantes contidos nesses produtos; reações químicas ocorridas durante o processo; forma de remoção e tempo de retenção dos resíduos nos decantadores; características hidráulicas, físicas, químicas e biológicas do corpo receptor etc.

As águas superficiais utilizadas como mananciais estão sujeitas à contaminação por formas naturais, decorrente da ação da água sobre as rochas e também por decorrência de ações sobre o meio, tais como: aplicação de fertilizantes, pesticidas e disposição de resíduos industriais. Este aspecto tem grande importância, pois essas substâncias poderão estar presentes nos resíduos gerados.

Quando é utilizado o sulfato de alumínio como coagulante primário, os possíveis compostos formados no processo dependerão do pH do meio, da presença de ligantes e hidróxidos na água bruta, segundo Driscoll et al.⁽²⁴⁾ Os caminhos da transferência do alumínio no tratamento da água é um fato complexo e poucos têm sido os trabalhos no sentido de melhor esclarecimento desses pontos. Esse transporte de formas de alumínio no processo pode se dar através da água filtrada e distribuída à população ou para as partículas retidas nos decantadores e nos filtros das ETAs.

Os resíduos dos decantadores têm em sua composição grandes concentrações de alumínio (Tabela 1.2), quando o sulfato de alumínio é utilizado como coagulante primário. Esse material, quando disposto em rios com baixa velocidade ou lagos, poderá causar problemas, principalmente na camada bentônica desses locais.

Estudos realizados por Lamb e Bailey, descritos por Cornwell,⁽⁸⁾ utilizando lodos resultantes do sulfato de alumínio, tiveram por objetivo determinar os efeitos agudos e crônicos desse material sobre *T. dissimilis*, que é representativo da família dos chironomídeos. Essa família de organismos ocupa porção significativa da camada bentônica, sendo importante na alimentação de peixes. A mortalidade dessas espécies, pode ser observada nos resultados mostrados na Figura 1.3. Verifica-se por meio desse estudo que a taxa de mortalidade das espécies aumenta com o aumento das dosagens de lodo. Acredita-se que pode ocorrer aumento na concentração de metais tóxicos no bentos, e além disso pode-se ter a inibição no movimento de pupas.



Fonte: Lamb & Balley (citados por Cornwell (1990)).

Figura 1.3 Mortalidade crônica de comunidades bentônicas invertebradas pela adição de lodos de sulfato de alumínio.

A toxicidade do alumínio tem sido pouco estudada nos meios científicos, apesar de já se possuírem dados que demonstram algumas preocupações quanto às ações desse elemento. Sendo o alumínio um elemento que está presente em grande parte do mundo, torna-se difícil, até certo ponto, determinar seus efeitos deletérios, e segundo a AWWA,⁽²⁾ é bem mais difícil detectar sua toxicidade do que a dos metais pesados

Scholfild e Trojnar, segundo Cornwell,⁽⁸⁾ realizando experiências com trutas, chegaram à conclusão de que o alumínio, em dosagens que variam de 0,2 a 0,5 mg/L, causavam a morte dessa espécie de peixes, mas não se conseguiu distinguir as espécies de alumínio presentes.

Freeman & Everhart (1971), citados pela AWWA,⁽²⁾ também realizando experiências com trutas, em aquários com dosagens de Al de 0,05, 0,52 e 5,2 mg/L e variando o pH, notaram que as condições físicas dos peixes sofreram bruscas mudanças, podendo ser citadas: apatia e desânimo generalizado, sintoma de inabilidade para se manterem em equilíbrio, coloração escurecida e baixa na percepção. Observou-se que o pH foi um importante parâmetro na definição dessas causas.

Hall et al. (1985), citados pela AWWA,⁽²⁾ promoveram estudos, adicionando alumínio em pequenos rios e efetuando o monitoramento biológico. Esse aumento de concentração de alumínio provocou alterações físicas, químicas e biológicas nessas águas. Observou-se que as comunidades macrobentônicas sofreram variações em sua estrutura, distribuição, abundância e diversidade. Houve redução da tensão superficial, provocando a alteração na biota aquática.

Driscoll et al.,⁽²⁴⁾ segundo Cornwell,⁽⁸⁾ estudando a toxicidade do alumínio para pequenos peixes, concluíram que formas inorgânicas de alumínio parecem ser as espécies de maior significado na toxicidade.

Segundo Roberto & Abreu,⁽²¹⁾ “os fatores biológicos, químicos e físicos que alteram as condições ambientais, predispondo os peixes a enfermidades diversas, tornando-os fracos, suscetíveis à infestações e podendo levá-los à morte, são tidos como enfermidades ecológicas”. Raciocinando dessa forma, o alumínio age de maneira a interferir negativamente no meio ambiente.

Bourbigot et al.⁽³⁾ citam que, em relação ao homem, estudos têm mostrado que a concentração de alumínio não é crítica em nível de células renais, quando estas permitem uma rápida eliminação desse elemento, através das excreções. Se, por ventura, essas células não funcionarem bem, existe a possibilidade de o alumínio se concentrar em outras células, como as cerebrais e cardíacas, por exemplo. Esse fato poderá ser altamente nocivo, afetando de maneira ainda pouco conhecida o funcionamento dessas células. O autor ainda cita trabalhos que têm revelado que as taxas desse metal estão intimamente relacionadas com estados clínicos de encefalopatias crônicas e deficiências renais.

Trabalhos de Davison et al., citados por Miller,⁽¹³⁾ detectou que pacientes submetidos à diálise sofriam de demência quando a água utilizada possuía concentração de alumínio acima de 0,08 mg/L.

Para Thomas M. Redicdit,⁽²⁰⁾ o alumínio tem uma importância crítica em doenças cardiovasculares, como a coagulação cardiovascular. O autor considera que os cátions trivalentes têm grande significado no processo de estabelecimento dessas doenças. Nos relatos dessa pesquisa, há ainda fortes suspeitas de que altas concentrações de alumínio podem estar diretamente ligadas ao mal de Alzheimer.

Miller et al.⁽¹³⁾ mostraram que as concentrações de alumínio nas águas de abastecimento pode aumentar com a utilização de sulfato de alumínio como coagulante. Esse trabalho foi realizado em 186 estações de tratamento de água, espalhadas por todo os EUA, revelando que existe 40% a 50% de chance de haver concentrações mais elevadas de alumínio na saída em relação à entrada da ETA.

Além dos aspectos relativos à saúde, concentrações elevadas de alumínio podem, segundo Miller:⁽¹³⁾

- reduzir a efetividade da desinfecção da água;
- aumentar a turbidez da água tratada;
- provocar a deposição de alumínio nas paredes dos tubos.

Por meio dos dados relatados anteriormente, mostrando a possível toxicidade do alumínio para o meio e o homem, fica evidente que os padrões de potabilidade e de emissão de afluentes devem ser estudados e fixados com mais rigor.

Através da Portaria nº 36/MS, de 19 de janeiro de 1990, e publicado no Diário Oficial da União em 23 de janeiro de 1990, o Ministério da Saúde aprovou as Normas e o Padrão de Potabilidade da Água para o Consumo Humano. Dessa forma, o alumínio teve seu valor máximo permitido em 0,2 mg/L, valor este sujeito à revisão em virtude da possível toxicidade hoje em estudo.

Segundo Pagliardini,⁽¹⁷⁾ na França, a Comunidade Européia, por meio de uma resolução de 16 de junho de 1986, recomendou um controle particular do alumínio em águas utilizadas em sistemas de hemodiálise devido aos riscos a que estariam sujeitos os pacientes. Essa preocupação se deve ao fato de a região de Nice ser um centro ativo no desenvolvimento da diálise em centros especializados ou mesmo domesticamente. Essa regulamentação considera desejável a concentração de 0,05 mg/L.

Em 1969, a American Water Works Association (AWWA), limitava a concentração máxima de alumínio em águas de distribuição em 0,05 mg/L. Esse valor foi ratificado em 1985 pela Environmental Protection Agency (EPA). Já a Organização Mundial da Saúde (OMS), fixa um máximo de 0,2 mg/L, e a regulamentação da Comunidade Européia fixa um nível máximo de 0,05 mg/L.⁽²⁴⁾

Em 1986, o Congresso dos EUA incluiu o alumínio em uma lista de 83 contaminantes que deveriam ser estudados nos próximos anos.

Trabalho realizado pela Universidade Tecnológica do Tennessee em 1991 e apresentado por George et al.⁽²⁵⁾ teve por objetivo determinar o efeito das descargas de lodos de sulfato de alumínio no meio ambiente, particularmente no meio aquático. Dez ETAs participaram do estudo, sendo nove dos EUA e um do Canadá. Esses estudos revelaram, entre outros aspectos, que:

- aparentemente, a descarga dos lodos tem efeito transitório nos organismos macroinvertebrados no sedimento dos corpos receptores;
- os depósitos de lodo nos sedimentos podem limitar os teores de carbono onde os macroinvertebrados se alimentam;
- espécies monômeras de alumínio representam a maior parcela de alumínio no extrato filtrado do lodo;
- geralmente, extrato de lodo filtrado em pH igual a 5,0 revelou-se muito tóxico.

Para estudar as ações do lançamento de lodos provenientes de estação completa de tratamento de água com remoção descontínua de lodo e limpeza manual (maioria do Brasil), Cordeiro⁽⁶⁾ acompanhou a operação de limpeza dos decantadores da ETA-São Carlos, Estado de São Paulo, Brasil. Essa estação trata cerca de 500 L/s de água empregando sulfato de alumínio como coagulante primário. O sistema é constituído por 3 decantadores com capacidade de 1.630.000 litros, medindo 32 m de comprimento,

12,80 m de largura e 4 m de profundidade. A limpeza desses decantadores é realizada em intervalos de tempo de cerca de 40 dias. As comportas de entrada de água decantada são fechadas e as adufas de fundo são abertas para a remoção do material retido no tanque. O lodo é encaminhado para o córrego Monjolinho, através de uma tubulação de 500 mm de diâmetro em concreto armado e com cerca de 800 m de comprimento.

A limpeza dos decantadores demora aproximadamente 4 horas e é auxiliada com jatos de água sob pressão. Essa operação resulta em vazão de descarga de cerca de 100 L/s. Foram coletadas amostras compostas no decorrer do tempo de descarga e realizadas análises para caracterização do resíduo. Os resultados são apresentados na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 Características dos resíduos gerados em decantadores.

Parâmetros	Valor
PH	6,4
DQO (mg/L)	5.600
Sólidos totais (ST) (mg/L)	30.275
Sólidos totais fixos (STF) (mg/L)	22.324
Sólidos totais voláteis (STV) (mg/L)	7.951
Sólidos suspensos totais (mg/L)	27.891
Sólidos suspensos totais fixos (mg/L)	22.034
Sólidos suspensos totais voláteis (mg/L)	5.857
Sólidos sedimentáveis (mg/L)	710
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,65
Nitrogênio total (mg/L) (NTK)	280
P-PO4 (mg/L)	97,8

Fonte: Cordeiro.⁽⁶⁾

As condições de sólidos sedimentáveis, DQO, sólidos totais e metais foram analisadas ao longo de 1.000 metros do corpo receptor.

Foram realizadas amostragens em pontos distintos do curso d'água em estudo, sendo coletadas amostras antes e após o lançamento. Os pontos de amostragem foram definidos no sentido de efetuar estudos das possíveis conseqüências em suas águas. Foram definidos seis pontos: o ponto A situado a 20 m a montante do lançamento e os pontos B, C, D, E e F situados a 20, 50, 100 e 1.000 m do ponto de lançamento.

Outro aspecto importante é que as amostras foram coletadas em tempos de 15 minutos antes do início do despejo e 15, 60, 120 e 180 minutos após o início do lançamento, resultando nos valores descritos a seguir.

A análise da DQO ao longo do rio antes e após o lançamento pode ser feita por meio da Figura 1.4 e os valores de sólidos totais por meio da Figura 1.5.

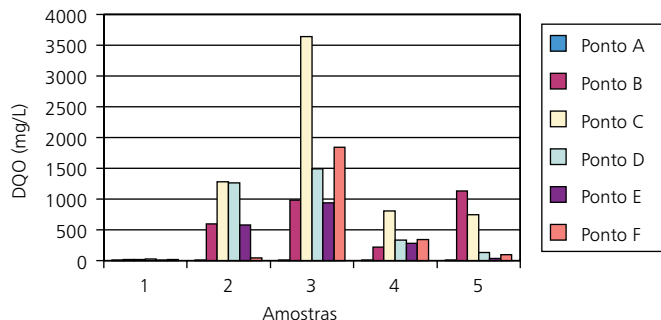


Figura 1.4 Valores da DQO da água do rio antes e após o lançamento do despejo do decantador.

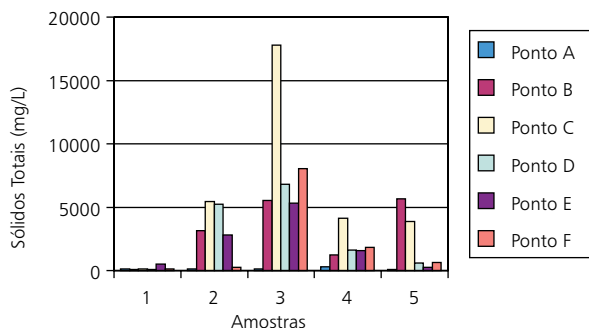


Figura 1.5 Valores da concentração de sólidos totais na água do rio antes e após o lançamento do lodo.

Os resultados obtidos para as análises de sólidos sedimentáveis (S. Sed.) e para pH podem ser observados nos gráficos das Figuras 1.6 e 1.7

Os valores da cor do curso de água analisados antes e após o lançamento do resíduo mostraram os valores plotados na Figura 1.8.

Por meio dos resultados obtidos nota-se que, no caso estudado, as características do córrego sofreram mudanças bruscas com parâmetros que aumentaram cerca de 100 vezes. A análise a ser realizada em um sistema de despejos dessa natureza exige avaliação mais profunda das vazões do despejo e do rio para que possa ser verificada a possibilidade ou não de efetuar a descarga.

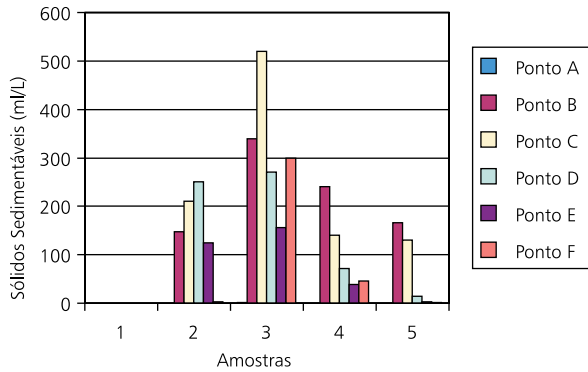


Figura 1.6 Valores de sólidos sedimentáveis antes e após o lançamento do lodo no curso d'água.

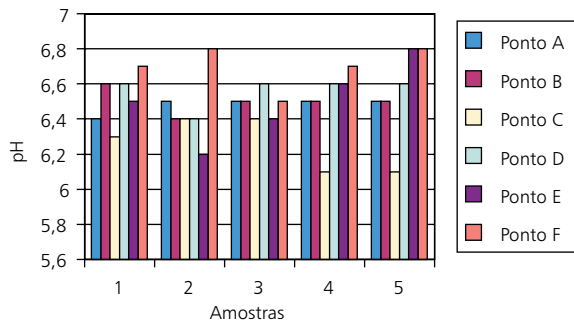


Figura 1.7 Valores do pH ao longo do rio nas seções analisadas.

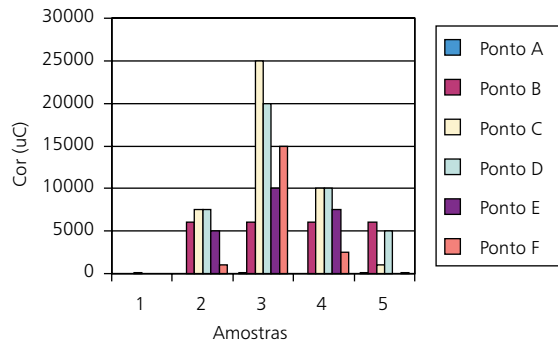


Figura 1.8 Gráfico mostrando os valores da cor da água no córrego estudado.

Levando-se em consideração a legislação brasileira vigente pode-se observar que, no caso estudado, as concentrações desse despejo provocaram degradação da qualidade ambiental, afetando condições estéticas e lançando materiais em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos. Assim, de acordo com Lei 6838 de 31 de agosto de 1981, essa prática de lançamento fere o artigo 3, incisos II e III, e os gerentes de sistemas de tratamento podem ser enquadrados como “*Poluidor*”, inciso IV do artigo 3, Cetesb.⁽⁵⁾ Além desses aspectos, as novas Leis 9.433 e 9.605 poderão inferir uma condição totalmente inédita nas sistemáticas gerenciais.

1.5 Busca de Alternativas de Redução de Volume

Para a redução de volume, tratamento e a disposição dos lodos de ETAs têm sido utilizados alguns métodos tradicionais já consolidados para resíduos de estações de tratamento de esgotos sanitários e industriais. Esses lodos têm não só características diferentes, como também frequências de descargas distintas, o que influencia no processo de tratamento ou “desidratação”, conforme discutido em detalhes no Capítulo 2.

A “desidratação” ou remoção de parcela de água do lodo tem por objetivo a redução do volume. Na Figura 1.9, apresentam-se, esquematicamente, as formas de redução de volume, e os meios usuais pelos quais pode-se atingir esse objetivo.

A definição do tipo de sistema a ser utilizado depende de vários fatores, podendo ser citados: área necessária para implantação, custo da área, distância da estação até o destino final, condições climáticas, custo dos equipamentos, operação, preparo de recursos humanos para operação, necessidade de condicionamento, entre outros.

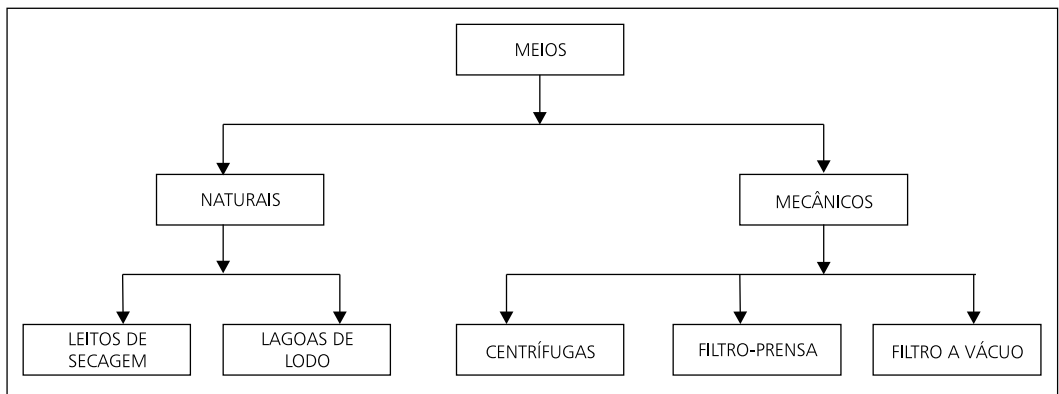


Figura 1.9 Formas de redução de volume de lodo.

A água livre do lodo deve ser removida de forma rápida para que o tempo da operação seja mínimo. Essa água pode ser reutilizada no processo ou disposta sem causar grandes prejuízos. Os sólidos resultantes podem ser dispostos em aterros ou utilizados em sistemas de codisposição com matrizes de cimento ou entulho. Estudos têm sido iniciados para essa reutilização.

A redução do volume dos rejeitos das ETAs pode ser realizado com a remoção da água livre e nos interstícios dos sólidos. Vários podem ser os métodos de remoção de água, podendo ser citados:

A. Sistemas naturais:

- Leitões de secagem
- Lagoas de lodo

B. Sistemas mecânicos:

- Filtros-prensa
- Prensa desaguadora
- Centrífugas
- Filtros a vácuo

C. Sistemas de recuperação de produtos químicos

D. Descargas em sistemas de esgotos sanitários

A remoção de água de resíduos gerados em ETAs tem sido acompanhada nos EUA e, segundo Murray e Dillon⁽²⁶⁾ em pesquisa realizada em 469 sistemas pode-se observar os métodos utilizados ilustrados na Tabela 1.4. Já a forma de disposição dos resíduos gerados em 571 ETAs é apresentada na Tabela 1.5. A pesquisa foi realizada entre os anos de 1991 e 1993.

Deve-se ressaltar que sistemas inovadores têm sido desenvolvidos em países como Bélgica, Holanda, Alemanha, Estados Unidos e África do Sul e, segundo Cornweell & Koopers,⁽⁹⁾ podem se tornar alternativas no futuro para remoção de águas de lodos de ETAs. Dentre estes podem ser citados:

- filtro-prensa de diafragma;
- filtro-prensa tubular;
- sistema *Hi-Compact*;
- sistema *Compactor*;
- microfiltração;
- sistema de aquecimento–degelo;
- filtro-prensa contínuo de alta pressão.

A maioria desses sistemas utiliza a pressão como ponto fundamental na operação e se constituem em sistemas alternativos aos métodos tradicionais de remoção de água.

Tabela 1.4 Sistemas de remoção de água utilizados em ETAs nos EUA.

Tipos de Sistemas	Número de Plantas	% entre 469 ETAs
Adensamento em lagoas	318	67,8
Reciclagem de lodo	68	14,5
Adensamento por gravidade	61	13,0
Aquecimento-degelo	55	11,7
Leitos de secagem	47	10,0
Filtros-prensa	20	4,3
Centrifugação	12	2,6
Filtro a vácuo	4	0,9
Recuperação de cal	1	0,2
Recuperação de sulfato de alumínio	1	0,2
Outro	71	15,1

Fonte: Murray & Dillon.⁽²⁶⁾

Tabela 1.5 Práticas de disposição de lodos nos EUA em faixas de população (milhares).

Prática de Disposição	10 a 25	25 a 50	20 a 100	Acima de 100
Aplicação no solo	37,8	20,2	24,1	20,7
Descarga em sistemas de esgotos sanitários	20,5	32,1	25,5	20,7
Aterro municipal	24,4	25,7	20,4	20,7
Aterro	9,4	20,2	15,7	22,9
Descarga direta em cursos de água	13,4	11,9	15,7	14,1
Outros	6,3	4,5	7,4	10,6

Fonte: Murray & Dillon.⁽²⁶⁾

Nos próximos capítulos serão apresentados e discutidos os meios mais usuais utilizados para a redução do volume de resíduos de ETAs através da remoção de água dos mesmos, incluindo técnicas de reaproveitamento dessa água e de recuperação de coagulantes.

1.6 Referências Bibliográficas

1. ALBRECHT, A.E. (1972). Disposal of alum sludges. *Jornal AWWA*, Denver, v.64, n.1, p.46-52, Jan.
2. AMERICAN WATER WORK ASSOCIATION – AWWA (1987). Research needs of alum sludge discharge. *Jornal AWWA*, Denver, v.79, n.6, p.99-104, Jun.
3. BOURBIGOT, M.M.; PAGLIARDINI, A.P. (1988). Étude des factor determinant lafuite en aluminun dans les eaux potables – Cas de l’usine de Super Rimiez. *Techiniques Science Methods – L’eau*, Paris, p.13-77, Fev.
4. BUGG, H.M.; KING, P.H.; RANDALL, C.W. (1970). Polyeletrolyte conditioning of alum sludges. *JAWWA*, Denver, v.62, n.12, p.792-95, Dec.
5. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB (1988). *Legislação Federal: Controle de Poluição Ambiental*. Cetesb, São Paulo, 114p.
6. CORDEIRO, J.S. (1993). *O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água*. São Carlos. 343p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
7. CORDEIRO, J.S. (1981). *Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de estações de tratamento de água*. São Carlos. 155p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
8. CORNWELL, D. (1987). *Water treatment plant management*. Denver, AWWA Research Foundation, 308p.
9. CORNWELL, D.A.; KOPPERS, H.M.M. (1990). *Slib, Schamm, Sludge*. Denver, AWWA Research Foundation, 308p.
10. CULP, G.L.; CULP, R.L. (1974). *New concepts in water purification*. New York, Van Nostrand Reinhold, 299p.
11. NEUBAUER, W.R. (1968). Waste alum sludges treatment. *JAWWA*, Denver, v.60, n.7, p.819-826, Jul.
12. NIELSEN, H.L.; CARNES, K.E.; DEBOICE, J.N. (1973). Scroll centrifuge for dewatering wins at one plant. *Water and Waste Enginneering*, New York, v.10, n.3, p.44-47, Mar.
13. MILLER, R.G. et al. (1984). The ocurrence of aluminum in drinking water. *Jornal AWWA*, Denver, v.76, n.1, p.84-91, Jan.
14. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (1997). *Política Nacional de Recursos Hídricos: lei 9.433*, Brasília, DF.
15. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (1998). *Lei da Vida – A Lei dos Crimes Ambientais: lei 9.605*, Brasília, DF.

16. MINISTÉRIO DA SAÚDE (1990). Portaria 36/GM, Brasília, DF, 19p, Jan.
17. PAGLIARDINI, A. (1998). *Mésure automatisée de l'aluminium total dans les eaux. Techniques Science Methods – L'eau*, Paris, p.99-107, Fev.
18. PARSEKIAN, M.P. (1988). *Gerenciamento de ETAs completas em cidades de porte médio no Estado de São Paulo*. São Carlos. 182p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
19. PATRIZZE, L.P. (1998). *Redução de volume de lodo gerado em decantadores de ETAs tradicionais utilizando espessamento por flotação e por gravidade seguidos de centrifugação*. São Carlos. 227p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
20. REDICDITT, T.M. (1975). Control of colloidal stability through Zeta Potential, ZETA – Meter Inc. Livingston.
21. ROBERTO, S.; ABREU, R.M. (1991). Utilidade dos indicadores de qualidade das águas. *Revista Ambiente*, São Paulo, v.5, n.1, p.44-51.
22. SINGER, P.C. (1974). Softener sludger disposal what's best? *Water and Wastes Engineering*, New York, v.11, n.12, p.25-30.
23. SUTHERLAND, E.R. (1969). Treatment plant waste disposal in Virginia. *JAWWA*, Denver, v.61, n.4, p.186-189, ap.
24. DRISCOLL Jr., C.T.; LETERMAN, R.D.; FICH, D.E. (1987). Residual aluminum in filtered water. *AWWARF*, Denver, 71p.
25. GEORGE, D.B.; BEAK, S.G.; ADANS, V.D. et al. (1991). Alum sludge in the aquatic environment. *AWWARF*, Denver, 155p.
26. MURRAY, K.; DILLON, G. (1994). Waterworks residuals management a comparison of US and UK practices. Washington, WEF, proc.
27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *ABNT NBR 10.004 – Resíduo Sólidos*. São Paulo, 63p., Set.
28. SABESP (1987). Recuperação de águas de lavagens, tratamento e disposição de resíduos sólidos de ETAs da RMSP. *Revista DAE*, São Paulo, v.47, n.150, p.216-219, Dez.
29. VIDAL, W.L.; PEREIRA, P.C.G. (1990). *Avaliação e tratamento de lodos das ETAs de Piracicaba*. São Paulo, CETESB, 34p., Nov.

Capítulo 2

Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAs

Marco Antonio Penalva Reali

2.1 Considerações Iniciais

A tendência moderna em relação às técnicas de tratamento de águas para abastecimento consiste na busca de sistemas que proporcionem a geração de quantidades de lodo menores que aquelas produzidas em estações de tratamento de água (ETAs) convencionais, as quais empregam unidades de decantação antecedendo o processo de filtração da água destinada ao consumo humano.

Dentre as tecnologias que utilizam a coagulação química como base para a remoção de impurezas da água e que incorporam essa característica de menor produção de lodos, pode-se citar a técnica de filtração direta, a qual é muitas vezes possível de ser empregada, dependendo da qualidade da água do manancial. Nos sistemas que utilizam a filtração direta, são eliminadas as unidades de decantação e, algumas vezes, até mesmo os flocladores. As dosagens de coagulante são reduzidas significativamente, comparadas àquelas aplicadas no tratamento convencional, resultando em menores massas de lodo produzidas na ETA.

Porém, muitas vezes a água bruta a ser tratada apresenta características que impossibilitam a adoção da filtração direta, requerendo a utilização de unidades de pré-clarificação antecedendo a filtração. Nesses casos, dependendo das características do manancial, pode ser empregado, em substituição aos decantadores, unidades de flotação por ar dissolvido. Nos anos recentes, a opção por esse tipo de alternativa tem sido verificada com crescente frequência, devido às vantagens muitas vezes apresentadas pela flotação comparada à decantação. Dentre tais vantagens, pode-se destacar: i) requer tempos de floclação bem menores; ii) opera com taxas significativamente

maiores, resultando em menores áreas de implantação; iii) permite arraste de parcela de substâncias voláteis porventura presentes na água, devido à enorme concentração de microbolhas de ar que atuam na flotação; iv) é capaz de produzir lodo já espessado, com concentração de sólidos na faixa de 3% a 6% (desde que possua raspadores de superfície); e v) requer menores dosagens de coagulante, resultando em geração de menor massa de sólidos na ETA.

No entanto, atualmente, no Brasil, verifica-se a presença de poucas ETAs com filtração direta e menor número ainda de ETAs com unidades de flotação por ar dissolvido. A grande maioria dos sistemas de tratamento de água em operação no país é do tipo convencional com ciclo completo, ou seja, possuem grandes unidades de decantação após os floculadores e antecedendo as unidades de filtração. Nesse tipo de sistema, a maior parte dos sólidos presentes na água é removida nos decantadores e acumulada no fundo dos mesmos na forma de lodo.

Esse lodo geralmente se encontra bastante diluído, necessitando ser submetido a operações que visam a sua concentração, ou seja, a remoção de parcela da água presente nesse lodo antes de sua destinação final.

Por se tratar de situação mais freqüente no país e mais problemática em relação à geração de lodos, no presente capítulo e nos capítulos subseqüentes serão abordados com maior ênfase os aspectos relacionados ao tratamento do lodo produzido nesse tipo de ETA, ou seja, do tipo convencional com ciclo completo.

2.2 Lodos de ETAs: Estratégias Usuais de Remoção de Água e de Destinação Final

Com o intuito de melhor ilustrar a discussão a respeito das estratégias mais usuais de tratamento e disposição final dos lodos gerados em ETAs de ciclo completo, foi construído o fluxograma esquemático mostrado na Figura 2.1. Essas estratégias envolvem diversas opções e técnicas cujas pertinências são grandemente influenciadas, dentre outros fatores, pelas características do lodo, da área disponível, do clima local e das condições sócio-econômicas, culturais e ambientais da região onde se pretenda implantar o sistema de tratamento do lodo.

Nesse mesmo fluxograma (Figura 2.1), são mostrados também, como exemplo, os volumes de água e de lodos usualmente descartados ou perdidos ao longo do sistema de tratamento de água convencional. Assim, são indicados em cada unidade de tratamento os respectivos volumes de “perdas” de água, cujos valores são omitidos, pois variam muito de um caso para outro. Essas perdas dependem da qualidade do projeto, das estruturas e equipamentos (válvulas, adufas etc.), de seu estado de conservação, além da qualidade da operação e manutenção da ETA considerada.

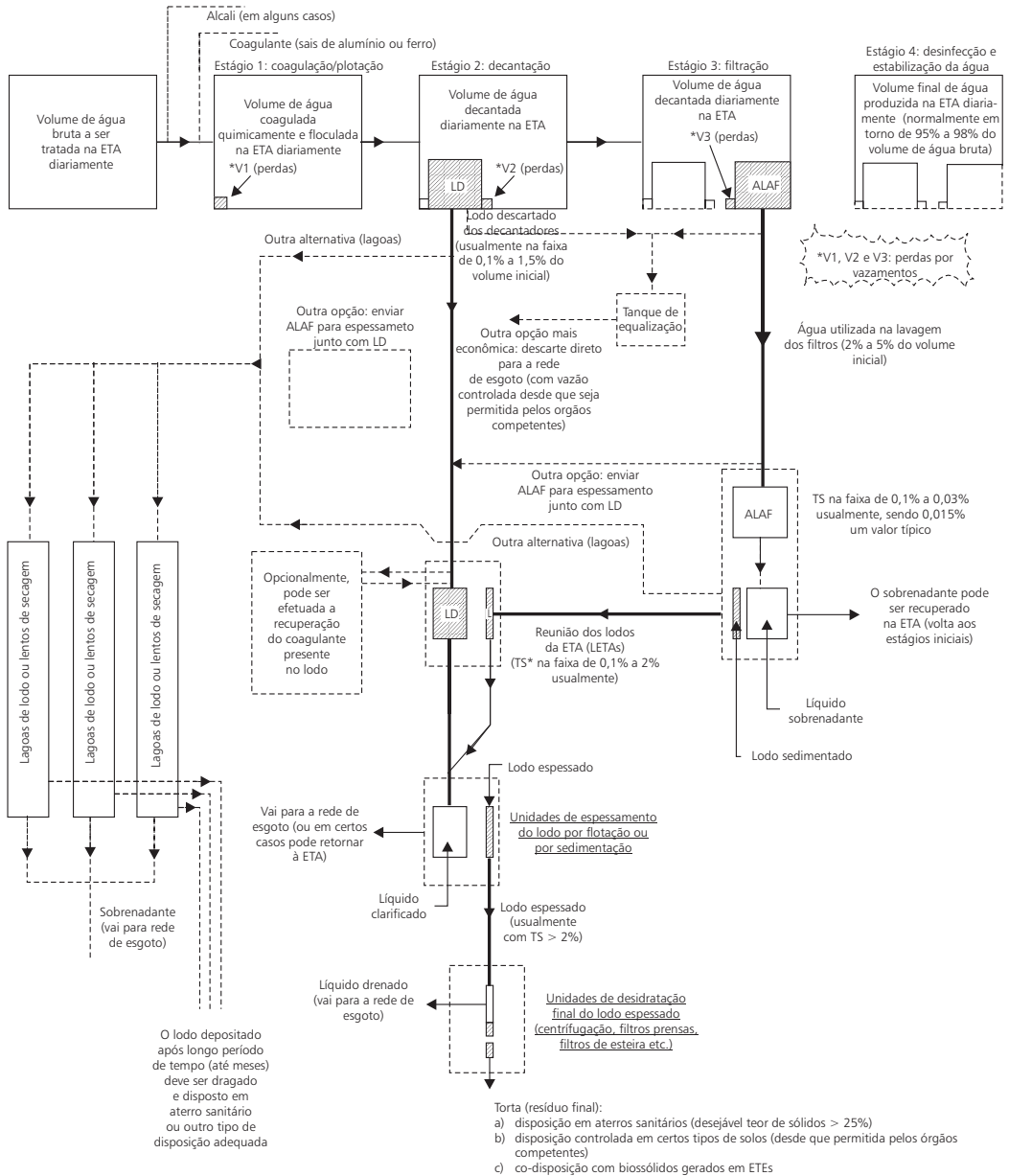


Figura 2.1 Diagrama conceitual mostrando os volumes de água e de lodos produzidos em uma ETA de ciclo completo que utiliza sais de alumínio ou ferro como coagulante e algumas opções de tratamento do lodo e disposição final dos resíduos.

Na Figura 2.1, são indicados também alguns valores referentes aos volumes de lodos e águas de lavagem de filtros produzidos, além da faixa usual de concentração desses efluentes em algumas etapas do tratamento ilustrado. Tais valores também costumam variar de caso para caso, devendo ser entendidos apenas como exemplos comumente encontrados na prática.

Apresenta-se a seguir uma discussão geral acerca das estratégias mostradas na referida figura. É importante frisar que existem outras opções possíveis para tratamento e disposição final de lodos, as quais não se encontram aqui apresentadas, tendo em vista que o escopo deste capítulo é tão somente fornecer os conceitos gerais considerados mais importantes acerca do assunto.

Inicialmente, vale lembrar, conforme discutido em detalhes no Capítulo 8, que uma das maneiras mais baratas de disposição final de lodos gerados em qualquer tipo de ETA, convencional ou não, consiste em seu lançamento direto na rede de esgoto, sem qualquer tipo de tratamento, a não ser a presença de um tanque para controle e regularização da vazão de lançamento.

Conforme mostrado no esquema da Figura 2.1, nos casos em que tal prática não seja possível, duas outras alternativas são usualmente adotadas. Uma delas consiste na utilização de lagoas ou leitos de secagem de lodo, possíveis quando se tenha disponibilidade de grandes áreas para implantação, condições climáticas favoráveis e geração de lodo com características propícias a esse tipo de alternativa de remoção de água.

Os sistemas de lagoas de lodo possuem, geralmente, duas ou mais unidades operando em paralelo. Essas unidades devem possuir, em seu entorno, proteção para evitar o acesso de águas pluviais das áreas vizinhas. O lodo é encaminhado continuamente para uma das lagoas até seu completo enchimento. A partir de então, a lagoa é retirada de operação, permitindo-se a desidratação do lodo acumulado.⁽⁷⁾

Normalmente, em regiões de clima temperado tem-se verificado que o lodo não se desidrata muito bem em lagoas,⁽²⁾ exigindo áreas muitas vezes exageradas para a implantação das lagoas. Em geral, são obtidos melhores resultados com a transformação das lagoas de lodo em leitos de secagem de lodo por meio da colocação de drenos (de areia, por exemplo) no fundo das lagoas. Dessa forma, obtém-se filtro rudimentar, em que, apesar de ter pequena carga hidráulica, ocorre filtração de parcela da água contida no lodo simultaneamente à evaporação na superfície.⁽²⁾ Essas unidades são conhecidas como leitos de secagem de lodo. Após o período de secagem, tanto no caso de lagoas quanto de leitos de secagem, deve-se promover a remoção, por dragagem, do lodo concentrado no fundo das unidades, para posterior destinação final adequada (em aterros, por exemplo).

Nos EUA, a prática tem mostrado⁽²⁾ que, em um grande número de casos em que se tinham lodos gerados a partir da coagulação com sais de ferro ou de alumínio, o emprego de lagoas não foi capaz de fornecer lodos com concentrações de sólidos acima de 9%. No Capítulo 6 deste livro apresenta-se uma discussão mais aprofundada acerca de lagoas e leitos de secagem de lodos.

Ainda com base no diagrama mostrado na Figura 2.1, observa-se que uma alternativa bastante interessante do ponto de vista econômico é a recirculação, ou aproveitamento, da água resultante da lavagem de filtros. Essa água usualmente contém concentrações não muito elevadas de sólidos suspensos (SST na faixa de 200 a 500 mg/L) e representa uma parcela considerável do volume de efluentes líquidos produzidos nas ETAs. Por isso, a prática de recirculação dessa água é cada vez mais freqüente, podendo ser realizada sem ou com etapa prévia de clarificação em unidades de sedimentação.

Esta última opção é mais recomendável por minimizar o retorno à ETA de substâncias ou organismos objetáveis porventura associados aos sólidos suspensos da água de lavagem. Nesse caso, o lodo acumulado no fundo dos tanques de sedimentação da água de lavagem dos filtros, após seu descarte, é reunido ao lodo proveniente dos decantadores da ETA para serem submetidos (conjuntamente) ao tratamento e disposição final. No Capítulo 7 será apresentada uma discussão mais detalhada acerca da recirculação da água de lavagem de filtros, juntamente com estudos de caso.

Uma terceira estratégia para remoção de água de lodos de ETAs, de acordo com o esquema ilustrado na Figura 2.1, consiste em promover o tratamento dos diferentes resíduos líquidos da ETA em unidades e etapas de tratamento separadas e seqüenciais. Esse tratamento seqüencial tem por objetivo principal a remoção gradativa da água contida no lodo, de forma a obter torta com concentração de sólidos adequada para seu transporte econômico e disposição final adequada.

Os custos envolvidos no transporte do resíduo final (torta) dependem da distância entre a ETA e o local de disposição, podendo tornar-se consideravelmente elevado nos casos em que o lodo não tenha sido suficientemente desidratado. Ademais, os aterros sanitários podem, muitas vezes, apresentar restrições quanto à umidade máxima permitida para recebimento da torta.

Assim, é importante que os sistemas de remoção de água de lodos sejam capazes de produzir tortas bastante desidratadas, sendo recomendado por alguns autores que se obtenham tortas com teor de sólidos totais (em massa) acima de 25%, para o caso de disposição de lodo gerado a partir da coagulação com sulfato de alumínio em aterros sanitários.⁽²⁾

Geralmente, a primeira etapa dos sistemas de tratamento de lodo gerados em ETAs convencionais consiste em seu espessamento, que usualmente pode ser realizado

em unidades de sedimentação (espessamento por gravidade), em unidades de flotação por ar dissolvido (espessamento por flotação) ou em espessadores mecânicos de esteira. Essa etapa tem por objetivo a separação de parte da água mais facilmente removível do lodo com vistas à diminuição do volume desse lodo e, conseqüentemente, possibilitar a redução no tamanho dos equipamentos utilizados na etapa subsequente de desidratação final do lodo, cujos custos de implantação e de operação (energia, manutenção etc.) dependem do volume e das características do lodo a ser desidratado. As diversas alternativas para desidratação final do lodo serão discutidas em detalhes nos Capítulos 4, 5 e 6 deste livro, enquanto a etapa de espessamento do lodo é apresentada no Capítulo 3.

Para que se tenha um melhor desempenho das operações de redução da quantidade de água presente nos lodos de ETAs que utilizam sais de ferro ou alumínio como coagulantes, é usual que se faça previamente o condicionamento físico ou químico do lodo. O condicionamento físico por congelamento seguido de descongelamento do lodo costuma ser empregado em países de clima frio, onde é possível tomar partido do congelamento e descongelamento naturais, de ocorrência sazonal. Em países de clima quente, essa técnica apresenta custos demasiadamente elevados.

Por sua vez, o condicionamento químico de lodos de ETA é realizado por meio da adição de produtos químicos que auxiliam a remoção da maior parte da água presente nesse lodo, como, por exemplo, a cal ou soluções de polímeros sintéticos. Estes últimos, também designados polieletrólitos, têm sido utilizados na grande maioria dos casos, tanto na etapa de espessamento quanto na etapa de desidratação desse tipo de lodo.

Os polímeros sintéticos podem ser classificados em três categorias básicas, de acordo com a carga apresentada por suas moléculas em soluções aquosas: polímeros aniônicos (cargas negativas), polímeros catiônicos (cargas positivas) e polímeros não iônicos (sem caráter marcante aniônico ou catiônico).

Essa classificação é geral, existindo outros parâmetros adicionais que podem auxiliar em uma melhor caracterização dos polímeros, como a densidade de carga e a massa molecular dos mesmos.

Conforme será visto no Capítulo 3, quando serão apresentados estudos de caso, na etapa de espessamento, o lodo, que inicialmente em geral apresenta teor de sólidos na faixa de 0,1% a 1,0% nos casos de ETAs que utilizam sais de ferro ou alumínio como coagulantes, é concentrado até atingir valores mais elevados de teor de sólidos, usualmente acima de 2%.

A seguir, esse lodo, já espessado, é encaminhado às unidades de desidratação final, que podem ser constituídas, por exemplo, por centrífugas, filtros-prensa ou prensas desaguadoras. Na fase de desidratação do lodo, também é usual a aplicação de polímeros sintéticos para condicionamento químico do lodo espessado.

Antes da etapa de espessamento do lodo, opcionalmente pode ser realizada a recuperação do coagulante presente nesse lodo. No Capítulo 9 serão apresentados e discutidos detalhadamente os processos usuais de recuperação de coagulantes.

No que se refere à destinação final do lodo de ETAs, há várias opções possíveis de serem adotadas, dependendo da análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental para cada caso. Diversos estudos vêm sendo conduzidos visando à busca de novas alternativas para destinação desse tipo de resíduo. Dentre essas alternativas, conforme mostrado na Figura 2.1, é possível citar as seguintes:

- *Disposição em aterros sanitários*: conforme comentado anteriormente, para que seja adotada esta opção, quando se tem lodo gerado a partir da coagulação química com sulfato de alumínio, é usualmente recomendável que a torta final tenha concentração de sólidos acima de 25%.⁽²⁾
- *Co-disposição com bio-sólidos*: o gerenciamento conjunto dos lodos de ETAs e dos bio-sólidos gerados em estações de tratamento de esgotos pode ser bastante vantajoso do ponto de vista operacional. Essa mistura pode ser disposta diretamente em solos ou utilizada no preparo de compostos fertilizantes. O produto da mistura costuma apresentar menores teores de metais, tornando o produto mais facilmente comercializável.⁽⁹⁾
- *Disposição controlada em certos tipos de solos*: alternativa possível de ser adotada nos casos em que se comprove a não existência de impactos negativos ao solo receptor dos resíduos gerados na ETA. Há alguns exemplos na literatura, em que lodos de ETAs vêm sendo dispostos em fazendas de cultivo de gramíneas.⁽⁹⁾ Quando se tem a presença de alumínio no lodo, sua disposição no solo deve ser cuidadosa, pois o alumínio possui grande afinidade de ligação com o fósforo presente no solo, indisponibilizando-o para as plantas.⁽⁹⁾
- *Aplicações industriais diversas*: como, por exemplo, na fabricação de tijolos ou outros materiais de construção. Diversos outros tipos de aplicações industriais vêm sendo estudados nos anos recentes. As aplicações industriais dependem das características do resíduo da ETA e do material que se pretende produzir, necessitando de estudos de viabilidade técnica e econômica. Outro tipo de aplicação recente que pode apresentar vantagens, em alguns casos, é a utilização dos resíduos sólidos de ETAs na construção de bases de certos tipos de pavimentos.
- *Incineração dos resíduos*: normalmente, os custos inerentes a essa opção são bastante elevados, além de resultarem na geração de cinzas, as quais também necessitam de disposição final adequada, ou incorporação em algum tipo de produto.
- *Outras novas aplicações*: novas idéias a respeito da utilização dos resíduos de ETA têm sido buscadas, podendo vir a constituir alternativas válidas, desde que apresente viabilidade técnica, econômica e ambiental.

Para melhor compreensão dos conceitos envolvidos no tratamento e disposição final desse tipo de lodo, apresenta-se, na próxima seção, uma discussão acerca das características qualitativas e quantitativas dos lodos gerados em ETAs.

2.3 Origem e Caracterização Qualitativa e Quantitativa dos Lodos de ETAs Convencionais

Embora sem o intuito de aprofundamento sobre o assunto, para melhor compreensão das operações de remoção de água de lodos de ETAs, é importante que sejam apresentadas algumas considerações acerca das características qualitativas dos componentes presentes nesses lodos. Dentre os diversos modelos qualitativos que procuram definir as diversas frações de água presentes nos lodos, aquele mostrado esquematicamente na Figura 2.2 parece ser bastante elucidativo.

De acordo com seus propositores,⁽⁸⁾ qualquer tipo de lodo consiste em uma combinação entre uma fase sólida com certa quantidade de líquido. O comportamento desse líquido não deve ser erroneamente assumido como sendo igual ao comportamento habitual da água em seu estado líquido natural. Pois há diferentes formas físicas da água no lodo, as quais exercem influência marcante na maior ou menor dificuldade de separação da fase líquida da sólida.

De acordo com o modelo ilustrado na Figura 2.2, são definidos os seguintes diferentes estados físicos da água presentes nos lodos,⁽⁸⁾ em ordem crescente de dificuldade de separação:

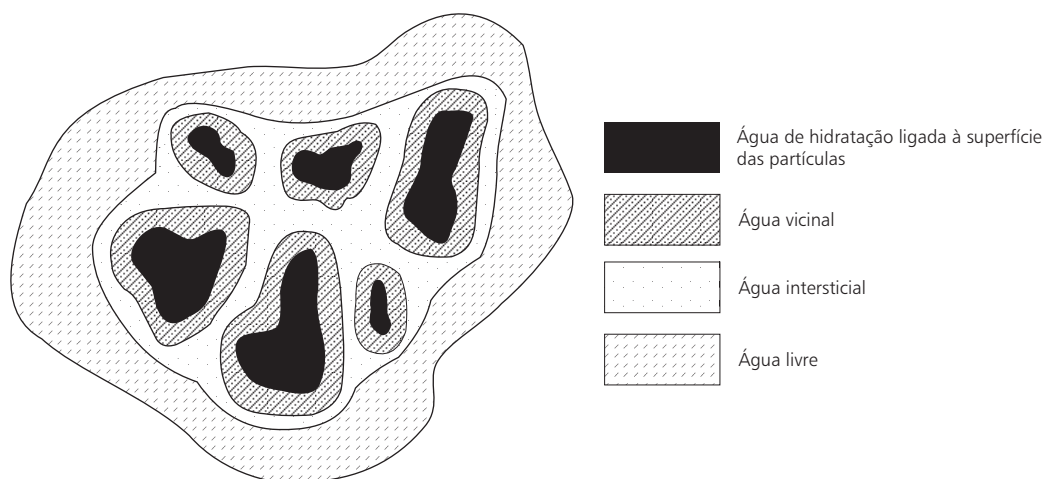
- *Água livre*: água não associada com partículas sólidas.
- *Água intersticial ou capilar*: água ligada mecanicamente, a qual se encontra presa aos interstícios dos flocos.
- *Água vicinal*: constituída por múltiplas camadas de moléculas de água fisicamente ligadas, as quais se encontram firmemente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

Evidentemente, as quantidades relativas dessas diferentes frações de água determinam as características de retenção de água dos lodos e, conseqüentemente, o desempenho dos sistemas de remoção de água utilizados.

Um parâmetro amplamente utilizado para avaliação da maior ou menor facilidade de remoção de água de lodos é a resistência específica à filtração. Quanto maior o valor desse parâmetro, mais difícil a remoção, por filtração, da água do lodo. Geralmente, lodos de decantadores de ETAs apresentam valores de resistência específica

entre 5.10^{12} e 70.10^{12} m/kg,^(6, 3) enquanto lodos gerados durante a lavagem de filtros apresentam valores desse parâmetro na faixa de 0,1 a 15.10^{12} mg/kg.⁽⁶⁾

A adição de polímeros sintéticos para condicionamento químico desses lodos usualmente diminui o valor da resistência específica à filtração, indicando melhoria nas condições de desidratação. No Capítulo 7, será apresentada a descrição dos procedimentos e equipamentos de laboratório necessários à determinação da resistência específica à filtração de lodos, seguida de estudos de caso.



Fonte: Smollen & Kafaar.⁽⁸⁾

Figura 2.2 Distribuição da água no floco de lodo.

A densidade úmida também constitui parâmetro importante para caracterização de lodos de ETAs. Ela é função inversa do teor de umidade do lodo, podendo ser calculada com o emprego da seguinte expressão,⁽⁶⁾ válida para lodos de ETAs com concentrações de sólidos totais menores que 50% (em massa):

$$\text{Densidade úmida do lodo} = \frac{100}{\frac{\text{Teor de sólidos totais (\%)}}{\text{Densidade dos sólidos}} + \frac{100 - \text{Teor de sólidos totais (\%)}}{\text{Densidade da água}}} \quad (2.1)$$

em que a densidade dos sólidos pode ser determinada experimentalmente ou assumida igual a 2.500 kg/m^3 para lodos de ETAs que utilizam sais de ferro ou alumínio como coagulante.

Os principais parâmetros físico-químicos usualmente utilizados para caracterização dos lodos de ETAs foram comentados no Capítulo 1 (veja as Tabelas 1.1, 1.2 e 1.3),

valendo citar, entre outros, os seguintes exames e determinações físico-químicos e biológicos: sólidos totais (ST); sólidos voláteis (SV); sólidos suspensos totais (SST); sólidos suspensos voláteis (SSV); pH; demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5); demanda química de oxigênio (DQO); concentração dos principais íons metálicos de interesse (por exemplo, alumínio, ferro, manganês, cádmio, mercúrio, chumbo, cromo, cobre etc.); concentração de fósforo total, nitrogênio total Kjeldahl (NTK); além de índices bacteriológicos e biológicos de interesse sanitário (por exemplo, coliformes totais e fecais, contagem de ovos de helmintos etc.).

A quantidade e as características dos lodos gerados em ETAs convencionais variam significativamente em função da qualidade da água bruta a ser tratada e do tipo e dosagem dos produtos químicos utilizados no processo de coagulação dessa água. Ou seja, depende das características do manancial e dos insumos utilizados no tratamento de suas águas. Além disso, deve-se considerar que um mesmo manancial (principalmente rios) pode apresentar variações sazonais significativas na qualidade da água bruta, como, por exemplo, mudanças de turbidez, as quais influem marcadamente não só na quantidade como nas características do lodo formado no sistema de tratamento de água.

No que concerne ao tipo de coagulante utilizado, em geral ETAs que utilizam sulfato de alumínio como coagulante produzem lodo de coloração marrom, com viscosidade e consistências que lembram chocolate líquido.⁽²⁾ Esse lodo é tixotrópico, isto é, apresenta-se no estado de gel quando em repouso, mas torna-se relativamente fluido quando submetido a esforços cizalhantes,⁽⁴⁾ e, geralmente, é de difícil sedimentação ou flotação no estado natural.

Há, portanto, necessidade de adição de polímeros (ou outro tipo de condicionamento) para atingir desempenho adequado na operação de adensamento por flotação ou por sedimentação, conforme será visto no Capítulo 3, por ocasião da apresentação de estudo de caso.

Obviamente, quando se adiciona algum tipo de polímero para condicionamento do lodo, altera-se o estado de equilíbrio natural das frações de água em diferentes estados físicos (conforme mostrado na Figura 2.2), favorecendo a eficiência de remoção de água do referido lodo.

Por sua vez, o lodo gerado em ETAs que empregam sais de ferro como coagulante também apresenta dificuldade de flotação ou sedimentação natural, requerendo adição de polímeros adequados à flotação ou à sedimentação, na etapa de espessamento. Esse tipo de lodo geralmente tem coloração marrom-avermelhada.

Para aquilatar a real produção de lodo em sistemas de tratamento de água, é necessária a estimativa de dois parâmetros muito importantes:⁽²⁾

- i) A massa de sólidos secos presente no lodo resultante do processo de tratamento.
- ii) O volume de água descartada que atua como veículo da massa de sólidos (citada em i).

O primeiro parâmetro pode ser obtido efetuando-se um balanço de sólidos no sistema. Para tal, deve-se avaliar primeiramente quais os sólidos que deverão aparecer como resíduo. Na Tabela 2.1 são mostrados alguns dos resíduos mais comuns em tratamento de água.⁽²⁾

Tabela 2.1 Resíduos prováveis gerados em processos de tratamento de água.

Produto Químico	Proveniente de:	Aparece no Resíduo como:	Sólido
Sólidos dissolvidos	Água bruta	Sólidos dissolvidos	Somente se precipitados
Sólidos suspensos (silte)	Água bruta	Silte – sem mudança	Sim
Matéria orgânica	Água bruta	Provavelmente sem mudança	Sim
Sais de alumínio	Coagulação química	Hidróxido de alumínio	Sim
Sais de ferro	Coagulação química	Hidróxido de ferro	Sim
Polímeros	Tratamento químico	Sem mudança	Sim
Cal	Tratamento químico e correção de pH	Ou carbonato de cálcio ou, se for usado solução de cal, somente impurezas	Sim
Carvão ativado em pó	Controle de sabor e odor	Carvão ativado em pó	Sim
Cloro, ozônio	Desinfecção	Em solução	Não

Fonte: Doe.⁽²⁾

Em seguida, pode-se calcular estequiometricamente os resíduos resultantes da aplicação do coagulante químico. Na Tabela 2.2 são fornecidos valores teóricos da produção de sólidos devido à introdução de diversos tipos de agentes químicos na água (valores expressos em grama de resíduo gerado por grama de produto aplicado).

As dosagens corretas de produtos químicos, assim como a produção de sólidos, podem ser melhor estimadas com a realização de ensaios de laboratório (*Jar test*) utilizando amostras da água a ser tratada e os produtos químicos escolhidos.

A produção total de resíduos pode então ser estimada utilizando-se a vazão diária de água a ser tratada. Na Tabela 2.3 são mostrados alguns valores típicos encontrados na literatura.

Tabela 2.2 Produção teórica de sólidos.

Produto Químico	g de Sólidos Produzidos por g de Produto Químico
Sólidos suspensos (silte)	1,0
Matéria orgânica	1,0
Sulfato de alumínio	0,26 como $Al(OH)_3^*$
Cloreto férrico	0,66 como $Fe(OH)_3^*$
Polímero	1,0
Cal	Permite 0,1 como fração insolúvel
Carvão ativado em pó	1,0

* Dependendo da forma de hidratação do sulfato de alumínio ou cloreto férrico.

Fonte: Doe.⁽²⁾

Tabela 2.3 Impactos típicos do tipo de manancial sobre a produção de resíduos.

Tipo de Manancial	Faixa de Produção de Resíduos (g de Sólidos Secos por m ³ de Água Tratada)
Água de reservatório com boa qualidade	12-18
Água de reservatório com média qualidade	18-30
Água de rios com qualidade média	24-36
Água de reservatórios com qualidade ruim	30-42
Água de rios com qualidade ruim	42-54

Fonte: Doe.⁽²⁾

Há diversas fórmulas empíricas propostas na literatura para a estimativa da produção de sólidos em ETAs. Como exemplo, pode-se citar as seguintes estimativas da taxa de produção de sólidos secos T_s (g de sólidos por m³ de água tratada):⁽⁵⁾

- a) Para ETAs que utilizam como coagulante sulfato de alumínio [$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$]:

$$T_s = [\text{Dosagem de sulfato de alumínio } [(mg/L) \times 0,26^*] + [\text{Turbidez da água bruta (uT)} \times 1,5^{**}]]$$

* Fator que depende do número de moléculas de H₂O associadas a cada molécula de sulfato de alumínio (usualmente varia de 0,23 a 0,26).

** Razão entre a concentração de sólidos suspensos totais presentes na água bruta e a turbidez da mesma (geralmente na faixa de 1,0 a 2,0).

- b) Para ETAs que utilizam cloreto férrico como coagulante:

$$T_s = [\text{Dosagem de cloreto férrico } [(mg/L) \times 0,66^*] + [\text{Turbidez da água bruta (uT)} \times 1,5]]$$

* Considerando cloreto férrico anidro. Para cloreto férrico hidratado (cristal – $F_eCl_3 \cdot 6H_2O$), esse fator torna-se igual a 0,40.

- c) Para o caso do lodo produzido em sistemas de abrandamento com cal, T_s varia de acordo com o nível de redução de dureza da água bruta. Em geral, de 2 a 3 mg/L de sólidos secos são gerados para cada mg/L de dureza removida. Assim, tem-se:

$$T_s = [2,5 \times \text{Dureza total removida (mg/L como } C_aCO_3)]$$

Conforme comentado em ii), outro parâmetro de interesse para o projeto de sistemas de tratamento de lodos de ETAs convencionais é a quantificação do volume de água que é descartada juntamente com os sólidos depositados nos decantadores ou, em outras palavras, a estimativa da concentração de sólidos no lodo descartado dos decantadores. Essa concentração, também designada por teor de sólidos no lodo, usualmente é expressa em porcentagem (em massa) de sólidos secos presentes no lodo.

O teor de sólidos no lodo descartado pelos decantadores varia bastante de uma ETA para outra, podendo apresentar valores na faixa de 0,1%-2,0%. Entretanto, na maioria dos casos, os valores situam-se abaixo de 1%.⁽¹⁾ Esse parâmetro depende de uma série de fatores, tais como:

- características da água bruta a ser tratada;
- tipo e dosagem de produtos químicos utilizados para a coagulação/floculação da água bruta;
- eficiência das unidades de floculação;
- tipo e eficiência dos decantadores aliados ao modo de operação de descarte do lodo acumulado nos mesmos.

Em relação aos dois primeiros fatores, vale salientar a importância da escolha adequada do tipo de coagulante e respectiva dosagem ótima, com a finalidade de obter boa eficiência nos processos subseqüentes de clarificação da água (floculação/decantação/filtração) aliada à geração do mínimo volume de lodo possível. Para atingir tais objetivos é recomendável que sejam sempre realizados ensaios de coagulação/floculação/sedimentação em laboratório (*Jar-test*) ou, quando possível, com instalação-piloto.

No que se refere aos outros fatores, vale comentar que o tipo dos decantadores adotados e a maneira pela qual é feita a descarga do lodo acumulado no fundo dos mesmos apresenta influência marcante no valor do teor de sólidos desse lodo. Por exemplo, decantadores retangulares convencionais desprovidos de removedores mecânicos de sedimentos, como aquele mostrado esquematicamente na Figura 2.3(a), acumulam grande quantidade de lodo até o momento de sua limpeza. O período de acumulação de sólidos nesse tipo de unidade usualmente é bastante longo, chegando

a meses na maioria dos casos. Essa situação favorece o surgimento de condições anaeróbias na massa de lodo acumulado, ocasionando impacto nas características do lodo e da água tratada. Uma das possíveis conseqüências dessas condições anaeróbias é a dissolução de metais presentes no lodo (como, por exemplo, Fe, Mn, Al e metais pesados).

O tipo de decantador também influencia marcadamente o volume de lodo gerado em uma ETA. Assim, por exemplo, os decantadores retangulares providos de removedores de lodo mecânicos, como aqueles mostrados nas Figuras 2.3(b), 2.3(c) e 2.3(d), com operações de descarte de lodo diárias (ou, em muitos casos, em períodos menores), acabam produzindo volumes de lodo maiores que os decantadores de mesmo formato, com operação manual de limpeza do lodo como aquele mostrado na Figura 2.3(a). No primeiro caso, devido ao menor tempo de acumulação do lodo no fundo dos decantadores, tem-se a geração de lodo com menor conteúdo de sólidos (menos espessos) que no segundo caso, ou seja, a massa de sólidos produzida seria aproximadamente a mesma, mas a quantidade de água associada aos sólidos seria maior no primeiro caso, resultando em maiores volumes de lodo.

Outro fator muito importante que influi significativamente no volume de lodo gerado é a qualidade de operação dos decantadores providos de removedores mecânicos ou de dispositivos para descarga hidráulica (operados manualmente ou por meio de automação). A programação da frequência e da duração dos descartes de lodo deve ser criteriosa. Ou seja, o período de tempo entre as descargas não deve ser pequeno demais a ponto de produzir lodo muito diluído (com baixo teor de sólidos) nem exagerada a ponto de ser ultrapassada a capacidade de retenção de sedimentos do decantador (característica de projeto do mesmo) ou de favorecer a decomposição do lodo retido.

A frequência deverá ser ajustada também em função das variações sazonais da qualidade da água bruta, principalmente no que se refere às mudanças no valor da turbidez da água bruta, pois, conforme foi visto anteriormente, a taxa de geração de lodo é diretamente proporcional à turbidez da água bruta.

No que se refere à duração de cada descarga, a mesma deverá ser estabelecida de forma que se tenha a interrupção da mesma no momento em que a parcela mais concentrada do lodo tenha sido descartada, evitando-se, na medida do possível, que se tenha diluição excessiva e desnecessária do lodo. Essas observações são importantes, pois, na prática, muitos operadores, não tendo consciência da importância da minimização do volume de lodo gerado, acabam optando pelo exagero na frequência e duração dos descartes, a fim de garantir maior “segurança” em relação à qualidade da água clarificada que sai dos decantadores. Essa atitude, aparentemente mais cômoda do ponto de vista de operação do sistema de tratamento de água, resulta em maiores dificuldades para o tratamento e disposição final dos resíduos gerados na ETA, além de provocar maiores perdas de água no sistema.

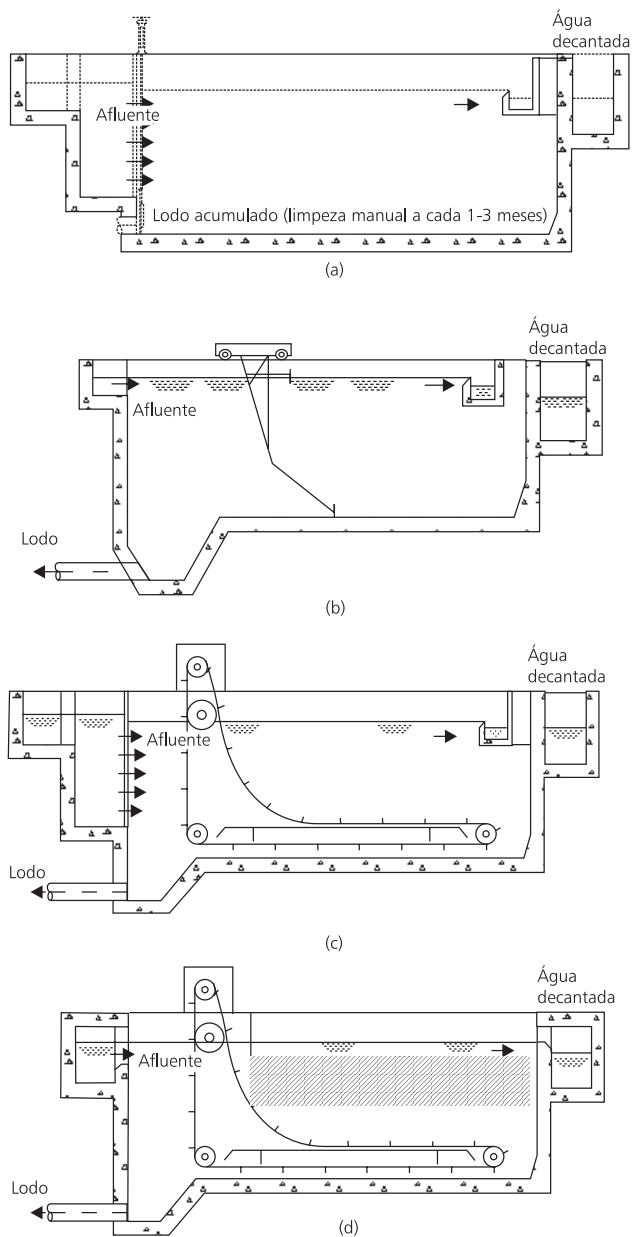


Figura 2.3 Exemplos esquemáticos de alguns tipos de decantadores utilizados em ETAs: a) Decantador retangular com retirada manual de lodo durante a limpeza da unidade. b) Decantador retangular com removedor de lodo tipo “ponte-rolante”. c) Decantador retangular com remoção de lodo por meio de correias dispostas no fundo da unidade. d) Decantador retangular contendo placas paralelas (sedimentação de alta taxa) e raspadores de fundo.

Outro aspecto interessante referente à massa total de sólidos suspensos totais (SST) gerada durante o tratamento da água em ETAs convencionais é o estabelecimento da parcela dessa massa que fica retida nos decantadores (descartada na forma de lodo) e da parcela que fica retida nas unidades de filtração subseqüentes (descartada juntamente com a água de lavagem desses filtros).

Quando o manancial superficial que abastece a ETA apresenta água com características que não se alteram acentuadamente ao longo das estações do ano, a relação entre o volume de lodo descartado dos decantadores e o volume de água de lavagem de filtros (ALAF) não apresenta grandes alterações sazonais.

Por outro lado, nos casos de mananciais que apresentam grandes variações sazonais na turbidez da água bruta afluente à ETA, observa-se, como consequência, uma relação “Volume diário de lodo/Volume diário de ALAF” também bastante variável ao longo do ano. Isso ocorre porque a água que sai dos decantadores apresenta geralmente turbidez pouco variável comparada às grandes oscilações de turbidez verificadas na água bruta, desde que seja mantida boa eficiência da coagulação/floculação antecedentes à decantação. Ou seja, a quantidade de sólidos suspensos que diariamente tem acesso aos filtros usualmente não varia com muita intensidade, mesmo quando a turbidez da água bruta oscila marcadamente ao longo do ano. Tais oscilações de turbidez acabam influenciando mais acentuadamente o volume diário de lodo removido e descartado pelos decantadores. Em outras palavras, nesses casos, os decantadores absorvem com maior intensidade que os filtros as oscilações de fluxo de sólidos afluentes à ETA.

Obviamente, nas situações em que se têm grandes oscilações sazonais na turbidez da água bruta para o projeto do sistema de remoção de lodo dos decantadores e das unidades de espessamento e desidratação desse lodo, é importante que se leve em conta as condições sazonais mais críticas de acumulação de lodo nos decantadores.

2.4 Exemplo (Hipotético) Ilustrativo dos Volumes de Lodo Presentes nas Várias Etapas de Tratamento em ETAs Convencionais

A primeira etapa de concentração do lodo de ETAs convencionais tem início no fundo dos próprios decantadores. Nesse local, as camadas inferiores de sólidos removidos da água floculada sofrem a ação de compressão exercida pelas novas camadas de sólidos formadas sucessivamente ao longo do tempo decorrido entre as operações de descarte de lodo dos decantadores. Configura-se, assim, o início da etapa denominada espessamento do lodo.

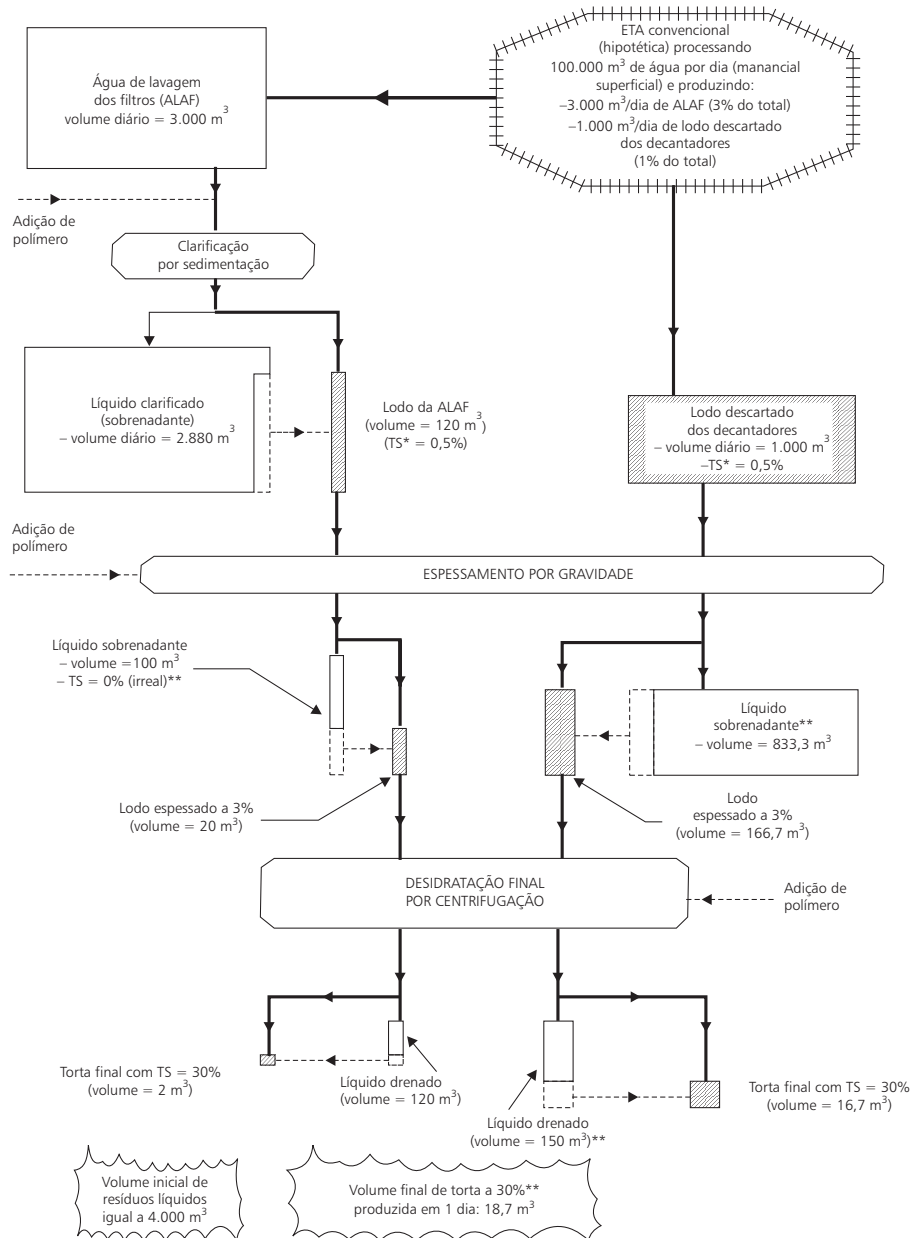
Entretanto, a operação de espessamento é complementada e realizada mais eficientemente em unidades específicas, separadas dos decantadores.⁽¹⁾ Geralmente, o lodo formado a partir de sais de ferro ou de alumínio, antes de entrar nessas unidades, recebe pequenas doses (0,1 a 1,0 g/Kg de sólidos secos contido no lodo) de polímeros sintéticos (ou, menos usualmente, cal, em dosagens bem maiores), resultando em eficiências de espessamento significativamente maiores.

O espessamento do lodo geralmente apresenta importância técnica e econômica significativa em sistemas de tratamento e disposição final de lodos de ETAs, pois, conforme já comentado anteriormente, a redução do volume de lodo proporcionada pelas unidades de espessamento permite que sejam adotadas unidades de desidratação final de lodos bem menores⁽¹⁾ (centrífugas, filtros-prensa ou outros). Além disso, alguns desses equipamentos operam mais eficientemente quando alimentados com lodo mais concentrado, ou seja, melhor espessados.

Com o intuito de fornecer ao leitor uma idéia da importância das etapas de espessamento e de desidratação do lodo gerado em ETAs, apresenta-se na Figura 2.4, na forma de diagrama de blocos, um exemplo ilustrativo dos volumes e concentrações de despejos líquidos gerados em uma estação de tratamento de água convencional (hipotética). Nesse exemplo, para a estimativa aproximada dos volumes e massas apresentadas, foram adotadas algumas hipóteses simplificadoras, as quais podem se afastar um pouco da realidade em algumas situações. Entretanto, essas simplificações tornam-se válidas considerando-se que o objetivo do exemplo é apenas fornecer idéia geral dos volumes envolvidos nas etapas de remoção de água de lodos de ETAs. As hipóteses adotadas para o exemplo da Figura 2.4 são as seguintes:

- i) Densidade do lodo igual à da água. (Na realidade, o correto seria utilizar a equação (2.1) para seu cálculo.)
- ii) Nos líquidos sobrenadantes após clarificação e nos líquidos drenados não há concentração residual de sólidos em suspensão.

Verifica-se, pelo exemplo (Figura 2.4), a importância do espessamento do lodo, pois, caso não se dispusesse dessa etapa de tratamento, as unidades de desidratação final (centrífugas, no caso) teriam de ser dimensionadas para processar 1.120 m³ de lodo a 0,5% (teor de sólidos) por dia. Por outro lado, com a colocação de unidades de espessamento por gravidade, no mesmo exemplo, as centrífugas receberiam apenas 186,7 m³ de lodo espessado (com teor de sólidos de 3%, em massa), ou seja, um volume seis vezes menor de lodo por dia. Esse exemplo hipotético ilustra também a magnitude da redução de volume dos resíduos líquidos gerados na ETA após o tratamento dos mesmos (lodos e águas de lavagem de filtros). Considerando-se as hipóteses simplificadoras adotadas, verifica-se que, dos 4.000 m³ de despejos líquidos gerados por dia (3.000 m³ de água de lavagem de filtros somados a 1.000 m³ de lodos descartados dos decantadores), resultou, no final, apenas 18,7 m³ de torta (contendo 30% de sólidos, em massa).



Observações:

* TS: teor de sólidos suspensos (em massa) presente no lodo ou na água de lavagem dos filtros.

** Hipóteses simplificadoras: i) densidade do lodo igual à da água; ii) a concentração de sólidos suspensos residual nos líquidos clarificados é igual a zero.

Figura 2.4 Exemplo ilustrativo dos volumes e concentrações de lodos ao longo das etapas de remoção de água em uma ETA hipotética provida de decantadores.

Considerando-se o volume de torta produzido a partir da água de lavagem dos filtros, observa-se redução de 1.500 vezes no volume inicial (3.000 m³). Por sua vez, tomando-se o volume de torta gerado a partir do lodo descartado dos decantadores, verifica-se, no exemplo hipotético, uma redução de 60 vezes no volume inicial (1.000 m³).

No próximo capítulo, é apresentada uma discussão mais detalhada a respeito da etapa de espessamento de lodos de ETAs, incluindo dois estudos de caso.

2.5 Referências Bibliográficas

1. CULP/WESNER/CULP (1986). *Handbook of Public Water Systems*. New York, Van Nostrand Reinhold Co.
2. DOE, P.W. (1990). Water Treatment Plant Waste Management. In: PONTIUS, F.W., ed. *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*. 4.ed. New York, American Water Works Association, McGraw-Hill.
3. GRANDIN, S.R. (1992). *Desidratação de Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
4. HUDSON, H.E. (1981). *Water Clarification Processes: Practical Design and Evaluation*. New York, Van Nostrand Reinhold Co.
5. KAWAMURA, S. (1991). *Integrated Design of Water Treatment Facilities*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
6. McTIGUE, N.E; KOPPERS, H.M.M.; CORNWELL, D.A. (1990). Regulations, Characteristics, and Analytical Considerations. In: CORNWELL, D.A.; KOPPERS, H.M.M., eds. *SLIB, ASCHLAMM, SLUDGE*. Denver, USA, American Water Works Association Research Foundation & JIWA Ltda., p.1-46.
7. REYNOLDS, T.D. (1982). *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. Boston, Massachusetts, PWS Publishers.
8. SMOLLEN, M.; KAFAAR, A. (1994). Electroosmotically Enhanced Sludge Dewatering: Pilot-Plant Study. *Water Science Technology – IAWQ*, v.30, n.8, p.159-168.
9. VANDERMEYDEN, C.; CONWELL, D.A. (1994). A U.S. Perspective of Beneficial Use Programs for Water Treatment Plant Residuals. In: *Management of Water and Wastewater Solids, for the 21st century: A global Perspective*. Proceedings, Washington, D.C., Seção 4, p.15-28, June.

Capítulo 3

Espessamento de Lodos de ETAs

Marco Antonio Penalva Realí e Leila Jorge Patrizzi

3.1 Considerações Iniciais

No capítulo anterior foram apresentadas algumas estratégias usuais para tratamento e disposição dos lodos gerados em estações de tratamento de água (ETAs) convencionais de ciclo completo, as quais empregam decantadores como unidades de pré-clarificação da água antes da filtração. Foram discutidas as principais características qualitativas e quantitativas dos lodos gerados nessas ETAs. Além disso, foi mostrada a importância das operações de remoção de água do lodo em situações nas quais se pretende minimizar os custos de transporte dos resíduos desidratados até o destino final.

Neste capítulo, pretende-se abordar os principais aspectos relacionados à primeira etapa de remoção de água de lodos de ETAs, realizada por intermédio da operação conhecida por espessamento de lodo, conforme mostrado na Figura 2.4 apresentada no Capítulo 2.

Nas próximas seções serão discutidos os principais tipos de unidades de espessamento de lodo de ETAs, suas características de projeto e funcionamento, além de alguns métodos de ensaios de laboratório, possíveis de serem utilizados para estimativa dos parâmetros de projeto de espessadores.

3.2 Tipos de Unidades de Espessamento de Lodo

Os tipos de unidades de espessamento de lodos mais comuns são os espessadores por gravidade (sedimentadores) e por flotação (flotação por ar dissolvido). Essas

unidades têm sido utilizadas tanto para lodos de estações de tratamento de esgotos (ETEs) quanto para lodos de estações de tratamento de águas de abastecimento (ETAs).

Para lodos de ETAs, o uso de adensadores por gravidade (sedimentadores) é mais antigo e mais disseminado, existindo atualmente um número significativo de unidades em operação em vários países do mundo. Nesse tipo de espessador, o lodo pode ser alimentado por batelada ou continuamente, dependendo das particularidades operacionais dos decantadores e demais unidades da ETA e das características dos lodos nela gerados.

Na Figura 3.1 é apresentado o desenho esquemático de um espessador de lodo por gravidade com alimentação contínua e formato circular em planta. Esse formato é o mais adotado para esse tipo de unidade. Nesse caso, o lodo é alimentado próximo ao centro da unidade, de onde é distribuído radialmente.

A parcela de água decantada no interior do espessador é retirada por meio de vertedores periféricos, tendo acesso à canaleta de saída existente ao longo de todo o perímetro da unidade de espessamento. Por sua vez, o lodo adensado é retirado continuamente do fundo do tanque. Geralmente, os espessadores são equipados com raspadores de fundo, os quais lentamente empurram o lodo sedimentado em direção ao centro do tanque, de onde é retirado.

Em espessadores de lodo por gravidade operados em regime de alimentação por batelada (usualmente, adota-se pelo menos duas unidades em paralelo), a parte situada mais próxima ao fundo de cada unidade é utilizada como depósito do lodo adensado. Cada unidade é alimentada esporadicamente com lodo proveniente dos decantadores da ETA (descartados de forma intermitente), até que fique completa. Após certo período de sedimentação, um dispositivo telescópico de descarte da água superficial (sobrenadante) é acionado para descarte dessa água, até atingir um nível predeterminado. Esse tubo telescópico pode ser abaixado várias vezes à medida que os sólidos se sedimentam, até atingir o nível de espessamento do lodo desejado.⁽³⁾

Quanto à alternativa de espessamento de lodo de ETAs por flotação [flotação por ar dissolvido (FAD)], deve-se ressaltar que a mesma constitui prática mais recente, existindo número menor de unidades em operação.

A partir dos anos 80, essa técnica vem conquistando a simpatia de projetistas, principalmente em países do norte da Europa e da África do Sul,⁽¹⁾ tendo em vista algumas vantagens inerentes ao espessamento de alguns tipos de lodo por flotação em relação ao adensamento por sedimentação, como: maiores taxas de aplicação de sólidos e de clarificação (unidades mais compactas), maiores concentrações de sólidos no lodo

espessado por flotação e maior versatilidade operacional da instalação devido à possibilidade de controle da quantidade de ar fornecida para a flotação.

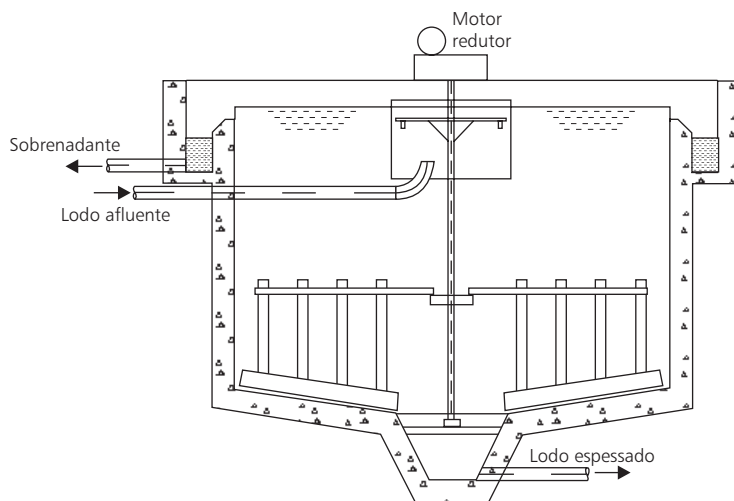


Figura 3.1 Desenho esquemático ilustrativo de espessador de lodo por gravidade de formato circular em planta.

Na Figura 3.2 é mostrado o esquema de uma unidade circular de espessamento de lodo por flotação (FAD) com escoamento contínuo. Ao contrário dos sedimentadores, nesse tipo de unidade o lodo é acumulado e espessado na superfície da água, e a saída da água clarificada ocorre por meio de aberturas situadas em região relativamente próxima ao fundo do flotador.

Para promover a ascensão do lodo em direção à superfície da unidade de flotação, são utilizadas microbolhas de ar, presentes em alta concentração na entrada do flotador. Essas microbolhas aderem-se às partículas de lodo pré-condicionado com polímero, aumentando o empuxo atuante sobre as mesmas e provocando seu movimento em direção à superfície.

As microbolhas de ar são geradas a partir da depressurização brusca – por meio de dispositivos adequados (registros de agulha ou bocais especiais) – de parcela da vazão efluente do flotador (vazão de recirculação), a qual é previamente saturada com ar no interior de uma câmara de saturação submetida à alta pressão (cerca de quatro a seis vezes a pressão atmosférica). Nessa pressão consegue-se dissolver uma quantidade bastante elevada de ar na água.

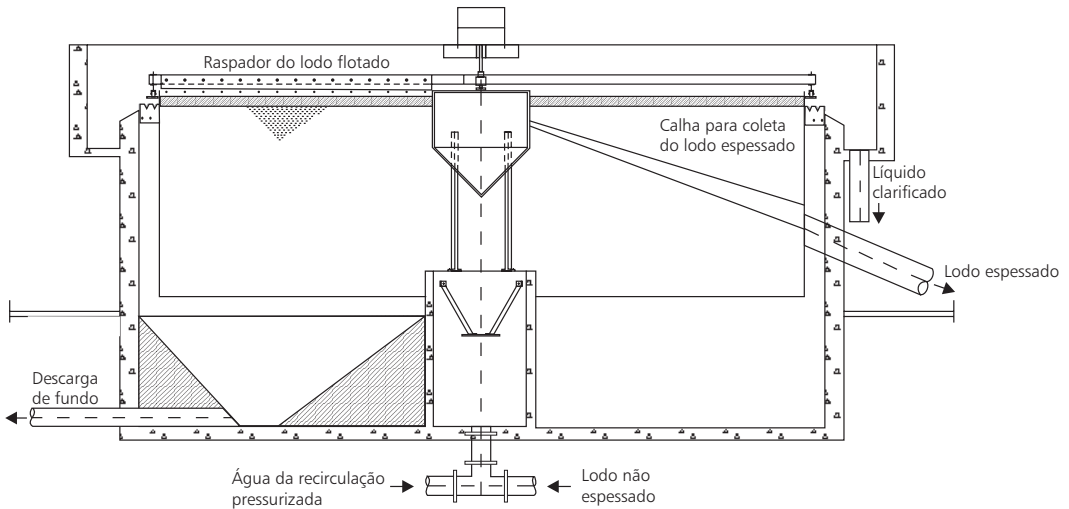
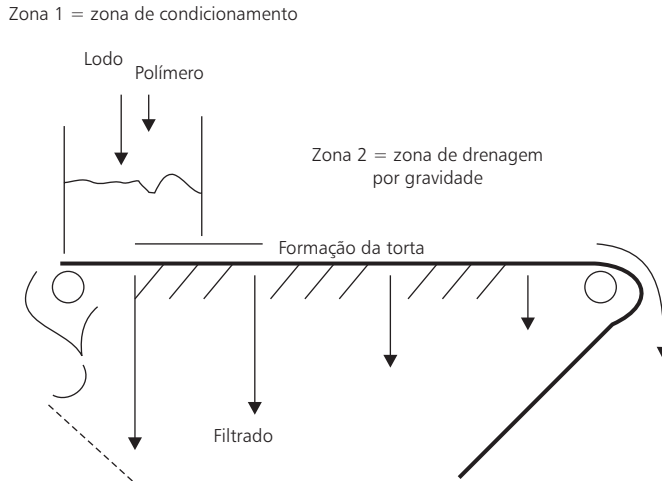


Figura 3.2 Esquema ilustrativo de unidade de espessamento de lodo por flotação por ar dissolvido com formato circular (em planta).

Assim, para ocorrer o espessamento por flotação, logo na entrada (pelo fundo) do flotador, promove-se a mistura da vazão de lodo afluente com a vazão de recirculação. Imediatamente antes desse ponto de mistura, a água da recirculação é despressurizada bruscamente, provocando o aparecimento de uma grande quantidade de microbolhas de ar na água. Essas microbolhas são geradas pelo desprendimento do ar anteriormente dissolvido na água pressurizada. O lodo é então acumulado na superfície do espessador, de onde é removido por meio de raspadores superficiais. Entre outros fatores, a frequência dos raspadores e a altura do lodo acima do nível de água influem marcadamente na eficiência do espessamento por flotação.

Para recolher eventual parcela de lodo que porventura venha a sedimentar no interior do flotador, é usual prever depósito no fundo da unidade. O lodo acumulado nesse depósito é esporadicamente descartado e encaminhado de volta ao processo. As unidades maiores geralmente possuem também raspadores de fundo. Mais adiante, na Seção 3.4, serão apresentados mais detalhes acerca do processo de flotação aplicado ao espessamento de lodo de ETAs, juntamente com estudo de caso.

Recentemente, surgiu no mercado um novo tipo de adensador mecânico chamado de adensador mecânico de esteiras. Na Figura 3.3 encontra-se apresentado um desenho esquemático desse tipo de equipamento cujo desenvolvimento teve por base os conhecidos filtros-prensa de esteira.^(13, 15) Observou-se que, no primeiro estágio desse tipo de equipamento, antes da fase de prensagem do lodo, ocorria bom grau de espessamento por gravidade. A partir dessa idéia foi idealizado o adensador de esteira que, basicamente, contempla apenas os primeiros estágios de um filtro-prensa de esteiras.



Fonte: Teixeira.⁽¹⁵⁾

Figura 3.3 Esquema ilustrativo do funcionamento básico de um de adensador mecânico de esteira.

De acordo com informações da literatura,⁽¹³⁾ trata-se de equipamento simples que, apesar da pouca experiência em aplicações com lodos de ETAs, tem produzido resultados bons com lodos ativados tratando esgoto sanitário, compatíveis com os obtidos com o emprego da flotação. Nesse tipo de adensador (Figura 3.3), o lodo é inicialmente condicionado quimicamente, por meio da adição de polímero sintético na região de condicionamento da esteira. Em seguida, na região denominada zona de drenagem por gravidade, ocorre a drenagem pela ação da gravidade de parcela de água presente no lodo. Essa água passa pelos interstícios do material que constitui a esteira rolante e é coletada por dispositivos situados abaixo da esteira. O lodo espessado é descartado na parte final da esteira.⁽¹⁵⁾

Deve-se salientar que a escolha do tipo de unidade de espessamento de lodos de ETAs deve sempre se pautar em resultados de ensaios de laboratório, ou escala-piloto, realizados com amostras representativas do lodo a ser espessado. Esses ensaios são importantes, tendo em vista que a maior ou menor facilidade de sedimentação nos adensadores por gravidade ou por esteiras, ou de flotação nos adensadores por flotação, depende das características do lodo considerado, as quais podem variar significativamente de uma ETA para outra.

Nesses ensaios devem ser avaliados, também, além do desempenho previsto para cada tipo de espessador, os tipos e dosagens de polímeros requeridos para o condicionamento do lodo antes de cada processo, possibilitando uma escolha mais segura da melhor alternativa para espessamento.

É necessário frisar que a seguir, no presente texto, será dada ênfase apenas às unidades de espessamento de lodo por flotação e por gravidade (sedimentadores), por constituírem alternativas até o momento mais usuais para o espessamento de lodos de ETEs e de ETAs.

3.3 Parâmetros de Projeto e Ensaio de Laboratório para Análise do Espessamento de Lodo por Gravidade

Principais Parâmetros de Projeto de Espessadores por Gravidade

O projeto de unidades de adensamento de lodos de ETAs por gravidade é feito tomando-se por base tanto a experiência com a operação de outras unidades empregadas em situações parecidas quanto os resultados obtidos com a realização de ensaios em escala de laboratório ou em escala-piloto.

Os principais parâmetros de projeto de unidades de espessamento por gravidade com escoamento contínuo são:

- i) *Taxa hidráulica de aplicação superficial (TAS)*: definida como o valor máximo de vazão de lodo aplicada por unidade de área útil (em planta) do adensador para obter um determinado grau de clarificação e de adensamento do lodo (m^3 de lodo/ m^2 de área . dd).
- ii) *Taxa de aplicação (ou de carga) de sólidos (TCS)*: define o fluxo de sólidos aplicado por unidade de área útil (em planta) do adensador para obter um determinado grau de clarificação e adensamento do lodo. Expresso em termos de massa seca (kg) de sólidos suspensos totais aplicados por unidade de tempo (dia), por unidade de área (m^2) de adensador (kg de SST/ m^2 . d).

Em adensadores por gravidade, esses parâmetros variam em função das características de sedimentabilidade do lodo a ser espessado. Lodos gerados em ETAs que possuem processo de abrandamento com cal, geralmente, produzem lodo bastante fácil de ser espessado. Nesses casos é possível a obtenção de lodo bastante espesso, mesmo com aplicação de valores elevados de TAS e de TCS.

Por outro lado, lodos gerados em ETAs que utilizam sais de ferro ou de alumínio como coagulantes apresentam, em geral, maior dificuldade de clarificação e espessamento por gravidade, comparados com o tipo de lodo anteriormente citado. Esse tipo de lodo requer, para seu espessamento, condicionamento químico por meio da aplicação de dosagens adequadas de polímeros sintéticos. Esses condicionadores químicos aumentam a eficiência de captura de sólidos do lodo,⁽²⁾ melhorando

marcadamente a clarificação do lodo nos adensadores. Esse tipo de lodo também pode ser condicionado com a adição de cal, em dosagens bem maiores que as de polímero, resultando em melhora das condições de espessamento, embora ocorra aumento significativo da massa de sólidos contida no lodo espessado devido à cal adicionada.⁽⁷⁾

Na Tabela 3.1 são mostradas faixas de valores usuais dos parâmetros de projeto de adensadores por gravidade, obtidos na literatura.⁽⁷⁾

Tabela 3.1 Faixas de valores usuais dos parâmetros de projeto de adensadores por gravidade.

Tipo de Lodo	TAS (m ³ /m ² .d)	TCS (Kg SST/m ² .d)	Teor de sólidos no lodo espessado (% em massa)
Lodos gerados em estações de abrandamento	-	146 a 292	15 a 35
Lodos de ETAs que utilizam sulfato de alumínio, condicionado com cal	4,1 a 8,2	25 a 50	6 a 9
Lodos de ETAs que utilizam sais de alumínio ou ferro, condicionados com polímero	7,0 a 8,8	50	2 a 5

Para o projeto de unidades de espessamento, além de se levar em conta informações da literatura, é sempre recomendável a realização de ensaios de laboratório com emprego de colunas de sedimentação. Tais ensaios, além de fornecer estimativas de parâmetros de projeto, permitem a avaliação segura do melhor tipo e dosagem de polímero para condicionamento do lodo.

Usualmente são utilizados dois conhecidos métodos para realização desses ensaios, o método de Coe e Clevenger, citado por Metcalf & Eddy⁽⁹⁾ (baseado na análise de fluxo de sólidos) e o método de Talmadge e Fitch.⁽¹⁴⁾ Embora o primeiro método envolva procedimentos que buscam uma representação mais próxima da realidade presente nos tanques de adensamento, trata-se de método muito mais trabalhoso que o de Talmadge e Fitch,⁽¹⁴⁾ exigindo a realização de vários ensaios de sedimentação em coluna, com amostras de lodo contendo diferentes concentrações de sólidos suspensos.

Por sua vez, o método de Talmadge e Fitch⁽¹⁴⁾ é bastante simples e rápido, e requer a realização de apenas um ensaio de sedimentação em coluna, conforme será visto a seguir e por ocasião da apresentação de um estudo de caso em que o método foi aplicado.

Como o referido estudo de caso não envolveu a aplicação do método de Coe e Clevenger, o mesmo não será descrito no presente texto. O leitor poderá encontrar descrições pormenorizadas desse método na literatura concernente.^(4,9,12 e 15)

Análise da Sedimentação de Lodos Durante Seu Espessamento por Gravidade

No interior de unidades de espessamento de lodos de ETAs por gravidade, normalmente ocorrem dois tipos de sedimentação de partículas, a “sedimentação tipo 3”, mais conhecida como “sedimentação impedida” ou “por zona”, e a “sedimentação tipo 4” ou “compressão”, que ocorre no fundo das unidades. Quando as partículas encontram-se muito próximas umas das outras, elas sedimentam como uma “massa de partículas”, apresentando uma interface bastante clara entre a “massa” e o líquido clarificado. Para uma partícula simples sedimentando em uma câmara de grandes dimensões, o movimento ascensional do líquido deslocado pela partícula é insignificante, mas se a concentração de partículas for suficientemente grande, a velocidade ascensional do líquido deslocado torna-se considerável em relação à velocidade de sedimentação da partícula. Como a velocidade de sedimentação é relativa à água, o movimento ascensional do líquido age no sentido de reduzir a velocidade na qual a partícula se aproxima do fundo da unidade.⁽²⁾ Este fenômeno de sedimentação é significativo quando se tem grande concentração de flocos. Esse é o caso dos espessadores de lodo de ETAs por gravidade.

A compressão ou sedimentação tipo 4 ocorre a partir do momento em que os flocos começam a se acumular no fundo da unidade de sedimentação. O peso das partículas é suportado pela massa em processo de compactação.⁽¹²⁾ A compressão é um processo relativamente lento, conforme mostrado na Figura 3.4.

Na Figura 3.4a encontra-se apresentado um esquema indicando as situações normalmente observadas durante a realização de um ensaio de sedimentação de lodo em uma coluna em escala de laboratório. No início do ensaio ($t = 0$) verifica-se a ocorrência de sedimentação impedida (SI). Decorrido o tempo “ t_1 ”, a massa de lodo sedimentou até o ponto de formar uma zona de água clarificada acima da camada de lodo (SI). Abaixo da região onde se verifica a sedimentação, a concentração de partículas torna-se tão grande que muitas partículas acabam mantendo contato físico entre si, configurando uma região de transição (T) entre a zona de sedimentação impedida (SI) e a zona de compressão (C). Abaixo da região de transição aparece a zona de compressão onde as partículas encontram-se em contato umas com as outras, iniciando-se a compressão.⁽¹²⁾

No tempo “ t_2 ”, a região de sedimentação impedida praticamente desaparece e a maior parte das partículas de lodo encontra-se na região de transição. No tempo “ t_3 ” desaparece a região de transição, permanecendo quase todo o lodo na região de compressão. Finalmente, no tempo “ t_4 ”, a sedimentação tipo 4 (compressão) encontra-se quase finalizada. Com base em teste de espessamento em coluna de sedimentação, conforme citado anteriormente, Talmadge e Fitch⁽¹⁴⁾ propuseram método expedito para a estimativa de parâmetros de projeto de unidades de adensamento por gravidade com escoamento contínuo. Na Figura 3.4b é apresentada uma curva típica de espessamento obtida em ensaios de espessamento de lodo em coluna e na Figura 3.4c são apresentados

os procedimentos gráficos propostos por Talmadge e Fitch⁽¹⁴⁾ para estimativa dos parâmetros de projeto.

Os procedimentos para obtenção dos referidos parâmetros de projeto são:⁽¹²⁾

1. Determinar o coeficiente angular do 1º tramo reto (V_0), que representa a velocidade de sedimentação requerida para a clarificação.
2. Estender as retas da região de sedimentação impedida (SI) e da região de compressão (C) e traçar a bissetriz do ângulo (ponto I do gráfico).
3. Desenhar a reta tangente à curva no ponto I.
4. Conhecendo-se a concentração inicial de lodo (C_0) e a altura inicial de lodo (H_0), adotar uma concentração final desejada no efluente (C_μ) e determinar a correspondente altura da interface (H_μ):

$$C_\mu H_\mu = C_0 H_0 \Rightarrow H_\mu = \frac{C_0 H_0}{C_\mu} \quad (3.1)$$

5. Desenhar, então, uma linha horizontal a partir de H_μ até interceptar a linha tangente ao ponto I e encontrar o tempo t_μ . Este será o tempo necessário para alcançar concentração C_μ no efluente.
6. Determinar, então, a área requerida para o espessamento A_C :

$$A_E = K_C Q_T \frac{t_\mu}{H_0} \quad (3.2)$$

em que:

Q_T = Vazão total afluente ao clarificador (para o caso de lodos ativados, Q_T = Vazão afluente ao tanque de aeração + Vazão de recirculação de lodo).

K_C = Fator de segurança devido à mudança de escala, usualmente adotado igual a 1,5.

7. Determinar a área requerida para a clarificação A_C :

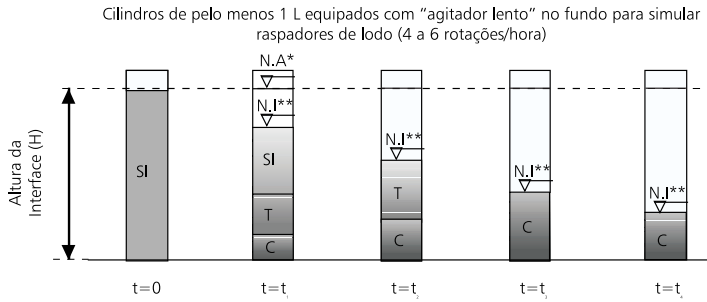
$$A_C = K_e \frac{Q}{V_0} \quad (3.3)$$

em que:

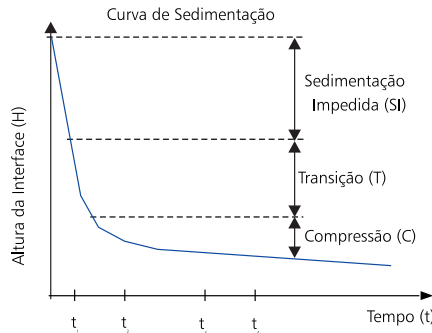
Q = vazão afluente ao clarificador (para o caso de lodos ativados, Q = vazão afluente ao tanque de aeração antes de junção da vazão de recirculação).

K_e = Fator de segurança devido à mudança de escala, usualmente adotando igual a 2,0 segundos.

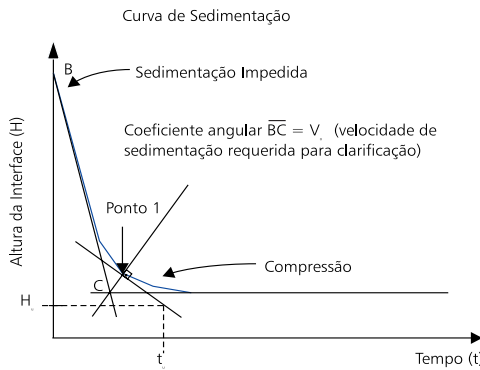
8. Escolher a maior área entre A_E e A_C .



(a)



(b)



(c)

Fonte: REYNOLDS.⁽¹²⁾ Adaptado.

Figura 3.4 Obtenção de dados para sedimentação tipo 3 e tipo 4 por meio da realização de ensaios de espessamento de lodo por gravidade. a) Situações verificadas ao longo do tempo de realização de ensaio de sedimentação. b) Curva de sedimentação obtida por meio da observação da interface de sólidos na coluna de sedimentação. c) Método gráfico para obtenção dos parâmetros de espessamento por gravidade.

3.4 Parâmetros de Projeto e Ensaio de Laboratório para Análise do Espessamento de Lodo por Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

Principais Parâmetros de Projeto de Espessadores por Flotação

Da mesma forma que para os espessadores por gravidade, o projeto de unidades de espessamento de lodo por flotação é feito usualmente com base tanto na experiência com a operação de outras unidades aplicadas em situações parecidas quanto em resultados de ensaios com instalações-piloto (com alimentação contínua) ou de laboratório (com alimentação por batelada).

Os principais parâmetros envolvidos no projeto de espessadores por flotação são:

- i) Taxa hidráulica de aplicação superficial (TAS) e taxa de aplicação (ou de carga) de sólidos (TCS), ambas definidas da mesma forma que para os espessadores por gravidade (conforme visto na Seção 3.3).
- ii) Relação entre o fluxo mássico de ar dissolvido fornecido para flotação e o fluxo mássico de sólidos suspensos totais (SST) afluentes ao flotador (A/S).

A relação A/S constitui parâmetro de grande importância para o processo de flotação de lodos, pois está diretamente relacionado à quantidade de microbolhas de ar - as quais atuam como agentes do processo - disponibilizadas por unidade de massa de SST. Usualmente, os espessadores de lodo gerados em ETEs com lodos ativados costumam operar eficientemente com valores de A/S na faixa de 0,020 a 0,040.^(6,10,11) Os valores de TAS geralmente variam de 50 a 200 $m^3/m^2.d^{(6)}$ e os valores de TCS, na faixa de 48 a 144 $Kg/m^2.d^{(10,6)}$ (sem aplicação de coagulante no lodo ativado), ou de 144 a 288 $Kg/m^2.d^{(10,6)}$ (com aplicação de coagulante).

Outros parâmetros que devem ser considerados no projeto de flotadores são tempo de detenção e taxa hidráulica de aplicação superficial na zona de reação de flotadores circulares, além da velocidade longitudinal da água nos flotadores retangulares.

Na Tabela 3.2 são mostrados alguns dados qualitativos obtidos em levantamento efetuado em 1982,⁽⁸⁾ no qual foi comparado o espessamento de lodos de ETAs por flotação e por gravidade. Nessa tabela é possível observar algumas vantagens e desvantagens da flotação em relação à sedimentação aplicada aos lodos produzidos nas ETAs estudadas. Os mesmos autores apresentaram os dados da Tabela 3.3,

referentes aos parâmetros operacionais dos espessadores por flotação levantados no mesmo estudo.

Tabela 3.2 Comparação do espessamento por flotação e por gravidade para lodos de estação de tratamento de água.

	Sedimentação	Flotação
Apropriado para lodos hidróxidos (> 40%)	–	++
Apropriado para lodos com baixa quantidade de hidróxidos (< 20%)	++	+
Sensitividade a variações na taxa de alimentação do lodo	+	++
Sensitividade a variações na alimentação de sólidos	+/-	++
Reação à dosagem de polímeros	++	+

Fonte: Levesque, L. (1982). *Traitement des Boues de Stations de Production d'Eau Potable. Etude de Synthese*. Association Française Pour L'Etude Des Eaux, Paris [apud King et al.⁽⁸⁾].

Verifica-se, em relação à experiência com lodos de ETAs, que, por se tratar-se de aplicação bastante recente, não há muitos registros de parâmetros de projeto na literatura. Recomenda-se, portanto, que sejam realizados, para cada situação, ensaios com a finalidade de comparar o desempenho da flotação com o de outras técnicas de espessamento de lodo de ETAs.

Tabela 3.2 Dados operacionais de espessadores de flotação em estações de tratamento de água.

Estação de Tratamento de Água	Concentração de Alimentação de Sólidos	Concentração de Sólidos Flotados	Taxa de Carga de Sólidos Secos (TCS)	Tipo de Lodo	Dosagem de Polímero
	(%)	(%)	(kg/m ² .d)		
Mouille	0,2-0,35	2,5-3,0	96,0-120,0	Fe	6 g/kg
Dunkerque	–	2,0-2,5	108,0-132,0	Fe	2 g/kg
Mervent	0,03-0,07	3,5-4,0	38,4-88,8	Al	1,5 mg/L
Saint Vicent (S. Graon)	–	≥2,5	52,8	Al	4-5 g/kg
Cholet	0,2	3,3-4,0	180,0	Al	2 g/kg
Santillana (Spain)	–	3,0-4,0	120,0	Al	

Fonte: Levesque, L. (1982). *Traitement des Boues de Stations de Production d'Eau Potable. Etude de Synthese*. Association Française Pour L'Etude des Eaux, Paris. Hurby, A. & Fayoux, C. (1983). *La Flottation des Boues: Un Avenir L'Eau, l'Industrie, les Nuisances*, 79: 20-24 [apud King et al.⁽⁸⁾].

O cálculo da relação A/S pode ser efetuado por meio da seguinte equação:⁽¹⁾

$$\frac{A}{S} = \frac{r \cdot a_p}{SST} \quad (3.4)$$

em que:

a_p : concentração de ar dissolvido presente na água da recirculação pressurizada (efluente da câmara de saturação) (mg/L).

r: razão de recirculação (relação entre a vazão de recirculação e a vazão de lodo afluente ao flotador).

SST: concentração de sólidos suspensos totais no lodo afluente ao flotador.

A concentração de ar a_p pode ser calculada da seguinte forma:

$$a_p = f \cdot C_H \cdot a_p \quad (3.5)$$

em que:

f: fator de eficiência da câmara de saturação, fornecido pelo fabricante ou pelo projetista da câmara (usualmente na faixa de 0,6 a 0,98, dependendo do tipo de câmara adotada).

C_H : concentração de saturação de ar dissolvido na água a uma determinada temperatura, de acordo com a lei de Henry (mg de ar dissolvido/L de água).

Para obtenção de dados de projeto de espessadores por flotação, Bratby & Ambrose⁽¹⁾ propuseram um método baseado em resultados de ensaios com instalação-piloto de flotação. Os autores definem três relações empíricas que definem os aspectos de clarificação e espessamento em unidades de flotação:

i) Para clarificação:

$$V_L = K_1 \left(\frac{A}{S} \right)^{K_2} - K_3 \quad (3.6)$$

ii) Para espessamento:

$$C_F = K_4 (d_w)^{K_5} (TCS)^{-K_6} \quad (3.7)$$

iii) E também:

$$d_T = (d_b + d_w) = d_w \left[\left(\frac{A}{S} \right)^{K_7} + K_8 \right] \left(\frac{A}{S} \right)^{-K_7} \quad (3.8)$$

em que:

K_1 a K_8 : são constantes referentes a um tipo particular de lodo a ser espessado por flotação cujos valores podem ser determinados em ensaios com instalação-piloto.

V_L : taxa descendente limite ($m^3/m^2 \cdot d$), definida como sendo o valor de TAS em que, para um determinado valor de A/S , os aglomerados “bolhas + partículas” começam a ser arrastados para baixo juntamente com o efluente do flotador.

C_F : concentração de sólidos no lodo espessado (%) no topo da unidade, isto é, onde os sólidos flotados são removidos pelos raspadores.

d_w : altura da camada de lodo acima do nível d'água no interior do flotador piloto (m).

d_b : altura da camada de lodo abaixo do nível d'água no interior do flotador piloto (m).

d_T : altura total da camada de lodo (m).

A seguir será apresentada, também, a descrição de método expedito desenvolvido por Reali⁽¹¹⁾ para obtenção de alguns parâmetros de espessamento por flotação, por meio de ensaios com equipamento de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório (flotateste). Deve-se ressaltar que tal método não oferece tanta segurança para projeto de unidades reais de flotação quanto aquele proposto por Bratby & Ambrose⁽¹⁾ utilizando instalação-piloto com escoamento contínuo. Entretanto, trata-se de método muito mais simples que o último, que exige apenas pequeno volume de lodo para realização dos ensaios, conforme será visto no estudo de caso e na descrição do método apresentados a seguir.

Método Proposto para Obtenção de Parâmetros Básicos de Espessamento por Flotação com Base em Ensaios com Colunas de Flotação em Escala de Laboratório

Análogo ao método de Talmadge e Fitch proposto para análise do espessamento de lodo por gravidade, o autor do presente capítulo desenvolveu método expedito para obtenção de parâmetros de espessamento por flotação.⁽¹¹⁾ Tal método preconiza a realização de ensaio em coluna de flotação por ar dissolvido com alimentação por batelada, visando à obtenção de curva de espessamento por flotação.

Inicialmente, deve-se fixar como ponto de referência a base inferior da coluna de flotação, de forma inversa aos ensaios em coluna de sedimentação.

A partir desse referencial, deve-se anotar os valores de altura (mm) da interface lodo/água clarificada em função do tempo (minutos) decorrido após o início do ensaio de espessamento por flotação e o início do ensaio é considerado logo após a inserção e mistura do volume de água saturada, conforme proposto pelo autor do método.⁽¹¹⁾

Os ensaios de espessamento de lodo por flotação são realizados em intervalo de tempo bem menor (cerca de 20 minutos é suficiente na maioria dos casos) que aqueles requeridos pelos ensaios de espessamento por sedimentação (usualmente acima de 5 horas). Isso decorre do fato de a flotação constituir processo de alta taxa, em que os aglomerados “flocos de lodo + microbolhas de ar” no interior da coluna de flotação adquirem velocidades ascensionais bem mais elevadas que os lodos nas colunas de sedimentação. Na Figura 3.5 aparece uma foto de um equipamento de flotação apropriado para a realização de ensaios estáticos de espessamento de lodo em colunas de flotação, designado por flotateste.



Figura 3.5 Fotografia ilustrando da instalação de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório (flotateste).

Esse equipamento é provido de seis colunas de flotação. Essas colunas possuem em seu interior dispositivos de mistura de condicionadores químicos com eixos móveis. Esses eixos são acionados por moto-redutores apropriados, os quais são projetados de forma a permitir que, após a realização da mistura do condicionador (geralmente polímeros sintéticos), seja possível a retirada dos agitadores do interior das colunas. Dessa forma, após a retirada dos agitadores, promove-se a inserção da parcela de água proveniente da câmara de saturação, iniciando-se o processo de flotação.

A câmara de saturação desse equipamento opera em regime de batelada, possuindo dispositivos de controle de entrada e saída de ar comprimido e de água de recirculação. Assim, após a inserção de volume suficiente de água em seu interior, promove-se a abertura do registro de controle de ar comprimido, até que se obtenha a pressão desejada no interior da câmara (usualmente na faixa de 4 a 6 kgf/cm²). Em seguida, abre-se cuidadosamente a válvula de controle de purga do ar em excesso, mantendo-se aberto o registro de entrada de ar comprimido, de forma a manter constante a pressão de saturação no valor escolhido. Para a melhor dispersão do ar comprimido no volume de água da câmara de saturação, o equipamento dispõe de pedra porosa, a qual produz bolhas finas que facilitam a dissolução do ar na água submetida a alta pressão. Nessas condições, deve-se manter o ar borbulhando durante cerca de 10 minutos, para que ocorra a completa saturação da água com ar dissolvido na pressão escolhida.

Após decorrido o tempo de saturação da água de recirculação pressurizada, deve-se proceder ao fechamento das válvulas de entrada e saída de ar comprimido, mantendo-se sempre a pressão escolhida no interior da câmara.

Assim, pode-se resumir os procedimentos de ensaio de espessamento de lodo por flotação, nesse tipo de equipamento, da seguinte forma:

1. Inserir o volume predeterminado da amostra do lodo a ser investigado no interior da coluna de flotação cuja concentração de SST deve ser previamente determinada.
2. Promover a adição e mistura adequada do polímero escolhido para condicionamento do lodo a ser espessado. Para isso deve-se fixar as condições de mistura (gradiente médio de velocidade e tempo de mistura) e a dosagem de polímero utilizada no ensaio (mg de polímero/g de SST no lodo). A mistura do polímero deve ser efetuada no interior da própria coluna de flotação.
3. Promover a mistura de volume predeterminado de água de recirculação proveniente da câmara de saturação (água previamente saturada com ar a alta pressão) por meio da abertura do registro de agulha existente na base das colunas. Esse volume deve ser fixado de acordo com a razão de recirculação (em volume) que se deseja simular para o processo de flotação (volume de água saturada/volume de amostra de lodo condicionado).

4. Após a mistura do volume de água saturada ao volume de amostra de lodo, com auxílio de cronômetro, deve-se observar e anotar, para diversos intervalos de tempo de ensaio, as alturas da interface “camada de lodo/água clarificada” correspondente a cada intervalo de tempo. Para isso, as colunas de flotação contam com marcação de altura (em mm) a partir das bases das mesmas.
5. Plotar os pares de pontos “Altura da interface”, “Intervalo de tempo correspondente”, de forma a obter uma curva de espessamento por flotação, conforme mostrado na Figura 3.6.

Obtida a curva de espessamento por flotação, de forma análoga às curvas de adensamento por sedimentação descritas na seção 3, adota-se um valor de C_u (valor teórico de concentração de SST que se desejaria obter no lodo após seu espessamento em uma unidade de flotação hipotética). Em seguida, procede-se à obtenção do valor de H_u teórico correspondente ao valor de C_u adotado, utilizando-se a seguinte equação:

$$H_u = \frac{C_0^* H_0}{C_u} \quad (3.9)$$

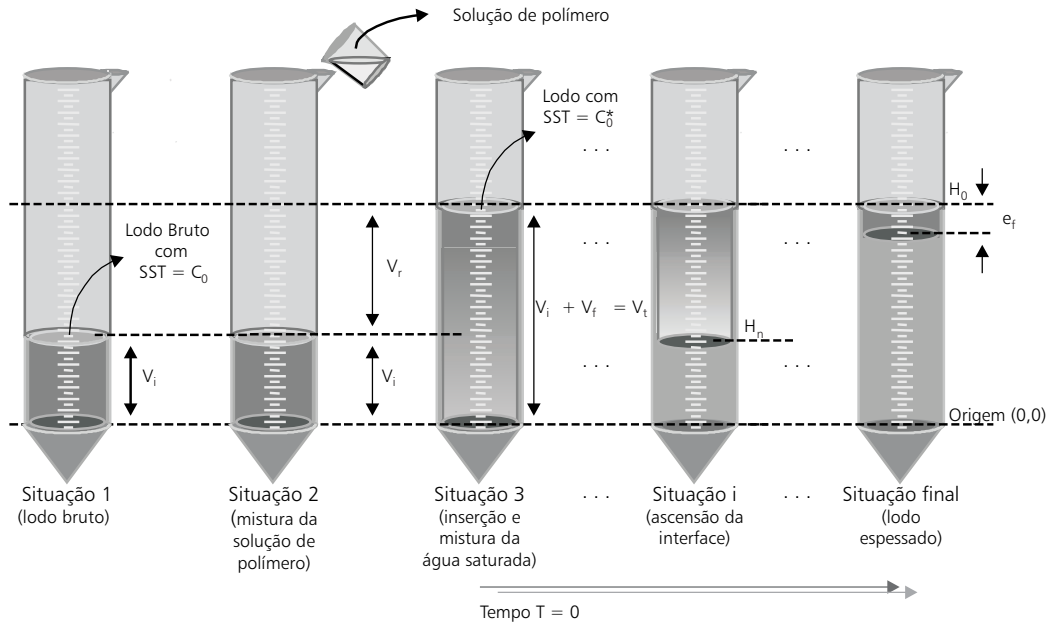
em que:

H_0 : altura total da coluna líquida (lodo) após a mistura do volume de recirculação pressurizada (L).

C_0 : concentração de sólidos suspensos totais (SST) no lodo após a mistura de recirculação pressurizada (mg/L), dada pela equação a seguir:

$$C_0^* = \frac{C_0 \cdot V_i}{(V_r + V_i)} \quad (3.10)$$

Graficamente, conforme indicado na Figura 3.6, com base na reta representativa da região de espessamento por flotação, é possível a estimativa de t_u a partir do valor de H_u . A reta da região de espessamento é obtida, graficamente, prolongando-se as retas das regiões de compressão e de clarificação e tomando-se a bissetriz do ângulo a resultante. No ponto de interseção da bissetriz com a curva obtida no ensaio com a coluna de flotação, traça-se uma reta tangente a esse ponto, a qual constitui a reta da região de espessamento.



- V_i = Volume inicial de lodo bruto (sem mistura da recirculação)
- V_r = Volume de água recirculada (vem da câmara de saturação)
- C_0 = Concentração de sólidos suspensos totais no lodo bruto (sem mistura da recirculação)
- C_0^* = Concentração de sólidos suspensos totais no lodo após diluição com a água da recirculação

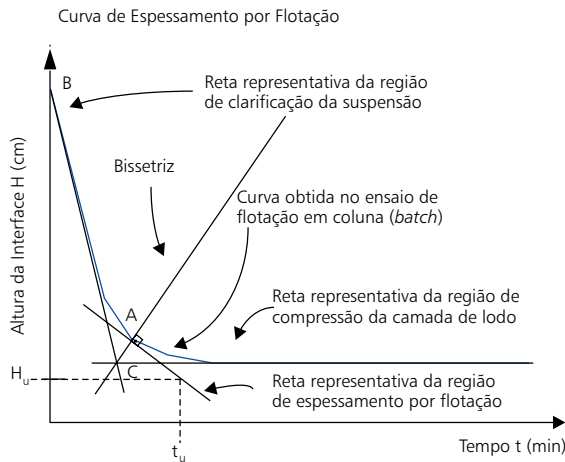


Figura 3.6 Ilustração dos procedimentos para execução de ensaios de espessamento de lodos por flotação (a) e exemplo de curva de espessamento de lodo por flotação obtida durante um ensaio típico (b).

Em seguida, analogamente aos ensaios de sedimentação em coluna, pode ser obtida para os ensaios de espessamento de lodo em colunas de flotação (flotateste) a seguinte previsão da área teórica de um flotor hipotético com escoamento contínuo:

$$A_e = (Q_a + Q_r) \frac{t_u}{H_0} \cdot Ke \quad (3.11)$$

em que:

Q_a = vazão afluente do lodo a ser espessado no flotor hipotético com escoamento contínuo (L^3/T).

Q_r = vazão de recirculação no flotor hipotético (L^3/T).

$(Q_a + Q_r)$ = vazão total de lodo afluente ao flotor após a mistura da recirculação pressurizada.

Ke = fator de segurança, devido à mudança de escala (maior que 1,0).

Mas:

$$Q_r = r \cdot Q_a \quad (3.12)$$

em que:

r : razão de recirculação pressurizada $\left(\frac{Q_r}{Q_a} \right)$

Dessa forma, com base na curva de espessamento obtida no ensaio com a coluna de flotação, pode-se obter a área teórica para espessamento, estimada do flotor hipotético da seguinte forma:

$$A_{Esp} = Q_a (1 + r) \frac{t_u}{H_0} \cdot Ke \quad (3.13)$$

Os autores⁽¹¹⁾ definiram, então, parâmetro de referência para espessamento (F_E), igual a:

$$F_E = \frac{H_0}{t_u(1+r)} \quad (LT^{-1}) \quad (3.14)$$

Então, a área teórica para espessamento é dada por:

$$A_{\text{Esp}} = \frac{Q_a \cdot K_e}{F_E} (L^2) \quad (3.15)$$

Sendo o parâmetro de referência para espessamento (F_E) inversamente proporcional ao valor da área teórica do reator, um valor maior de F_E redundará em valor teórico menor de área necessária para espessamento, o que indica que, em um ensaio de coluna, quanto maior o valor de F_E , maior a velocidade de flotação do lodo investigado (mais eficiente é o processo), pois F_E possui unidade de velocidade.

Ainda analogamente aos ensaios de sedimentação em coluna proposto por Talmadge e Fitch, é possível efetuar estimativa da área teórica necessária para a clarificação por flotação em uma unidade hipotética com escoamento contínuo. Para isso, basta o cálculo da taxa de clarificação por flotação (V_0), numericamente igual ao coeficiente angular da reta BC da curva obtida no ensaio com a coluna de flotação (Veja a Figura 3.6). Dessa forma, a área teórica para clarificação (A_C) em um flotor hipotético pode ser estimada:

$$A_C = \frac{Q_t \cdot K_c}{V_0} = \frac{Q_a(1+r) \cdot K_c}{V_0} (L^2) \quad (3.16)$$

Em que K_c = fator de segurança devido à mudança de escala (maior que 1,0).

É possível então definir um “parâmetro de clarificação por flotação” (F_C) igual a :

$$F_C = \frac{V_0}{1+r} (LT^{-1}) \quad (3.17)$$

Dessa forma, a área teórica estimada para a flotor e hipotético fica:

$$A_C = \frac{Q_a \cdot K_c}{F_C} (L^2) \quad (3.18)$$

Da mesma forma que comentado para o parâmetro F_E , quanto maior o parâmetro de referência para clarificação por flotação (F_C), menor a área teórica estimada para a clarificação no flotor hipotético. Assim, quanto maior o valor de F_C , maior a velocidade de clarificação por flotação do lodo investigado, pois F_C também possui unidade de velocidade.

3.5 Estudos de Casos

Considerações Iniciais

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos em dois estudos de caso em que foram comparadas as eficiências do espessamento de lodo obtidas pela aplicação das técnicas de sedimentação e de flotação. No primeiro caso, foi investigado o espessamento de lodo proveniente da descarga dos decantadores de ETA que utiliza sulfato de alumínio como coagulante primário (ETA Capim Fino, da cidade de Piracicaba, SP). No segundo caso, o lodo utilizado no estudo era proveniente de ETA que emprega cloreto férrico como coagulante (ETA Paiol, da cidade de Araraquara, SP). Os dois estudos de caso foram realizados utilizando-se unidades de espessamento por flotação e por gravidade existentes no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Tais estudos fizeram parte do projeto de pesquisa desenvolvido na referida instituição dentro do Programa de Saneamento Ambiental – PROSAB/TEMA 4/Edital 1.

Para o desenvolvimento dos trabalhos foram utilizados o método para ensaio de espessamento de lodo por gravidade e o método para ensaio de espessamento por flotação descritos no presente capítulo. Em todos os ensaios de espessamento de lodo por flotação foi utilizado equipamento de flotateste (veja a Figura 3.5). Para os ensaios de espessamento por gravidade foi utilizada a mesma instalação, com a transformação das colunas de flotação em colunas de sedimentação, por meio do fechamento das válvulas da tubulação que comunica as colunas à câmara de saturação do flotateste. Dessa forma, com a utilização das mesmas colunas foi possível fazer uma comparação mais segura dos resultados dos ensaios de espessamento por flotação com aqueles obtidos durante os ensaios de espessamento por gravidade.

Estudo de Caso 1: Lodo da ETA Capim Fino de Piracicaba, SP

A ETA Capim Fino, da cidade de Piracicaba, SP, recebe água bruta proveniente do Rio Corumbataí, possuindo capacidade para tratar 1.100 L/s. Essa ETA é do tipo convencional de ciclo completo, ou seja, dispõe de unidades de mistura rápida, floculação, decantação, filtração e desinfecção final. Para a coagulação da água bruta era utilizado sulfato de alumínio. O sistema de decantação é composto de quatro unidades convencionais com formato retangular (em planta) e escoamento horizontal. Dois desses decantadores dispunham de removedores mecânicos de lodo do tipo móvel, com aspiração do lodo por sifonamento (tipo Clarivac).

Para o estudo foram coletadas amostras do lodo descartado de um dos decantadores que contavam com removedor de lodo, junto ao canal de descarga do mesmo (veja a Figura 3.6).

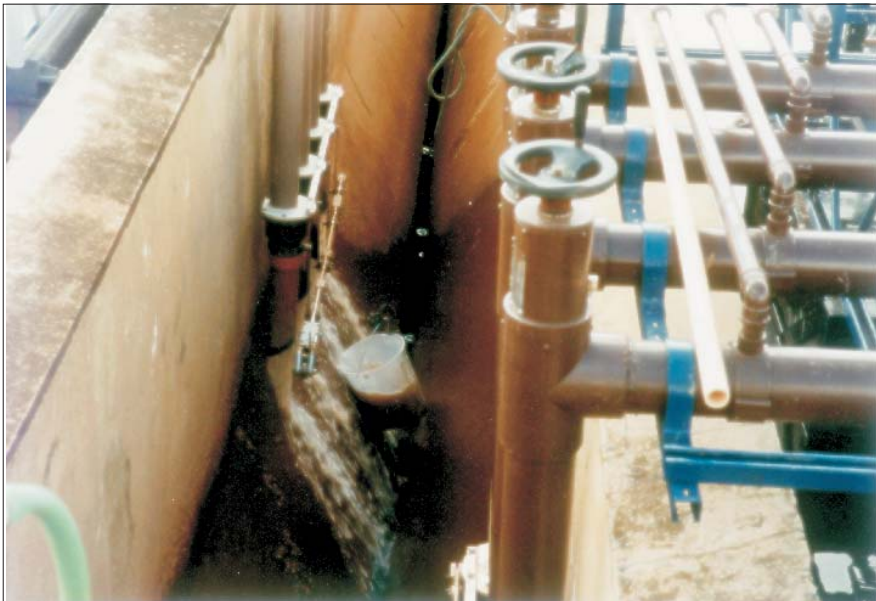


Figura 3.7 Vistas dos decantadores e do dispositivo móvel de remoção de lodo por sifonamento utilizado nos decantadores da ETA Capim Fino.

Durante todos os ensaios de espessamento, tanto por sedimentação quanto por flotação, foram mantidos fixos os seguintes parâmetros: temperatura das amostras $20 \pm 2^\circ\text{C}$, SST no lodo bruto na faixa de 5.000 a 6.500 mg/L, solução de polímero (0,10%). Nos ensaios de flotação foram mantidas fixas a pressão de saturação igual a 450 KPa e a recirculação de 80%, em volume.

O critério para a seleção do melhor tipo de polímero e respectiva dosagem ótima consistiu na comparação dos valores de F_E e F_C . Quanto maior o valor de F_C e F_E , melhores as condições de espessamento e, conseqüentemente, menor a área teórica, em planta, requerida para a unidade de espessamento. Também foi monitorado o teor de sólidos no lodo espessado em cada ensaio. Foram investigados os seguintes polímeros: W-360 (catiônico) com baixo peso molecular; N-2 (catiônico) com alto peso molecular e densidade de carga entre 1,005-1,040 (g/cm^3); W-320 (aniônico) com baixo peso molecular; W-301 (aniônico) com alto peso molecular; W-303 (não-iônico) com baixo peso molecular; e N-6 (não-iônico) com alto peso molecular.

Discussão dos Resultados Referentes aos Ensaios de Espessamento por Flotação (Lodo da ETA Capim Fino)

Os resultados dos ensaios para seleção do tipo e dosagem de polímero adequados para o espessamento por flotação são mostrados nas Figuras 3.8 e 3.9, enquanto na Tabela 3.4 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método descrito na seção “Método Proposto para Obtenção de Parâmetros Básicos de Espessamento por Flotação com Base em Ensaios com Colunas de Flotação em Escala de Laboratório”, com base nas curvas de espessamento obtidas.

Na Figura 3.8 são apresentadas, a título de exemplo, apenas as curvas de espessamento por flotação associadas a diversas dosagens do polímero W-320. Dessa mesma forma, foram realizados ensaios para todos os demais polímeros, com vistas à obtenção da melhor dosagem de cada polímero. Entretanto, os gráficos referentes a esses ensaios, similares aos da Figura 3.8, não são apresentados neste texto, mas apenas os parâmetros de espessamento obtidos a partir de tais gráficos (Veja a Tabela 3.4.) Após a comparação de cada conjunto de curvas referentes a cada polímero (similar à Figura 3.8), foi selecionada a curva associada à melhor dosagem. Essas curvas representativas das melhores dosagens de cada polímero são apresentadas na Figura 3.9.

Na Tabela 3.4, encontram-se os resultados obtidos com a aplicação do método para ensaio de espessamento por flotação, referentes ao estudo de cada dosagem de polímero (o parâmetro F_E dos ensaios de flotação e sedimentação foram estimados adotando-se C_u igual a 3,5%). As dosagens selecionadas como ótimas para cada polímero apresentam-se hachuradas na Tabela 3.4. Analisando-se os dados dessa tabela, verifica-se que a dosagem de 3,72 g/kg de SST para W-320 forneceu os melhores resultados (teor de sólidos no lodo de 6,1%, turbidez do subnadante de 1,7 uT, parâmetro de espessamento $F_E = 12,0$ cm/min. e o parâmetro de clarificação $F_C = 16,3$ cm/min).

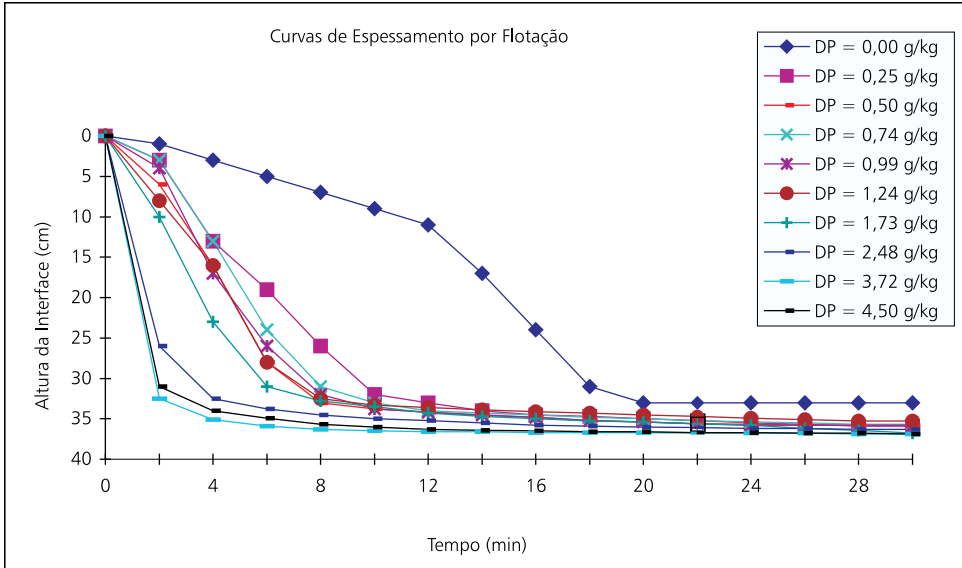


Figura 3.8 Curvas de espessamento por flotação associadas a diversas dosagens do polímero W-320 utilizado no condicionamento do lodo da ETA Capim Fino, que utiliza sulfato de alumínio como coagulante.

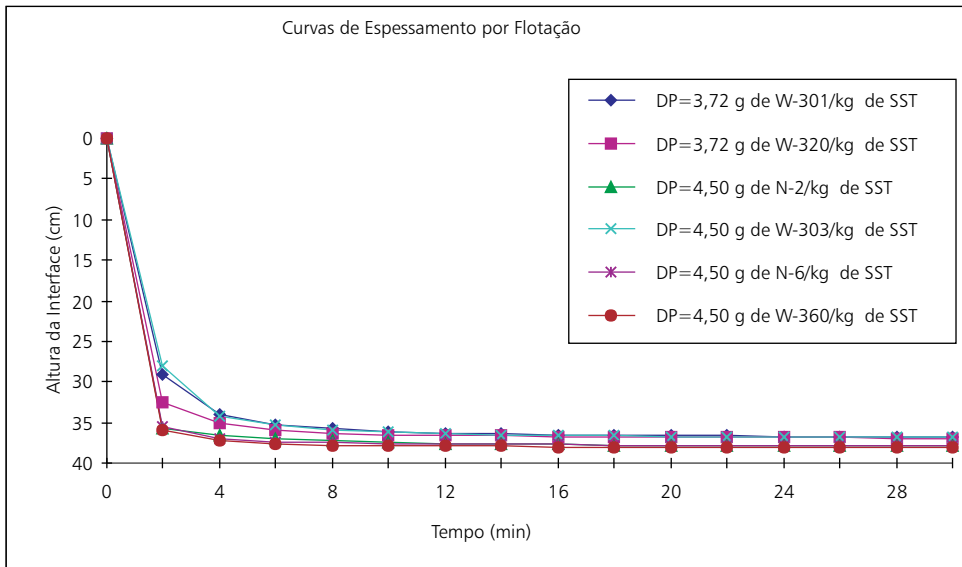


Figura 3.9 Curvas de espessamento por flotação associadas às dosagens ótimas selecionadas para cada polímero estudado no condicionamento do lodo da ETA Capim Fino, que utiliza sulfato de alumínio como coagulante.

Tabela 3.4 Resultados dos ensaios de espessamento por flotação do lodo da ETA Capim Fino.

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	Valor de A/S	F _E (cm/min) Parâmetro de Espessamento *	F _C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Subnadante (uT)
01	W-320 (aniônico)	0,00	0,015	-	0,5	1,4	25,0
02	W-320 (aniônico)	0,25	0,015	0,9	1,5	3,1	5,9
03	W-320 (aniônico)	0,50	0,015	-	-	4,1	7,1
04	W-320 (aniônico)	0,74	0,015	-	-	4,9	3,0
05	W-320 (aniônico)	0,99	0,015	-	-	4,4	3,7
06	W-320 (aniônico)	1,24	0,015	-	-	4,1	5,1
07	W-320 (aniônico)	1,73	0,015	-	-	6,0	2,7
08	W-320 (aniônico)	2,48	0,015	-	-	6,0	3,6
09	W-320 (aniônico)	3,72	0,015	12,0	16,3	6,1	1,7
10	W-320 (aniônico)	4,50	0,015	5,6	15,0	5,9	2,4
11	W-301 (aniônico)	0,25	0,015	0,6	1,0	3,1	5,8
12	W-301 (aniônico)	0,74	0,015	-	-	4,1	5,9
13	W-301 (aniônico)	1,24	0,015	-	-	4,9	5,7
14	W-301 (aniônico)	1,73	0,015	-	-	5,1	5,5
15	W-301 (aniônico)	2,48	0,015	-	-	4,4	2,9
16	W-301 (aniônico)	3,72	0,015	5,5	14,5	6,1	3,8

Tabela 3.4 Resultados dos ensaios de espessamento por flotação do lodo da ETA Capim Fino. (Continuação.)

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	Valor de A/S	F _E (cm/min) Parâmetro de Espessamento	F _C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Subnadante (uT)
17	W-301 (aniônico)	4,50	0,015	3,7	13,0	5,8	1,8
18	N-2 (catiônico)	0,25	0,015	2,2	5,5	3,9	2,4
19	N-2 (catiônico)	1,24	0,015	-	-	4,9	3,7
20	N-2 (catiônico)	2,48	0,015	-	-	5,7	2,5
21	N-2 (catiônico)	3,72	0,015	-	-	6,7	1,6
22	N-2 (catiônico)	4,50	0,015	27,4	18,0	6,9	0,6
23	N-2 (catiônico)	6,20	0,015	7,8	17,1	5,7	0,8
24	W-360 (catiônico)	0,74	0,015	2,2	5,5	2,5	1,5
25	W-360 (catiônico)	1,24	0,015	-	-	4,8	0,8
26	W-360 (catiônico)	3,72	0,015	-	-	5,7	1,5
27	W-360 (catiônico)	4,50	0,015	19,3	17,9	6,6	1,3
28	W-360 (catiônico)	6,20	0,015	2,7	14,0	4,2	1,3
29	N-6 (Não iônico)	0,74	0,015	2,1	4,0	4,1	5,8
30	N-6 (Não iônico)	1,24	0,015	-	-	6,0	1,5
31	N-6 (Não iônico)	2,48	0,015	-	-	4,1	2,5
32	N-6 (Não-iônico)	3,72	0,015	-	-	6,1	2,6

Tabela 3.4 Resultados dos ensaios de espessamento por flotação do lodo da ETA Capim Fino. (Continuação.)

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	Valor de A/S	F_E (cm/min) Parâmetro de Espessamento	F_C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Subnadante (uT)
33	N-6 (Não-iônico)	4,50	0,015	17,4	17,8	6,7	1,9
34	N-6 (Não-iônico)	6,20	0,015	5,8	16,8	5,7	1,3
35	W-303 (Não-iônico)	0,74	0,015	2,0	4,5	3,9	8,0
36	W-303 (Não-iônico)	1,24	0,015	-	-	5,1	6,9
37	W-303 (Não-iônico)	3,72	0,015	-	-	6,0	2,6
38	W-303 (Não-iônico)	4,50	0,015	3,8	14,0	6,0	2,3
39	W-303 (Não-iônico)	6,20	0,015	2,3	7,0	5,8	2,5

* Os valores de F_E foram calculados adotando-se Cu igual a 3,5%.

Dosagens maiores, como 4,50 g/kg de SST, passaram a prejudicar a eficiência do sistema (teor de sólidos no lodo de 5,9%, turbidez no subnadante de 2,4 uT, $F_E = 5,6$ cm/min e $F_C = 15,5$ cm/min). Com base nesses resultados, para os ensaios de espessamento por flotação por ar dissolvido com utilização do polímero W-320, concluiu-se que a dosagem de 3,72 g/kg de SST pode ser considerada como a dosagem ótima para o caso em questão (lodo proveniente de decantadores de ETA que utilizava sulfato de alumínio como coagulante primário).

Ainda com base nos resultados mostrados na Tabela 3.3, comparando-se todos os polímeros testados, verifica-se que tanto o polímero W-360 (catiônico) quanto os polímeros N-2 (catiônico) e N-6 (não-iônico) apresentaram os melhores resultados de espessamento, produzindo os maiores valores de teor de sólidos no lodo espessado (6,7% a 6,9 %), maiores valores de F_C (17,8 a 18,0 cm/min) e maiores valores de F_E (17,4 a 27,4 cm/min) nos ensaios de espessamento de lodo por flotação. Dentre esses três polímeros, o N-2 (catiônico) foi o que permitiu o melhor desempenho do espessamento por flotação.

Resultados dos Ensaios de Espessamento por Gravidade (Lodo da ETA Capim Fino)

Visando à comparação com o espessamento por flotação, foram também realizados ensaios de adensamento por gravidade com os mesmos tipos de polímeros, variando a dosagem de polímero aplicada. Na Figura 3.10 são apresentadas, a título de exemplo, apenas as curvas de espessamento por gravidade associadas a diversas dosagens do polímero N-2.

Dessa mesma forma, foram realizados ensaios de adensamento por gravidade para todos os demais polímeros para possibilitar a obtenção da melhor dosagem de cada polímero. Os gráficos similares aos da Figura 3.10 não se encontram apresentados no presente texto, mas apenas os parâmetros de espessamento obtidos de tais gráficos (veja a Tabela 3.5).

A partir de cada conjunto de curvas de adensamento por gravidade referentes a cada polímero, foi selecionada a curva associada à melhor dosagem. Essas curvas representativas das melhores dosagens são apresentadas na Figura 3.11.

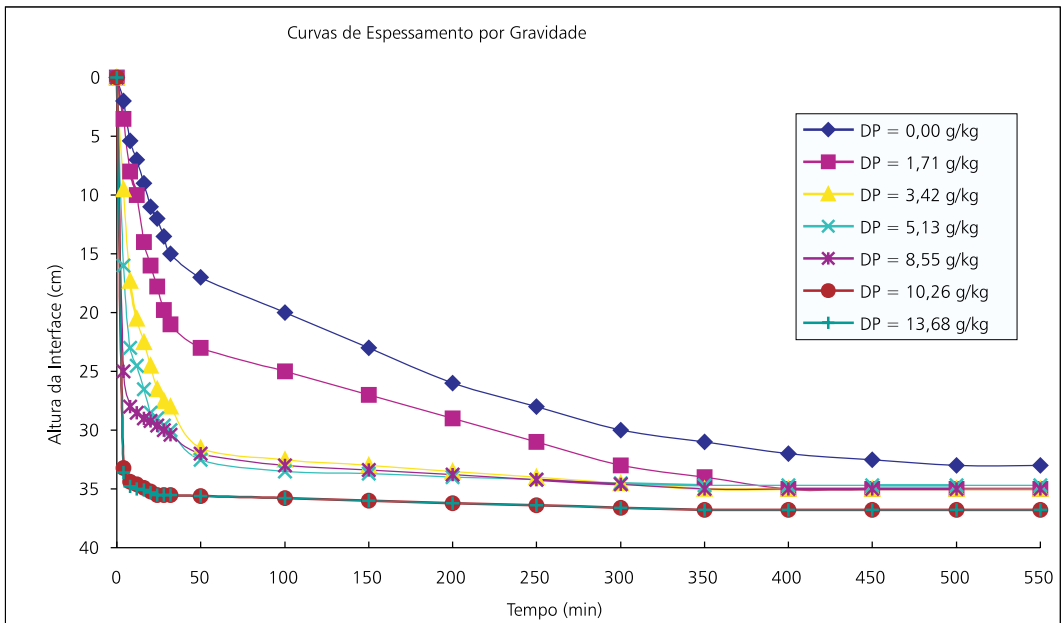


Figura 3.10 Curvas de espessamento por gravidade associadas a diversas dosagens do polímero N-2 utilizado no condicionamento do lodo da ETA Capim Fino.

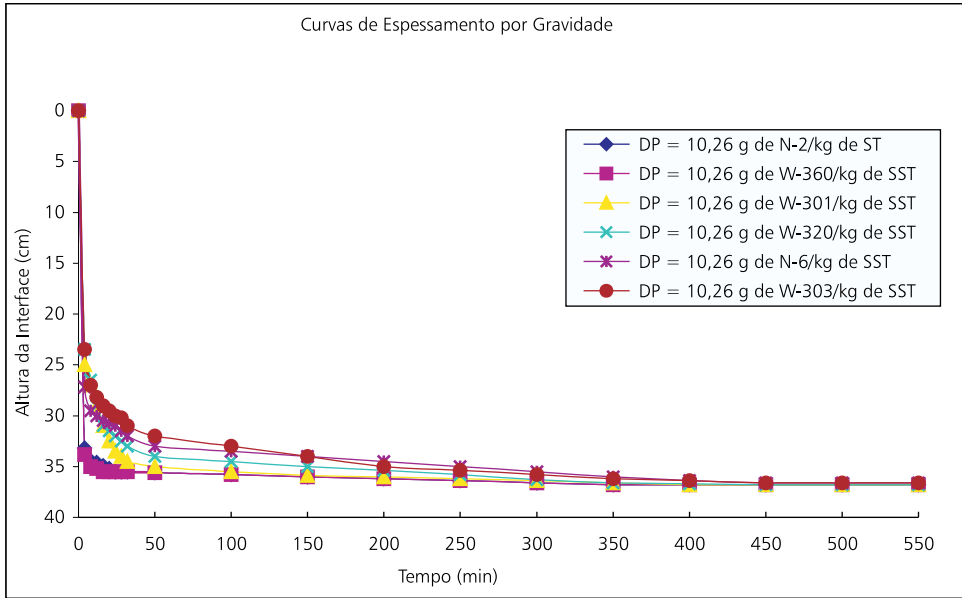


Figura 3.11 Curvas de espessamento por gravidade e por flotação utilizando o polímero CAT-2 nas condições otimizadas para condicionamento do lodo da ETA Capim Fino que utilizava sulfato de alumínio como coagulante.

Na Tabela 3.5 encontram-se os resultados referentes ao estudo de cada dosagem de polímero para o adensamento por gravidade e as dosagens selecionadas como ótimas para cada polímero apresentam-se hachuradas.

Comparando-se os resultados referentes a todos os polímeros investigados verifica-se que a dosagem de 10,26 g/kg de SST para o polímero N-2 forneceu os melhores resultados (teor de sólidos no lodo de 4,6%, subnadante com turbidez de 1,5 uT, parâmetro de espessamento $F_E = 8,5$ cm/min e o parâmetro de clarificação $F_C = 8,2$ cm/min).

Dosagens superiores, como, por exemplo, 13,68 g/kg de SST, passaram a prejudicar ligeiramente a eficiência do sistema, produzindo lodo espessado com teor de sólidos de 4,0%, turbidez no subnadante de 1,4 uT, $F_E = 8,5$ cm/min e $F_C = 8,2$ cm/min.

Observa-se, ainda, que o polímero W-360 na dosagem de 10,23 g/kg também teve bons resultados, bastante próximos daqueles apresentados pelo polímero N-2.

Tabela 3.5 Resultados dos ensaios de espessamento por gravidade do lodo da ETA Capim Fino.

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	F _E (cm/min) Parâmetro de Espessamento *	F _C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sub- nadante (uT)
01	N-2 (catiônico)	0,00	-	-	3,7	1,00
02	N-2 (catiônico)	1,71	0,8	0,9	3,5	1,20
03	N-2 (catiônico)	3,42	-	-	3,4	1,25
04	N-2 (catiônico)	5,13	-	-	3,5	1,30
05	N-2 (catiônico)	8,55	-	-	3,5	1,35
06	N-2 (catiônico)	10,26	8,5	8,2	4,6	1,50
07	N-2 (catiônico)	13,68	8,5	8,2	4,0	1,40
08	W-320 (aniônico)	1,71	0,6	0,8	3,6	1,30
09	W-320 (aniônico)	3,42	-	-	3,3	1,40
10	W-320 (aniônico)	5,13	-	-	3,6	1,50
11	W-320 (aniônico)	8,55	-	-	3,7	1,50
12	W-320 (aniônico)	10,26	4,9	5,6	4,3	1,55
13	W-320 (aniônico)	13,68	4,9	5,6	4,1	1,45
14	W-301 (aniônico)	1,71	0,4	0,5	3,5	1,30
15	W-301 (aniônico)	3,42	-	-	3,4	1,35
16	W-301 (aniônico)	5,13	-	-	3,6	1,40
17	W-301 (aniônico)	8,55	-	-	3,4	1,50
18	W-301 (aniônico)	10,26	5,9	6,6	4,5	1,55
19	W-301 (aniônico)	13,68	-	-	4,3	1,55
20	W-360 (catiônico)	1,71	1,0	1,3	3,5	1,30
21	W-360 (catiônico)	3,42	-	-	3,3	1,40
22	W-360 (catiônico)	5,13	-	-	3,4	1,35
23	W-360 (catiônico)	8,55	-	-	3,4	1,20
24	W-360 (catiônico)	10,26	8,4	8,1	4,2	1,60
25	W-360 (catiônico)	13,68	8,4	8,1	4,0	1,50
26	N-6 (não-iônico)	1,71	1,4	1,6	3,6	1,35
27	N-6 (não-iônico)	3,42	-	-	3,6	1,45
28	N-6 (não-iônico)	5,13	-	-	3,7	1,50
29	N-6 (não-iônico)	8,55	-	-	3,7	1,45
30	N-6 (não-iônico)	10,26	1,4	6,0	4,1	1,60
31	N-6 (não-iônico)	13,68	1,4	6,0	4,0	1,50

Tabela 3.5 Resultados dos ensaios de espessamento por gravidade do lodo da ETA Capim Fino. (Continuação.)

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	F_E (cm/min) Parâmetro de Espessamento	F_C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sub-nadante (uT)
32	W-303 (não-iônico)	1,71	1,2	1,3	3,5	1,30
33	W-303 (não-iônico)	3,42	-	-	3,5	1,40
34	W-303 (não-iônico)	5,13	-	-	3,6	1,50
35	W-303 (não-iônico)	8,55	-	-	3,6	1,45
36	W-303 (não-iônico)	10,26	3,7	5,6	4,0	1,60
37	W-303 (não-iônico)	13,68	3,7	5,6	4,0	1,70

* Os valores de F_E foram calculados adotando-se Cu igual a 3,5%.

Os polímeros W-320 e N-6, ambos aniônicos, também apresentaram bons resultados, embora inferiores aos obtidos com polímeros catiônicos.

Os polímeros não-iônicos, comparados aos demais, apresentaram os piores resultados. Portanto, com base nesses resultados, para os ensaios de espessamento por gravidade, a utilização do polímero catiônico N-2 na dosagem de 10,26 g/kg de SST pode ser considerada como a melhor opção para o caso em questão, ou seja, adensamento por gravidade do lodo proveniente de decantadores de ETA que utilizava sulfato de alumínio como coagulante primário.

Comparação dos Resultados dos Ensaios de Espessamento por Flotação e por Gravidade do Lodo da ETA Capim Fino

Para possibilitar melhor comparação entre as duas técnicas de espessamento de lodo, ou seja, a flotação com a sedimentação, foram plotadas conjuntamente, em um mesmo gráfico, a curva referente às melhores condições de ensaio de espessamento por sedimentação (polímero N-2 na dosagem de 10,23 g/kg de SST) e a curva relativa às condições ótimas de ensaio de espessamento por flotação (polímero N-2 na dosagem de 4,50 g/kg de SST). Essas curvas encontram-se apresentadas na Figura 3.12.

Com base nos resultados comparativos apresentados na Figura 3.12 e na Tabela 3.6, verifica-se que a técnica de espessamento por flotação, além de requerer dosagem 56% menor que aquela exigida para o espessamento por gravidade, apresentou eficiência de espessamento do lodo significativamente maior, com F_E 7,1 vezes maior, F_C 2,3 vezes maior e teor de sólidos no lodo espessado 1,5 vez maior.

Tabela 3.6 Resultados das determinações físico-químicas dos ensaios de espessamento por flotação e por gravidade.

Determinações	Espessamento por Gravidade 10,26 g de N-2/Kg de SST	Espessamento por Flotação 4,50 g de N-2/Kg de SST
Turbidez (uT)	1,5	1,0
Teor de sólidos no lodo (%)	4,6	7,1
Valor de A/S	-	0,024
Parâmetro de espessamento F_E (cm/min) *	8,5	60,6
Parâmetro de clarificação F_C (cm/min)	8,2	18,8

* Os valores de F_E foram calculados adotando-se C_u igual a 3,5%.

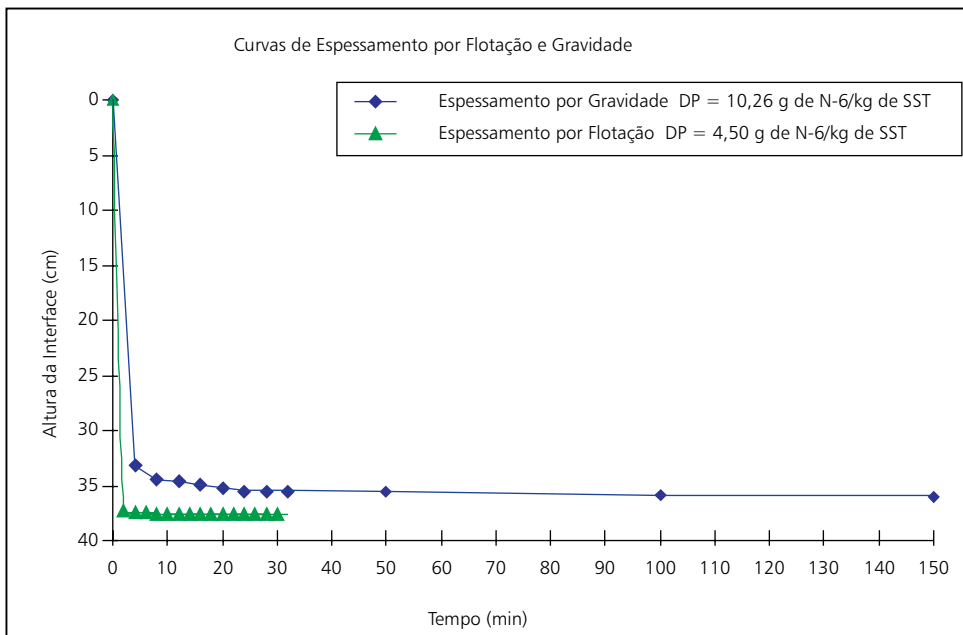


Figura 3.12 Curvas de espessamento por gravidade e por flotação utilizando o polímero CAT-2 nas condições otimizadas para condicionamento do lodo da ETA Capim Fino que utilizava sulfato de alumínio.

Conclusões Referentes ao Estudo de Caso 1

- Os métodos de laboratório utilizados para análise do espessamento por flotação e por gravidade são relativamente simples de ser aplicados e constituíram ferramenta útil para obtenção de estimativas dos valores dos principais parâmetros que influenciam o adensamento por flotação e por gravidade, ressalvadas as limitações inerentes a ensaios de laboratório com reatores alimentados por batelada.
- Para o espessamento do lodo da ETA Capim Fino, que utilizava sulfato de alumínio como coagulante primário, tanto nos ensaios de flotação quanto de sedimentação, o emprego do polímero catiônico N-2 proporcionou as melhores eficiências de espessamento. Para a flotação, com A/S em torno de 0,024, foi requerida dosagem de 4,50 g de polímero N-2/kg de SST, atingindo-se teor de SST no lodo de 7,1%, com F_E de 60,6 cm/min e F_C de 18,8 cm/min. Por sua vez, para o adensamento por gravidade foi requerida dosagem de 10,26 g de N-2/kg de SST, produzindo-se lodo adensado com até 4,6%, com F_E de 8,5 cm/min e F_C de 8,2 cm/min.
- Para os lodos estudados nas condições ótimas de condicionamento químico, o espessamento por flotação, com A/S igual a 0,024 g de ar/g de SST, comparado ao espessamento por gravidade, apresentou melhor desempenho, sendo capaz de operar a taxas teóricas de espessamento e clarificação mais elevadas e fornecer lodo espessado com maiores teores de sólidos.

Estudo de Caso 2: Lodo da ETA Paiol de Araraquara, SP

A ETA Paiol, da cidade de Araraquara, SP, é do tipo convencional com ciclo completo. Nessa ETA é utilizado cloreto férrico como coagulante primário, fato esse que resulta na produção de lodo com características de espessamento bastante diversas daquelas referentes ao lodo da ETA Capim Fino, objeto do primeiro caso estudado.

A coleta de amostras de lodo para o estudo foi realizada no intervalo de julho a setembro de 1997. Todas as coletas foram realizadas em ambos os decantadores de alta taxa, com módulos tubulares e fundo com formato tronco piramidal. Os decantadores da ETA possuem canalização para descarte hidráulico do lodo acumulado cujo controle é realizado por válvulas de gaveta. Dessa forma, a coleta de amostra foi realizada após a abertura dessas válvulas, em intervalos convenientes, obtendo-se amostra representativa do despejo final gerado em cada decantador. Para a realização dos ensaios de espessamento por flotação e por gravidade, procurou-se fixar a concentração de sólidos suspensos totais no lodo de estudo na faixa de 4.000 mg/l a 5.000 mg/l.

Resultados Referentes aos Ensaio de Espessamento de Lodo por Flotação

As curvas obtidas nos ensaios para seleção do tipo e dosagem de polímero adequados para o espessamento por flotação são mostrados nas Figuras 3.13 e 3.14, enquanto na Tabela 3.7 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método para ensaio de espessamento por flotação, com base nas curvas de espessamento obtidas. No que se refere ao estudo da melhor dosagem de cada polímero estudado, deve-se salientar que, no presente texto, são apresentadas apenas as curvas obtidas nos ensaios com o polímero W-303 (não-iônico), na Figura 3.13. Os conjuntos de curvas referentes aos outros polímeros investigados, similares ao conjunto mostrado na Figura 3.13, foram omitidos. Optou-se por apresentar apenas as curvas referentes às dosagens ótimas de cada polímero (Figura 3.14). No entanto, na Tabela 3.7 encontram-se apresentados os resultados finais referentes à totalidade dos ensaios realizados.

Na Tabela 3.7, as dosagens selecionadas como ótimas para cada polímero apresentam-se hachuradas. Analisando-se os resultados mostrados nessa tabela, verifica-se que a dosagem de 6,86 g/Kg de SST para W-301 (aniônico) forneceu os melhores resultados (teor de sólidos no lodo de 3,0%, turbidez do subnadante de 1,4 uT, F_E igual a 8,4 cm/min e F_C igual a 17,0 cm/min), enquanto para os demais polímeros a dosagem de 10,28 g/kg de SST foi a mais adequada.

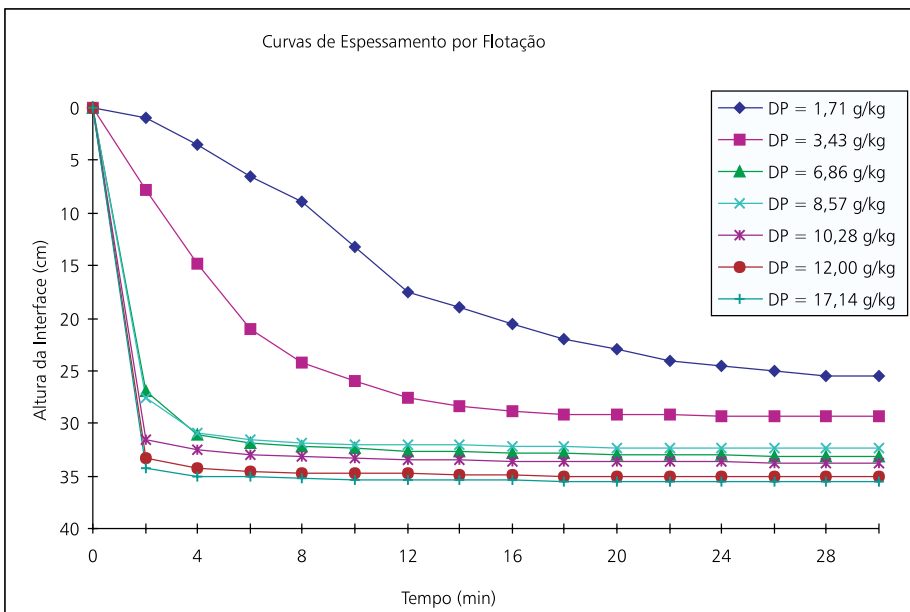


Figura 3.13 Curvas de espessamento por flotação associadas a diversas dosagens do polímero W-320 aplicado no condicionamento do lodo da ETA Paiol, que utiliza cloreto férrico como coagulante.

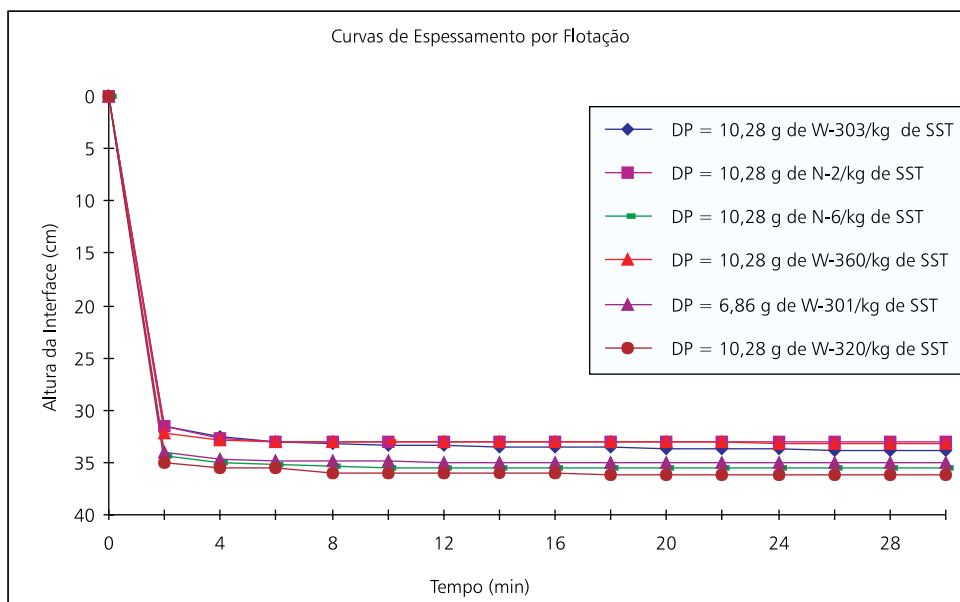


Figura 3.14 Curvas de espessamento por flotação referentes às dosagens ótimas selecionadas para cada polímero estudado no condicionamento do lodo da ETA Paiol.

Tabela 3.7 Resultados dos ensaios de espessamento por flotação do lodo da ETA Paiol.

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	Valor de A/S	F_E (cm/min) Parâmetro de Espessamento *	F_C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Subnadante (uT)
01	W-320 (aniônico)	0,00	0,021	-	-	1,4	18,0
02	W-320 (aniônico)	3,43	0,021	1,9	7,8	2,6	0,9
03	W-320 (aniônico)	6,86	0,021	5,1	16,8	2,9	1,0
04	W-320 (aniônico)	10,28	0,021	7,4	17,5	3,1	1,2
05	W-320 (aniônico)	12,00	0,021	8,1	17,8	3,0	1,2

Tabela 3.7 Resultados dos ensaios de espessamento por flotação do lodo da ETA Paiol. (Continuação.)

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	Valor de A/S	F _E (cm/min) Parâmetro de Espessamento	F _C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Subnadante (uT)
07	W-301 (aniônico)	3,43	0,021	4,5	15,8	3,0	1,0
08	W-301 (aniônico)	6,86	0,021	8,4	17,0	3,01	1,4
09	W-301 (aniônico)	10,28	0,021	15,2	17,7	3,0	1,4
10	W-301 (aniônico)	12,00	0,021	12,4	17,5	3,2	1,5
11	W-301 (aniônico)	17,14	0,021	12,4	17,5	3,0	1,5
12	W-303 (não-iônico)	1,71	0,021	-	0,5	1,0	18,0
13	W-303 (não-iônico)	3,43	0,021	1,0	3,9	1,6	0,6
14	W-303 (não-iônico)	6,86	0,021	2,9	13,5	2,3	0,6
15	W-303 (não-iônico)	8,57	0,021	3,3	13,8	2,3	0,5
16	W-303 (não-iônico)	10,28	0,021	4,0	15,8	2,6	1,0
17	W-303 (não-iônico)	12,00	0,021	5,4	16,7	2,8	0,7
18	W-303 (não-iônico)	17,14	0,021	7,9	17,1	2,8	1,2
19	N-2 (catiônico)	3,43	0,021	0,6	2,0	1,6	0,3
20	N-2 (catiônico)	6,86	0,021	3,6	14,3	2,6	0,5
21	N-2 (catiônico)	10,28	0,021	6,4	15,8	2,4	1,2

Tabela 3.7 Resultados dos ensaios de espessamento por flotação do lodo da ETA Paiol. (Continuação.)

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	Valor de A/S	F_E (cm/min) Parâmetro de Espessamento	F_C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Subnadante (uT)
22	N-2 (catiônico)	12,00	0,021	11,2	17,1	2,9	1,4
23	N-2 (catiônico)	17,14	0,021	5,4	18,4	3,0	2,5
24	W-360 (catiônico)	3,43	0,021	1,7	9,5	2,0	0,6
25	W-360 (catiônico)	6,86	0,021	2,9	14,5	1,9	0,6
26	W-360 (catiônico)	10,28	0,021	4,9	16,1	2,3	0,8
27	W-360 (catiônico)	12,00	0,021	6,1	16,7	1,9	0,6
28	W-360 (catiônico)	17,14	0,021	7,8	16,8	1,8	0,6
29	N-6 (não-iônico)	3,43	0,021	1,3	5,8	2,0	0,8
30	N-6 (não-iônico)	6,86	0,021	1,5	6,3	2,2	1,2
31	N-6 (não-iônico)	10,28	0,021	8,0	17,2	3,4	1,4
32	N-6 (não-iônico)	12,00	0,021	5,2	16,5	3,0	1,7
33	N-6 (não-iônico)	17,14	0,021	11,7	17,3	3,2	2,4

* Os valores de F_E foram calculados adotando-se C_u igual a 1,3%.

Ainda com base nos resultados mostrados na Tabela 3.7, comparando-se todos os polímeros testados, verifica-se que, tanto o polímero W-301 (aniônico) quanto os polímeros W-320 (aniônico) e N-6 (não-iônico), apresentaram os melhores resultados de espessamento, produzindo os maiores valores de teor de sólidos no lodo espessado (3,0% a 3,4 %), maiores valores de F_C (17,2 a 17,7 cm/min) e maiores valores de F_E (7,4 a 8,4 cm/min) nos ensaios de espessamento de lodo por flotação.

Resultados dos Ensaios de Espessamento por Gravidade (Lodo da ETA Paiol)

Visando à comparação com o espessamento por flotação, foram também realizados ensaios de adensamento por gravidade com os mesmos tipos de polímeros variando a dosagem de polímero aplicada.

Na Figura 3.15 são apresentadas, a título de exemplo, apenas as curvas de espessamento por gravidade associadas a diversas dosagens do polímero N-2. Dessa mesma forma, foram realizados ensaios de adensamento por gravidade para todos os demais polímeros a fim de possibilitar a obtenção da melhor dosagem de cada polímero, e os gráficos similares aos da Figura 3.16 não se encontram apresentados no presente texto, mas apenas os parâmetros de espessamento obtidos de tais gráficos (veja a Tabela 3.8). A partir de cada conjunto de curvas de adensamento por gravidade referente a cada polímero, foi selecionada a curva associada à melhor dosagem. Essas curvas representativas das melhores dosagens são apresentadas na Figura 3.16.

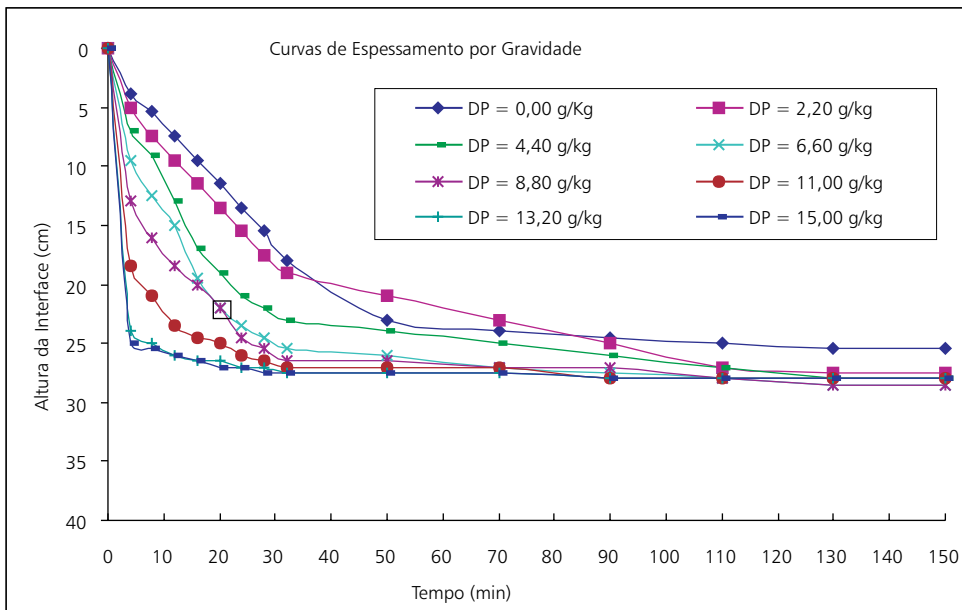


Figura 3.15 Curvas de espessamento por gravidade associadas a diversas dosagens do polímero N-2 utilizado como condicionador do lodo da ETA Paiol.

Na Tabela 3.8, encontram-se os resultados referentes ao estudo de cada dosagem de polímero para o adensamento por gravidade e as dosagens selecionadas como ótimas para cada polímero apresentam-se hachuradas.

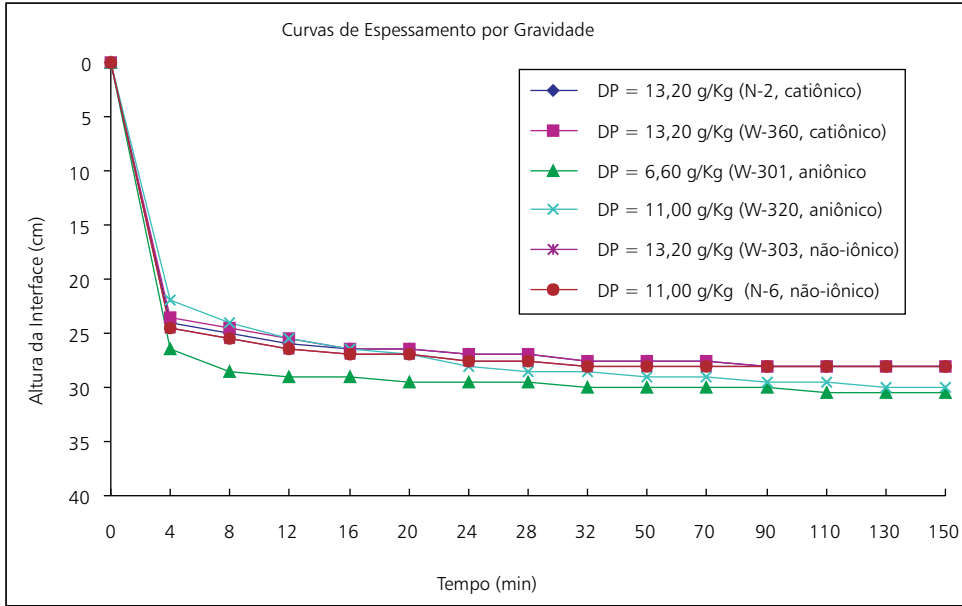


Figura 3.16 Curvas de espessamento por gravidade associadas às dosagens ótimas selecionadas para cada polímero estudado no condicionamento do lodo da ETA Paiol que utiliza cloreto férrico como coagulante.

Tabela 3.8 Resultados dos ensaios de espessamento por gravidade do lodo da ETA Paiol.

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	F _E (cm/min) Parâmetro de Espessamento *	F _C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sub-nadante (uT)
01	N-2 (catiônico)	0,00	0,4	0,4	1,0	0,8
02	N-2 (catiônico)	2,20	1,9	1,0	1,2	1,1
03	N-2 (catiônico)	4,40	1,3	1,8	1,2	1,0
04	N-2 (catiônico)	6,60	1,5	2,1	1,3	1,0
05	N-2 (catiônico)	8,80	1,6	3,3	1,2	0,8
06	N-2 (catiônico)	11,00	1,9	4,6	1,2	1,0
07	N-2 (catiônico)	13,20	2,4	6,0	1,3	1,5
08	N-2 (catiônico)	15,00	2,4	6,0	1,2	1,4
09	W-360 (catiônico)	2,20	0,7	0,9	1,2	1,1
10	W-360 (catiônico)	4,40	1,0	1,6	1,3	1,1

Tabela 3.8 Resultados dos ensaios de espessamento por gravidade do lodo da ETA Paiol. (Continuação.)

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	F _E (cm/min) Parâmetro de Espessamento	F _C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sub- nadante (uT)
11	W-360 (catiônico)	6,60	1,4	2,3	1,3	1,0
12	W-360 (catiônico)	8,80	1,6	3,1	1,3	1,5
13	W-360 (catiônico)	11,00	2,0	4,5	1,2	1,3
14	W-360 (catiônico)	13,20	2,4	5,8	1,2	1,5
15	W-360 (catiônico)	15,00	2,4	5,8	1,1	1,3
16	W-301 (aniônico)	2,20	2,4	4,5	1,2	1,0
17	W-301 (aniônico)	4,40	2,6	5,4	1,3	1,0
18	W-301 (aniônico)	6,60	3,2	6,8	1,6	1,0
19	W-301 (aniônico)	8,80	3,2	6,8	1,4	1,0
20	W-301 (aniônico)	11,00	3,8	6,8	1,3	1,2
21	W-301 (aniônico)	13,20	3,8	6,8	1,3	1,5
22	W-301 (aniônico)	15,00	2,9	6,4	1,3	1,4
23	W-320 (aniônico)	2,20	1,7	2,8	1,2	1,0
24	W-320 (aniônico)	4,40	2,0	3,9	1,3	1,1
25	W-320 (aniônico)	6,60	2,4	4,8	1,4	1,0
26	W-320 (aniônico)	8,80	2,6	5,4	1,3	1,3
27	W-320 (aniônico)	11,00	2,7	5,5	1,3	1,3
28	W-320 (aniônico)	13,20	2,7	5,5	1,4	1,4
29	W-320 (aniônico)	15,00	2,7	5,5	1,4	1,5
30	N-6 (não-iônico)	2,20	1,2	2,0	1,2	1,3
31	N-6 (não-iônico)	4,40		2,9	1,3	1,2
32	N-6 (não-iônico)	6,60	1,7	3,1	1,4	1,1
33	N-6 (não-iônico)	8,80	2,4	4,8	1,3	1,3
34	N-6 (não-iônico)	11,00	2,6	6,0	1,4	1,4
35	N-6 (não-iônico)	13,20	2,6	6,0	1,4	1,4
36	N-6 (não-iônico)	15,00	2,6	6,0	1,4	1,4
37	W-303 (não-iônico)	2,20	1,3	1,4	1,1	1,4
38	W-303 (não-iônico)	4,40	1,4	2,0	1,3	1,3
39	W-303 (não-iônico)	6,60	1,4	2,1	1,2	1,1

Tabela 3.8 Resultados dos ensaios de espessamento por gravidade do lodo da ETA Paiol. (Continuação.)

Ensaio	Polímero	Dosagem g/kg	F_E (cm/min) Parâmetro de Espessamento	F_C (cm/min) Parâmetro de Clarificação	Teor de Sólidos no Lodo (%)	Turbidez do Sub- nadante (uT)
40	W-303 (não-iônico)	8,80	1,7	3,4	1,3	1,2
41	W-303 (não-iônico)	11,00	2,4	4,8	1,2	1,3
42	W-303 (não-iônico)	13,20	2,9	6,1	1,3	1,3
43	W-303 (não-iônico)	15,00	3,0	6,3	1,3	1,3

* Os valores de F_E foram calculados adotando-se C_u igual a 1,3%.

Comparando-se os resultados referentes a todos os polímeros investigados, verifica-se que a dosagem de 6,60 g/Kg de SST para o polímero W-301 forneceu os melhores resultados, produzindo lodo com teor de sólidos de 1,6%, subnadante com turbidez de 1,0 uT, parâmetro de espessamento F_E igual a 3,2 cm/min e o parâmetro de clarificação F_C igual a 6,8 cm/min, enquanto para os demais polímeros estudados as dosagens de 11,00 a 13,20 g/kg de SST forneceram os melhores resultados produzindo lodo com teor de sólidos entre 1,2 a 1,4, turbidez entre 1,3 a 1,5 uT, F_E entre 2,4 a 2,9 cm/min e F_C entre 5,5 a 6,1 cm/min.

Comparação dos Melhores Resultados dos Ensaios de Espessamento por Flotação e por Gravidade do Lodo da ETA Paiol

Para possibilitar uma melhor comparação entre as duas técnicas de espessamento de lodo, ou seja, a flotação com a sedimentação aplicada ao lodo da ETA Paiol, foram plotadas conjuntamente, em um mesmo gráfico, a curva referente às melhores condições de ensaio de espessamento por sedimentação (polímero W-301 na dosagem de 6,60 g/kg) e a curva relativa às condições ótimas de ensaio de espessamento por flotação (polímero W-301 na dosagem de 6,86 g/kg). Essas curvas estão apresentadas na Figura 3.17. Para facilitar a comparação entre as duas técnicas, na Tabela 3.9 são apresentados os valores de turbidez resultante no líquido clarificado, teor de SST no lodo adensado, valores de F_E e F_C e razão ar/sólidos (A/S) utilizada na flotação, valores estes referentes às melhores condições de ensaio de cada técnica. Deve-se salientar que os resultados referentes à flotação apresentados nessa tabela foram obtidos após a otimização da razão ar/sólidos (A/S) cujo valor ótimo foi igual a 0,034.

Com base nos resultados comparativos apresentados na Figura 3.17 e Tabela 3.9, verifica-se que a técnica de espessamento por flotação com A/S igual a 0,034 apresentou maior eficiência de espessamento do lodo, com F_E cerca de três vezes maior, F_C cerca de 2,5 vezes maior e teor de sólidos no lodo espessado quase duas vezes maior.

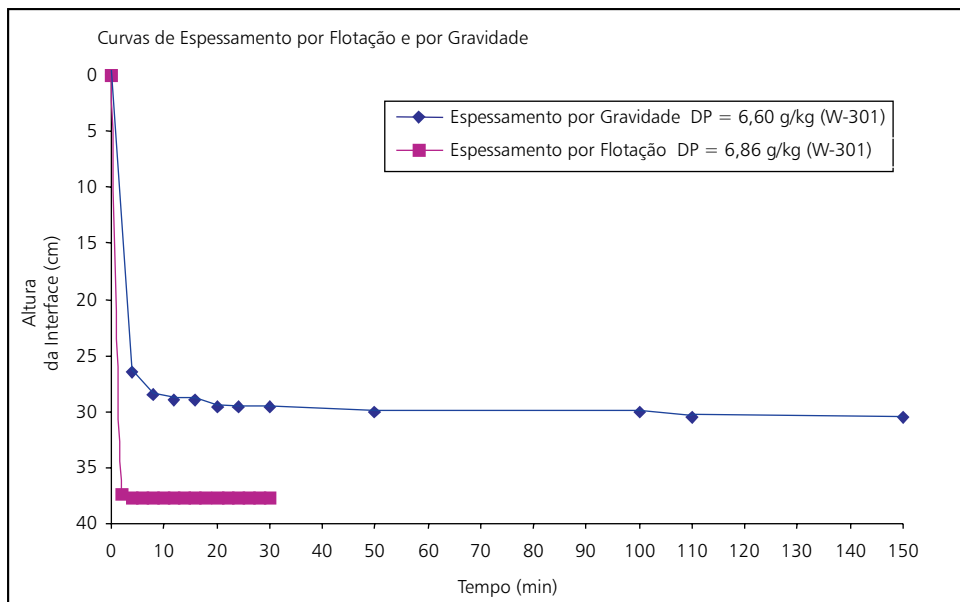


Figura 3.17 Curvas de espessamento por gravidade e por flotação utilizando o polímero W-301 (aniônico) nas condições otimizadas para condicionamento do lodo da ETA Paiol, que utiliza cloreto férrico como coagulante.

Tabela 3.9 Resultados das determinações físico-químicas dos ensaios de espessamento por flotação e por gravidade do lodo da ETA Paiol.

Determinações	Espessamento por Gravidade 6,60 g de W-301/Kg de SST (aniônico)	Espessamento por Flotação 6,86 g de W-301/Kg de SST (aniônico)
Turbidez do líquido clarificado (uT)	1,0	1,6
Teor de sólidos no lodo espessado (%)	1,6	3,0
Valor de A/S	–	0,034
Parâmetro de espessamento F_E (cm/min) *	3,2	9,2
Parâmetro de clarificação F_C (cm/min)	6,8	18,3

* Os valores de F_E foram calculados adotando-se C_u igual a 1,3%.

Quanto à turbidez do líquido clarificado, ambas as técnicas apresentaram excelentes resultados, com valores entre 1,0 e 2,0 uT.

Conclusões Referentes ao Estudo de Caso 2

- Para o lodo de estudo, ou seja, lodo gerado em ETA que utiliza cloreto férrico como coagulante (ETA Paiol), o polímero aniônico W-301, na dosagem de 6,86 g/kg, apresentou-se como o mais adequado tanto para o espessamento por flotação quanto por gravidade.
- Para lodo com teor de SST inicial em torno de 0,6%, a flotação em colunas (batelada), nas condições ótimas de ensaio e com A/S na faixa de 0,020 a 0,034, foi capaz de produzir lodo espessado com teor de sólidos acima de 3%, com valores de F_E em torno de 9,0 cm/min e de F_C em torno de 18,0 cm/min. Por sua vez, o espessamento por gravidade, também nas condições ótimas de ensaio, produziu lodo espessado com teor de SST de no máximo 1,6% (quase 50% menor que na flotação), com valores de F_E em torno de 3,0 cm/min (1/3 do valor obtido na flotação) e de F_C em torno de 7,0 cm/min (duas vezes e meia menor que na flotação).
- Para os lodos estudados nas condições ótimas de condicionamento químico, o espessamento por flotação (com A/S = 0,032 a 0,034 g de ar/g de SST), comparado ao espessamento por gravidade, apresentou melhor desempenho, sendo capaz de operar a taxas teóricas de espessamento e clarificação mais elevadas e fornecer lodo espessado com maiores teores de sólidos.

3.4 Referências Bibliográficas

1. BRATBY, J.R.; AMBROSE, W.A. (1995). Design and Control of Flotation Thickeners. *Water Science & Technology*, v.31, n.3-4, p.247-261.
2. CULP/WESNER/CULP (1986). *Handbook of Public Water Systems*. New York, Van Nostrand Reinhold Co.
3. DOE, P.W. (1990). Water Treatment Plant Waste Management. In: PONTIUS, F.W., ed. *Water Quality and Treatment – A Handbook of Community Water Supplies*. 4. ed. American Water Works Association, New York, McGraw-Hill.
4. FERREIRA FILHO, S.S. (1997). Pré-condicionamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água Visando a seu Adensamento por Gravidade. In: 19º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Foz de Iguaçu, PR. *Anais*. p.1181-1192.
5. GRANDIN, S.R. (1992). *Desidratação de Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
6. MARHOFF, J.; VAN VUUREN, L.R.J. (1995). Design Parameters for Dissolved Air Flotation in South America. *Water Science & Technology*, v.31, n.3-4, p.203-212.

7. KAWAMURA, S. (1991). *Integrated Design of Water Treatment Facilities*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
8. KING, P.H. et al. (1990). Optimizing Sludge Characteristics and Minimizing Generation. In: CORNWELL, D.A.; KOPPERS, H.M.N., eds. *SLIB, SCHLAMM, SLUDGE*. Denver, USA, American Water Works Association Research Foundation & Kiwa Ltda., p.47-106.
9. METCALF & EDDY (1991). *Wastewater Engineering – Treatment, Disposal and Reuse*. 3. ed. New York, McGraw-Hill, Inc.
10. OFFRINGA, G. (1995). Dissolved Air Flotation in Southern Africa. *Water Science & Technology*, v.31, p.159-172.
11. REALI, M.A.P. et al. (1996). Ensaios de Espessamento por Flotação e por Sedimentação do Lodo das ETAs de Piracicaba, SP. *Relatório Técnico da FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
12. REYNOLDS, T.D. (1982). *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. Boston, Massachusetts, PWS Publishers.
13. SEREC – SERVIÇOS DE ENGENHARIA CONSULTIVA LTDA. (1987). *Estudo de Concepção para a Recuperação das Águas de Lavagens, Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos das ETAs na RMSP*. Relatório Final, São Paulo, SP.
14. TALMADGE, W.P.; FITCH, E.B. (1955). Determining Thickener Unit Areas. *Ind. and Eng. Chem.*, v.47, n.1, p.38.
15. TEIXEIRA, L.C.G.M. (1999). *Adensamento por Gravidade de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Água*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Capítulo 4

Desidratação de Lodo por Centrifugação

Marco Antonio Penalva Reali, Leila Jorge Patrizzi, João Sérgio Cordeiro

4.1 Considerações Iniciais

A centrifugação é uma operação de separação de fases que ocorre pela ação do campo de forças centrífugo que surge quando se rotaciona um recipiente cilíndrico (tambor) contendo as fases que se deseja separar, como, por exemplo, o lodo originado em estações de tratamento de água (ETAs) e em estações de tratamento de esgoto (ETEs). No caso do lodo, quando o cilindro é submetido a altas rotações, as partículas mais densas (sólidos) são rapidamente impulsionadas na direção da parede interna do tambor, onde são acumuladas e, dessa forma, separadas da fase líquida.

Desde há muito tempo, os equipamentos de centrifugação vêm sendo utilizados para separação de fases em diversos tipos de indústrias, como a química, a de alimentos, a de bebidas, a farmacêutica, além de várias aplicações em procedimentos de laboratório.

Por sua vez, o emprego de centrífuga com vistas à remoção de água de lodos é menos generalizado, tendo seu uso se intensificado em época mais recente, quando os fabricantes passaram a projetar e desenvolver novos equipamentos com o objetivo de atender ao mercado de lodos de ETEs, promovendo avanços significativos nesse tipo de aplicação. Tais avanços resultaram em equipamentos que consumiam menos energia, além de apresentarem menos problemas de manutenção. A partir de então, verificou-se aumento no número de estações de tratamento de esgoto que passaram a utilizar centrífugas para desidratação de lodos gerados nos processos biológicos.

No que concerne especificamente às aplicações da centrifugação para desidratação de lodos gerados em estações de tratamento de água até o final da década de 1960, havia pouca aplicação desse método. Nos EUA, levantamento realizado em 1969⁽¹⁾ registrava a existência de apenas duas ETAs utilizando centrífugas para tratamento de

lodo. Alguns trabalhos publicados na época^(1,2,3) citavam experiências de campo com centrifugação de lodos de ETAs cujos resultados não eram conclusivos e indicavam que, geralmente, o teor de sólidos na torta centrifugada situava-se na faixa de 6% a 18%, valores ainda considerados baixos, levando-se em conta os aspectos econômicos do transporte e disposição final da torta.

Estudos subseqüentes^(4,5,6,7,8) mostraram que, nas décadas de 1970 e 1980, foram verificados avanços na técnica de centrifugação de lodos de ETAs, principalmente no que diz respeito à aplicação de polímeros para melhoria da eficiência de desidratação. Tais trabalhos demonstravam a existência de novos casos em que se conseguia teor de sólidos na torta de 16% a 28%, chegando a até 35% nas situações em que a água bruta afluente à ETA apresentava-se com turbidez elevada.⁽⁸⁾ A esse respeito, vale salientar que a experiência tem mostrado que, de maneira geral, quanto maior a turbidez da água bruta, mais facilmente pode ser removida a água presente no lodo gerado em uma determinada ETA.

Em outro caso,⁽¹²⁾ referente a uma ETA com capacidade de 1 m³/s da cidade de Durham, N.C., que utilizava sulfato de alumínio como coagulante, foram realizados ensaios com uma pequena centrífuga decantadora (unidade móvel) para desidratação do lodo gerado no processo de tratamento. A centrífuga era alimentada com lodo espessado contendo teor de sólidos em torno de 2%, o qual recebia dosagem de 1,4 a 1,8 Kg de polímero/tonelada de sólidos totais secos. Nessas condições obteve-se torta centrifugada com teor de sólidos totais em torno de 25%.

Resultados bem melhores têm sido obtidos com a centrifugação de lodos gerados em sistemas de abrandamento de águas para abastecimento que utilizam a precipitação química com a aplicação de cal. Na maioria desses sistemas são empregadas unidades de espessamento de lodo antecedendo à centrifugação. Após o espessamento, o lodo, com concentração de sólidos de 10% a 25%, é encaminhado para as centrífugas, as quais são capazes de produzir torta usualmente com teor de sólidos na faixa de 55% a 60%.⁽¹⁴⁾

Nas duas últimas décadas, para a maioria dos casos de aplicação de centrifugação de lodos de ETAs, foram utilizadas centrífugas tipo decantadoras de eixo horizontal com removedor de lodo contínuo tipo helicoidal (veja a Figura 4.3). Em alguns casos mais antigos, eram empregadas centrífugas com tambor não perfurado com eixo vertical e alimentação semicontínua para permitir remoção do lodo acumulado. Mais adiante, na Seção 4.3, serão apresentadas descrições mais detalhadas dos tipos de centrífugas usualmente utilizadas para desidratação de lodos.

Na Figura 4.1, é mostrado um esquema ilustrativo de um sistema de desidratação de lodo de ETA utilizando centrífuga. Esse esquema refere-se a um exemplo de sistema de remoção de água do lodo gerado em uma ETA convencional, envolvendo as seguintes etapas:

- Clarificação por sedimentação e aproveitamento da água de lavagem dos filtros da ETA. Nesse exemplo, os sedimentos dos tanques de clarificação por sedimentação são reunidos aos lodos descartados dos decantadores da ETA.
- Espessamento dos lodos provenientes das descargas dos decantadores e dos tanques de clarificação da água de lavagem dos filtros.
- Após o espessamento do lodo (por flotação ou gravidade), este é encaminhado para a(s) centrífuga(s), na(s) qual(is) ocorre a desidratação final. A torta produzida após a centrifugação é encaminhada para disposição final, e o líquido drenado é retornado aos tanques de clarificação da água de lavagem de filtros ou descartado na rede de esgoto.

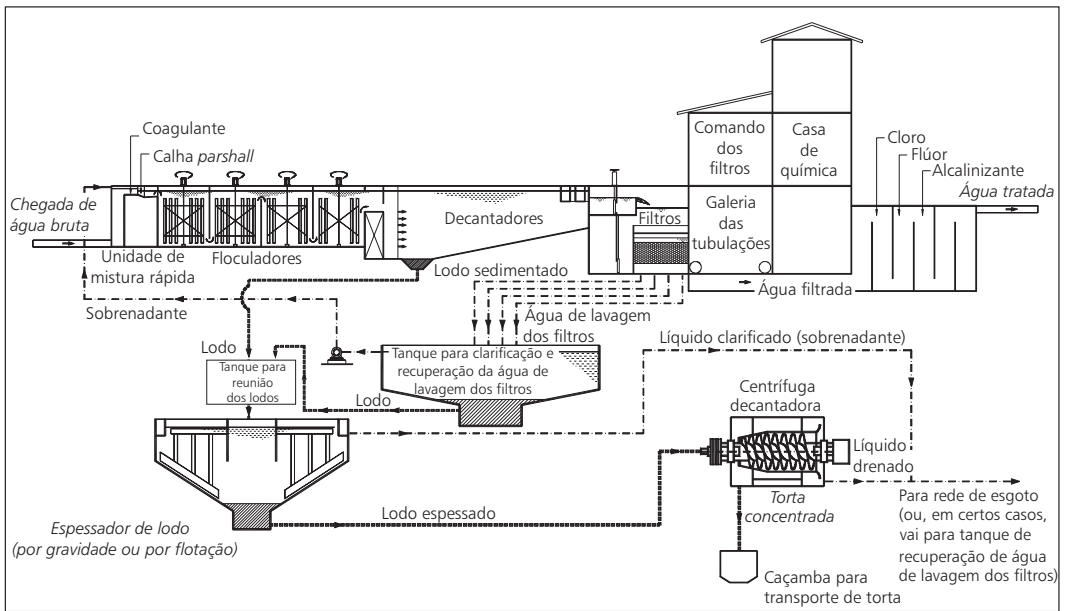


Figura 4.1 Esquema ilustrativo de um sistema de tratamento de água que utiliza centrífuga para desidratação de lodo.

4.2 Princípios Básicos da Centrifugação

A centrifugação é uma operação de separação de fases cujos princípios básicos são parecidos com a sedimentação de partículas submetidas à ação da gravidade. Porém, a intensidade das forças atuantes nos equipamentos de centrifugação é usualmente centenas ou milhares de vezes maior que a força gravitacional.

Considere-se, por exemplo, a situação ilustrada na Figura 4.2, em que uma pessoa gira uma pequena esfera com massa m amarrada na extremidade de uma linha de náilon de massa desprezível e comprimento r (no caso igual ao raio de giração). A esfera descreve uma trajetória circular com raio r . Se o conjunto girar com uma frequência f (rotações por segundo), a pessoa sentirá na linha uma força centrífuga F_C atuante sobre a bola, que é igual a $[m.(2.\pi.f)^2.r]$. A mesma esfera colocada em repouso, pendurada pela linha (situação 1 na Figura 4.2), estaria sujeita à força da gravidade, igual a $[m.g]$, sendo g a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$). Um parâmetro amplamente utilizado para medir a intensidade da força centrífuga é a relação entre esta e a força gravitacional, denominada aqui de G^* . Em outras palavras, o valor de G^* indica quantas vezes a intensidade do campo centrífugo presente em um equipamento de centrifugação é maior que a intensidade do campo gravitacional. O valor desse parâmetro, para o caso ilustrado e para sistemas centrífugos em geral, é igual a $4,024 f^2.r$ (com f em rps e r em m).

Situação 1: esfera em repouso
(ação da força gravitacional sobre a esfera)

Situação 2: esfera sendo girada com frequência
de 2 rotações por segundo (surgimento de um
campo centrífugo)

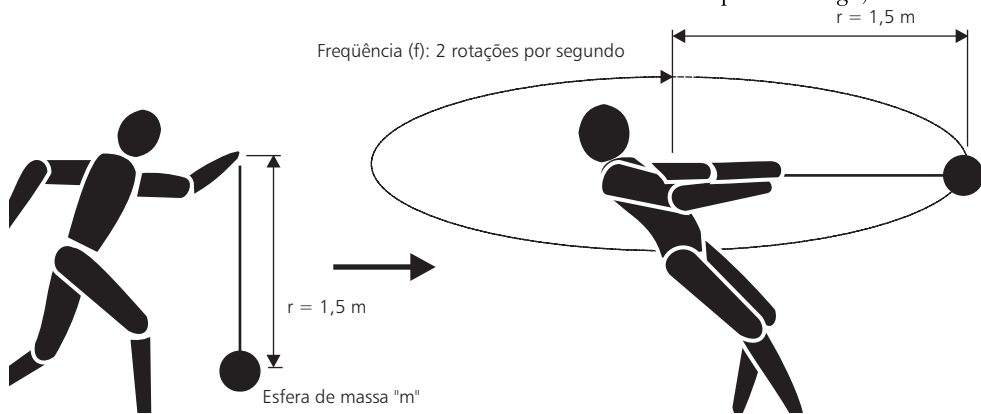


Figura 4.2 Ilustração mostrando a ação da força de gravidade e da força centrífuga em uma esfera de massa m .

Ainda como ilustração, para o caso citado, se a frequência de giro imprimida pela pessoa ao sistema fosse igual a 2 rps, e se o comprimento da linha (raio de giração) fosse igual a 1,5 m, seria obtida G^* igual a 24. Ou seja, a intensidade do campo centrífugo atuante seria igual a 24 vezes a intensidade do campo gravitacional. Dessa forma, ao girar a esfera, a pessoa teria a sensação de que a esfera estaria 24 vezes mais pesada

que na situação de repouso para manter a mão na posição que resulta em raio de giro igual a 1,5 m.

No caso das centrífugas existentes no mercado, as rotações são bem mais elevadas, proporcionando valores de G^* de até 6.000. No caso específico da centrifugação de lodos, as partículas sólidas (flocos) em suspensão aquosa, ao entrarem nas cubas rotativas das centrífugas, são imediatamente submetidas a uma separação de fases extremamente acelerada. Dependendo do tamanho desses flocos, os mesmos podem atingir rapidamente a parede das cubas. Ao atingirem a parede, aderem-se à mesma, separando-se da solução e promovendo a formação de uma torta bastante espessa.

A velocidade com que as partículas atingem as paredes das centrífugas é influenciada de maneira marcante pelo tamanho das partículas. Quanto maiores essas partículas, mais rapidamente serão capturadas nas paredes da centrífuga e removidas da suspensão. Caso haja partículas muito finas no lodo, a eficiência de remoção dessas partículas durante a passagem pela centrífuga pode tornar-se baixa.

Esse é um dos motivos para que usualmente seja efetuado condicionamento químico do lodo antes da centrifugação. No caso de lodos de ETAs, o condicionamento é muito importante, tendo em vista que esse tipo de lodo se apresenta usualmente com aspecto gelatinoso e tixotrópico (conforme comentado no Capítulo 2), contendo sólidos floculados de pequenas dimensões. Normalmente, esse condicionamento químico é realizado com a adição de polímeros sintéticos de alto peso molecular, os quais atuam como agentes floculantes.

A aplicação correta desses condicionadores também confere ao lodo maior coesão entre os sólidos retidos no interior da centrífuga, possibilitando remoção contínua e eficiente dos mesmos nos equipamentos de eixo horizontal, conforme será comentado em detalhes na próxima seção.

4.3 Tipos e Características Básicas dos Equipamentos Utilizados em Centrifugação de Lodos

Como os lodos de ETAs e de ETEs podem usualmente apresentar uma gama muito ampla de tamanho de partículas, incluindo materiais muito finos ou até gelatinosos (como no caso de lodos de ETAs), geralmente é inviável o emprego de centrífugas contendo tambores perfurados, pois a água teria de percolar através da camada gelatinosa de lodo acumulada internamente ao tambor durante sua migração para fora do tambor. Assim, esses tipos de lodos podem ser mais facilmente desidratados

em centrífugas que possuam tambores cilíndricos com parede não perfurada, na qual o lodo pode ser devidamente compactado na face interna do tambor.⁽⁹⁾

Os três tipos de centrífugas mais comuns com essa característica, ou seja, com tambores não perfurados, são as centrífugas de disco com eixo vertical (veja a Figura 4.3), centrífugas com tambor não perfurado de eixo vertical (veja a Figura 4.4) e centrífugas decantadoras de eixo horizontal (veja o corte esquemático na Figura 4.5 e detalhes nas Figuras 4.6 e 4.7).

Todos os três tipos operam segundo o princípio de remoção de sólidos de uma suspensão, escoando através delas sob influência de campos centrífugos geralmente na faixa de 1.000 a 6.000 vezes a força gravitacional. A diferença fundamental entre os três tipos é o método com que os sólidos são coletados e descarregados do tambor.

A centrífuga de discos é mais utilizada em processos industriais diversos, nos quais se tenham suspensões contendo baixas concentrações de partículas finas. Seu nome deriva do fato de que, nesses equipamentos, a vazão afluenta é distribuída entre vários canais estreitos formados por vários discos cônicos superpostos⁽⁸⁾ (veja a ilustração na Figura 4.3).

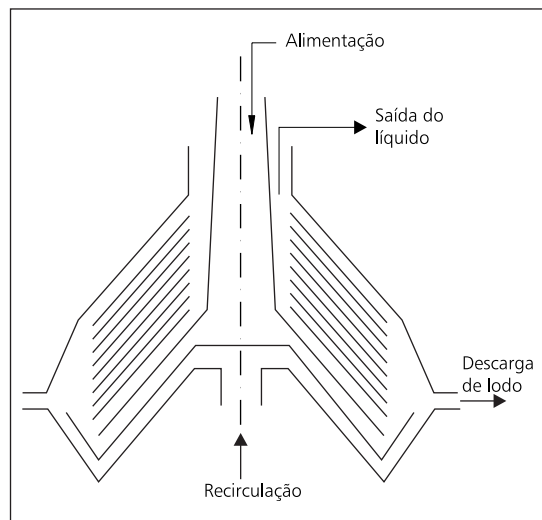


Figura 4.3 Esquema de uma centrífuga de disco com eixo vertical.

Na centrífuga com tambor não perfurado de eixo vertical, a alimentação é feita pelo fundo do tambor e os sólidos são acumulados na parede interna do tambor rotativo, enquanto o efluente clarificado verte pelo topo do mesmo tambor (veja a Figura 4.4).

Esse tipo de equipamento é capaz de separar uma ampla faixa de tamanho de partículas. Entretanto, como a mesma não possui dispositivos para a descarga contínua dos sólidos acumulados, a operação requer interrupções periódicas para remoção desse material. A camada menos compacta da torta pode ser removida, mesmo com a centrífuga em movimento, por meio de raspadores especiais existentes no interior do tambor, os quais são acionados por um detetor da espessura da camada de sólidos acumulada. A parcela da torta mais compacta, representada pela camada mais próxima da parede do tambor, é removida promovendo-se a parada do equipamento e acionamento de facas especiais para a raspagem desses sólidos.

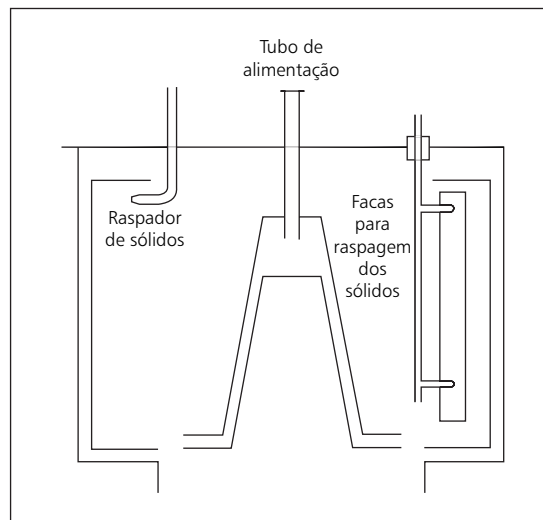


Figura 4.4 Esquema de uma centrífuga com tambor não perfurado de eixo vertical.

O terceiro tipo, denominado centrífugas decantadoras de eixo horizontal, ou somente centrífugas decantadoras, é o mais amplamente utilizado para desidratação de lodos. Essas centrífugas consistem essencialmente em um tambor cilíndrico horizontal sem perfurações que, quando rotacionado, promove a separação acelerada dos sólidos e sua acumulação em sua parede interna. Esses sólidos são continuamente arrastados para uma das extremidades do cilindro por meio de uma rosca transportadora helicoidal (rosca sem fim) disposta internamente ao cilindro (veja as Figuras 4.5, 4.6 e 4.7). Esse cilindro possui a forma cônica convergente na região de descarga dos sólidos, permitindo que a rosca transportadora movimente a massa de sólidos para fora da camada de líquido existente no interior do tambor, percorrendo um pequeno trecho “seco” antes de ser descartada para fora da centrífuga.

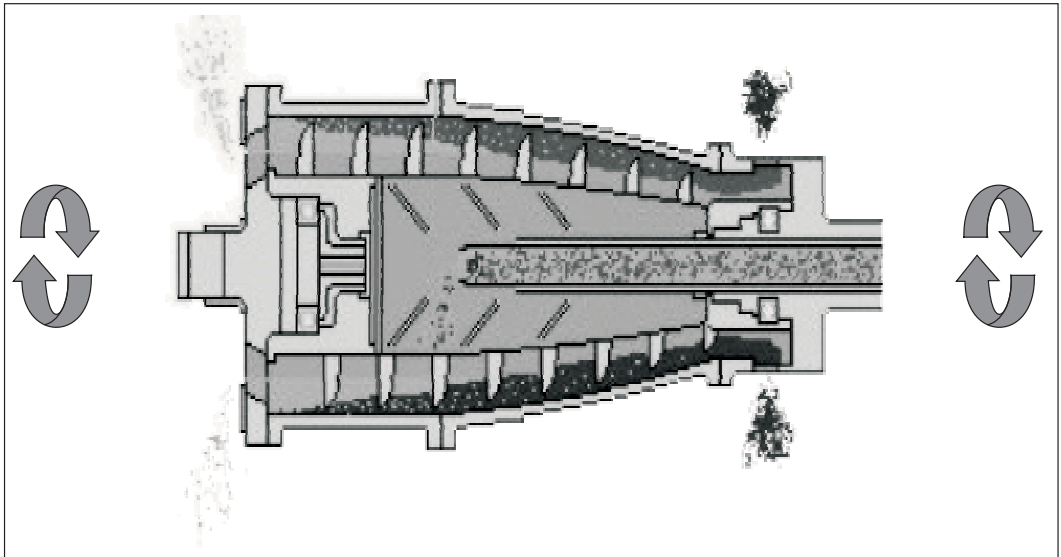


Figura 4.5 Esquema de uma centrífuga decantadora com eixo horizontal. (Cortesia da Perialisi S/A.)

Nesse tipo de centrífuga, o tambor e a rosca sem fim giram no mesmo sentido, mas com frequências ligeiramente diferentes, proporcionando o arraste dos sólidos pela rosca sem fim. As frequências de giro desses equipamentos são bastante elevadas, usualmente na faixa de 3.000 a 6.000 rpm, resultando em acelerações centrífugas de 2.000 a 5.000 vezes a aceleração da gravidade.

A maioria das centrífugas decantadoras possui fluxo de lodo do tipo “contracorrente”, ou seja, a alimentação do lodo ocorre pelo mesmo lado de onde são removidos os sólidos desidratados e a saída do líquido drenado situa-se no lado oposto.⁽¹⁵⁾ Na Figura 4.7 é apresentado um desenho ilustrativo desse tipo de centrífuga.

Uma segunda modalidade de centrífuga decantadora são aquelas que, ao contrário do tipo “contracorrente”, apresentam alimentação do lodo pelo lado oposto da saída dos sólidos desidratados. Na Figura 4.6 é apresentado um esquema desse segundo tipo de centrífuga decantadora.

Quanto maior a relação comprimento/diâmetro e a rotação nas centrífugas decantadoras, maior sua capacidade de clarificação do líquido, e maiores rotações resultam também em maior grau de desidratação dos sólidos. Outra característica importante é que, quando submetida a altas rotações, a rosca sem fim apresenta certa dificuldade para

mover sólidos muito plásticos e “macios” para fora do tambor. Por esse motivo, geralmente esse tipo de centrífuga apresenta melhor desempenho nas situações em que os sólidos formam uma torta mais consistente durante a centrifugação. Mudanças no projeto, como da região de entrada e distribuição do lodo no interior da centrífuga, podem promover melhoria no desempenho com sólidos menos consistentes.⁽¹⁰⁾ Além disso, a aplicação de polieletrólitos e outros coagulantes costuma, na maior parte dos casos, aumentar significativamente a eficiência de remoção de sólidos (R).

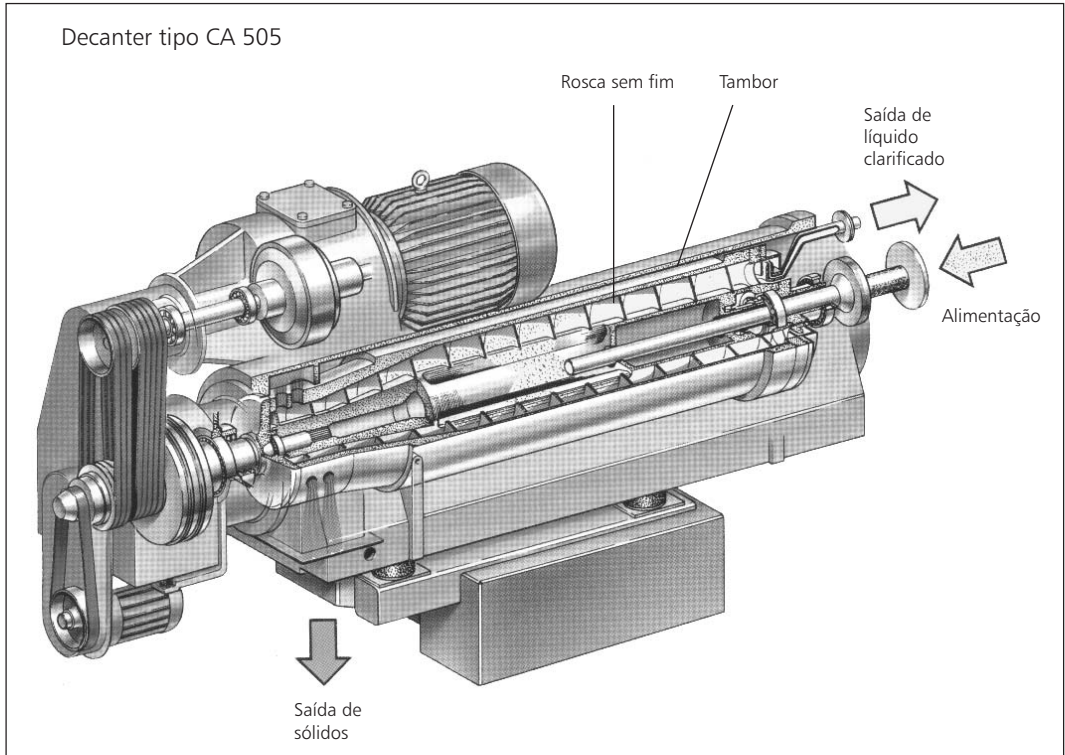


Figura 4.6 Corte em perspectiva mostrando o interior de uma centrífuga decantadora com eixo horizontal e com alimentação do lado oposto da saída dos sólidos. (Cortesia da Westfalia Separator do Brasil Ltda.)

Essa eficiência é usualmente utilizada para caracterizar o desempenho de centrífugas, podendo ser calculada, em porcentagem, através da seguinte fórmula:

$$S = \frac{C_k (C_f - C_c)}{C_f (C_k - C_c)} \times 100\% \quad (4.1)$$

em que,

C_k : Concentração de sólidos na torta (%).

C_f : Concentração de sólidos no lodo afluente à centrífuga (%).

C_c : Concentração de sólidos no líquido efluente da centrífuga (%).

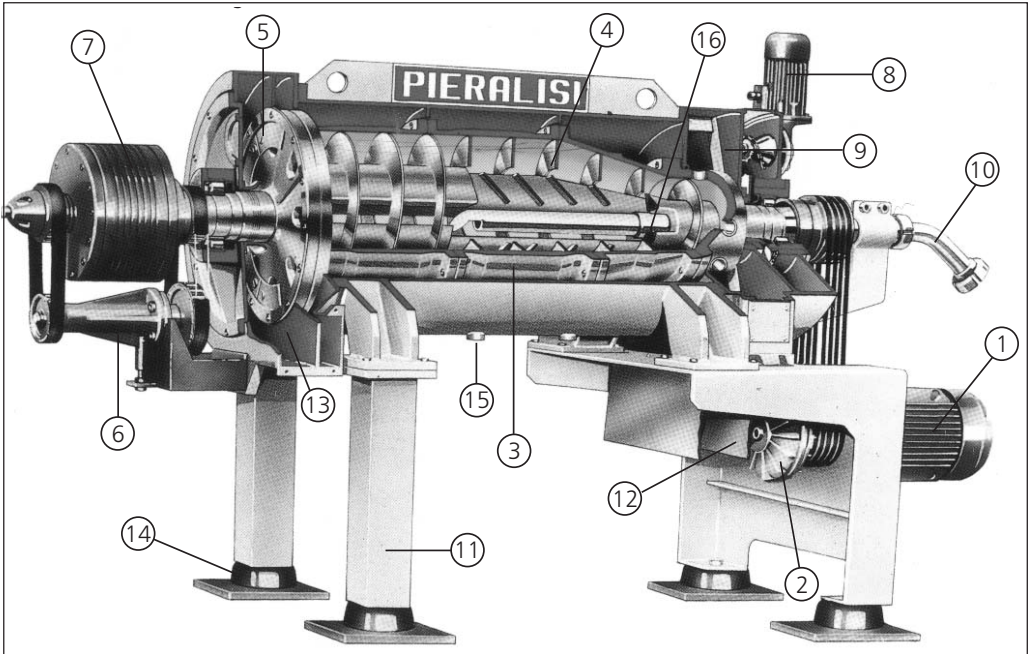
Nas Figuras 4.6 e 4.7 são mostrados os principais componentes internos e externos de centrífugas decantadoras.

As principais variáveis de projeto e operação de centrífugas decantadoras são:⁽¹¹⁾

A) *Tambor cilíndrico*

- *Rotação*: normalmente é adotada em função da força centrífuga requerida para cada tipo de aplicação. No caso de lodos, geralmente é de 25% a 35% das rotações adotadas em aplicações industriais e químicas. Escolhido o diâmetro do tambor e o G^* requerido, a rotação pode ser fixada. Nem sempre o aumento exagerado da rotação promove melhoria significativa no desempenho, podendo ocorrer em alguns casos a ruptura da estrutura dos flocos formados com a adição de polímeros. Por outro lado, a diminuição da rotação abaixo do valor ótimo acarreta aumento da umidade na torta.
- *Diâmetro e comprimento do tambor*: estes dois parâmetros são considerados conjuntamente, pois a relação comprimento/diâmetro (L/D) do tambor é mais importante que cada um deles separadamente. Em geral, o aumento no diâmetro do tambor aumenta tanto a capacidade de transporte do lodo pela rosca sem fim quanto a capacidade de clarificação. O aumento no comprimento aumenta a eficiência de clarificação, mas não a capacidade de transporte de lodo.
- *Profundidade da lâmina líquida no interior do tambor*: o nível do líquido dentro do tambor é um parâmetro operacional muito importante. Teoricamente, quanto menor a lâmina líquida, mais eficiente é a clarificação do líquido efluente. Entretanto, na prática, nem sempre é possível a operação com lâminas líquidas muito pequenas, resultando na formação de tortas mais úmidas.
- *Ângulo do cone na região de saída de lodo*: nessa região, o tambor das centrífugas decantadoras assume formato cônico convergente em relação ao eixo. A função desse cone é promover uma área seca (acima da superfície da lâmina líquida formada no interior do tambor), na qual possa ocorrer a drenagem dos sólidos antes da expulsão dos mesmos para fora da centrífuga. Essa região constitui a fase mais crítica do transporte de sólidos efetuado pela rosca sem fim, pois a força centrífuga atuante na massa sólida produz componente contrária à ação

das hélices da rosca sem fim. Caso se tenha a presença de sólidos “viscosos” no lodo, essa ação pode provocar tendência de escoamento desses sólidos no sentido contrário ao da rosca transportadora. Para minimizar tal tendência, deve-se suavizar esse ângulo. Além disso, normalmente os fabricantes conferem acabamento interno rugoso ao tambor, com vistas a melhorar a eficiência de transporte dos sólidos.



- | | |
|---|--|
| 1 – Motor principal | 9 – Câmara do raspador de sólidos (sistema patenteado) |
| 2 – Acoplamento hidráulico | 10 – Tubo de alimentação ajustável |
| 3 – Tambor | 11 – Suportes (padrão) |
| 4 – Rosca | 12 – Descarga de sólido |
| 5 – Cabeçotes de descarga de líquidos | 12 – Descarga de líquido |
| 6 – Transmissão por polias | 13 – Amortecedores de vibração |
| 7 – Redutor tipo planetário | 14 – Drenos para limpeza |
| 8 – Motor do raspador de sólidos (sistema patenteado) | 15 – Dispositivo de lavagem do produto desidratado |

Figura 4.7 Corte em perspectiva mostrando o interior de uma centrífuga decantadora com eixo horizontal e alimentação contracorrente. (Cortesia da Pieralisi S/A.)

B) Rosca sem fim

Há uma grande variedade de tipos de roscas sem fim com diferentes configurações de ângulo e formato de hélice, projetados para cada aplicação específica. Essas especificações são usualmente mantidas em segredo pelos fabricantes, pois a rosca sem fim constitui uma das principais partes da centrífuga. As características de dureza da superfície metálica das hélices são importantes, pois dizem respeito à vida útil da peça e de seu desempenho na remoção de sólidos. A localização e o projeto dos pontos de alimentação da centrífuga, assim como o ponto de admissão de polímeros, também apresentam importância muito grande. Os flocos formados não devem ficar submetidos a esforços cisalhantes excessivos para que sejam minimizadas as chances de “quebra” prematura dos mesmos antes da sedimentação e remoção pelas hélices no interior da centrífuga.

C) Parâmetros básicos de interesse para o usuário de centrífugas

Basicamente, há quatro principais parâmetros técnicos de grande interesse para o usuário de centrífugas decantadoras:

- Grau de clarificação do líquido centrifugado.
- Capacidade de processamento da centrífuga e potência da mesma.
- Grau de hidratação da torta produzida.
- Dosagem requerida de condicionadores químicos (usualmente polímeros).

Esses quatro parâmetros são interdependentes e variam para cada tipo de lodo considerado, não sendo possível generalizações. A dosagem de polímeros é usualmente expressa em termos de kg de polímero aplicado por tonelada de sólidos totais secos presentes no lodo afluente. Há sempre dosagens ótimas de polímeros, acima das quais não se obtém melhora significativa do desempenho. O condicionamento químico do lodo de ETAs, na grande maioria das vezes, é feito com a aplicação de polímeros sintéticos catiônicos, aniônicos ou não iônicos.

Vale reafirmar que não é possível qualquer generalização acerca do melhor tipo de polímero, fazendo-se necessário que, para cada caso, sejam realizados ensaios de centrifugação para determinação de qual o melhor tipo de polímero e respectiva dosagem ótima.

Entretanto, verifica-se, na prática, certa dificuldade por parte dos operadores de unidades de centrifugação para obtenção do melhor tipo e respectiva dosagem ótima de polímero a ser aplicado no lodo a ser processado. Geralmente, esses parâmetros acabam sendo obtidos, de forma não muito criteriosa, por meio de processo de tentativas, utilizando-se a própria centrífuga em escala real. Devido às dimensões e grandes vazões de lodo requeridas por esses equipamentos, torna-se bastante difícil a otimização do processo dessa maneira. Tendo em vista tais dificuldades, foi utilizado pelos autores deste capítulo um método simples e prático para esse fim, bastante

parecido com aquele proposto por Vesilind e Zhang.⁽¹⁶⁾ Para a aplicação desse método é necessário que se disponha apenas de uma pequena centrífuga de laboratório com alimentação por batelada, conforme será visto na Seção 4.4.

O referido método constitui ferramenta bastante útil para a operação de centrifugação de lodos de ETEs e de ETAs, pois, além de proporcionar o correto condicionamento químico de lodos (otimização do tipo e dosagem de polímero), permite também a investigação de valores adequados de tempo de centrifugação e da intensidade da aceleração centrífuga aplicada pelo equipamento (expressa em número de vezes que a mesma é maior que a aceleração da gravidade, ou seja, do G^*).

Vale salientar que o referido método foi testado pelos autores durante a realização do projeto proposto pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, USP, na primeira fase do Programa de Saneamento Ambiental Prosab/Tema 4 (Aproveitamento de Lodo de Estações de Tratamento de Água e Esgoto).

4.4 Descrição do Método para Realização de Ensaios de Laboratório Visando à Escolha do Tipo e Dosagem de Polímero na Centrifugação de Lodos

Materiais e Equipamentos Necessários

Para aplicação do método para realização de ensaios de centrifugação de lodos em laboratório são necessários os seguintes equipamentos e materiais essenciais:

- Centrífuga de laboratório com alimentação por batelada (veja a fotografia mostrada na Figura 4.8).
- Cubetas da centrífuga com graduação volumétrica (por exemplo, cubetas graduadas com capacidade de 15 ml).
- Agitador manual ou elétrico para mistura da solução de condicionadores químicos (polímeros, por exemplo) a serem investigados.
- Pipetas para medição dos volumes de lodo e da solução de condicionador químico a ser dosado.
- Beckers para realização da mistura da solução dos condicionadores químicos nas amostras de lodo.
- Dispositivo para limpeza do resíduo (torta) final acumulado no fundo das cubetas após a centrifugação e leitura do respectivo volume.
- Amostras do lodo a ser estudado.
- Alíquotas das soluções de condicionadores químicos (polímeros) em concentração adequada.

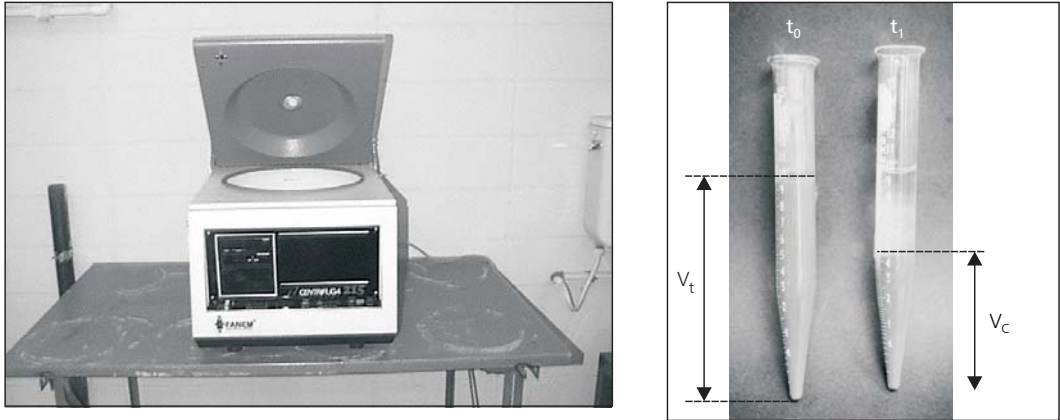


Figura 4.8 Centrífuga e cubetas utilizadas nos experimentos.

O método foi desenvolvido com base nas seguintes hipóteses e considerações:

- i) Volume interno do frasco de centrifugação contendo a amostra de lodo é considerado um sistema fechado (sem perda de massa durante o ensaio).
- ii) Todos os sólidos suspensos presentes no lodo estarão contidos na torta final gerada durante a centrifugação, ou seja, considera-se desprezível a concentração de sólidos suspensos remanescentes no sobrenadante (líquido clarificado), após a centrifugação.
- iii) Portanto, é válida a expressão:

$$SST_{i*} = \frac{M_{t_i}}{V_t} \quad (4.2)$$

em que:

SST_{i*} : concentração de sólidos suspensos totais iniciais no lodo após a aplicação de polímero (mg/L).

M_{t_i} : massa total inicial de sólidos em suspensão (mg).

V_t : volume total da suspensão (L).

Além disso, também torna-se válida a expressão:

$$SST_f = \frac{M_{tf}}{V_c} \quad (4.3)$$

em que:

SST_f : concentração de sólidos suspensos totais finais na torta (mg/L).

M_{tf} : massa total de sólidos suspensos presentes na torta resultante após centrifugação (mg).

V_c : volume resultante de torta após centrifugação (mL).

Como o sistema é considerado fechado, obtém-se:

$$667_I = 667_{i^*} \frac{9_V}{9_c} \quad (4.4)$$

Procedimentos

Com base nessas considerações, o método preconiza a execução dos seguintes procedimentos de ensaio:

- i) Efetuar a determinação dos Sólidos Suspensos Totais (SST), presentes na amostra de lodo a ser estudada.
- ii) Preparar solução do polímero a ser investigado com concentração adequada, compatível com a viscosidade do polímero e com a concentração de SST na amostra de lodo.
- iii) Pipetar volumes iguais (compatíveis com a capacidade do becker escolhido) de amostras de lodo e depositar nos beckers para mistura com a solução de polímero (condicionadores químicos). O número de beckers deve ser compatível com o número de valores de dosagens do polímero que se queira investigar.
- iv) Pipetar diferentes volumes de solução de polímero, compatíveis com as dosagens de polímero a serem investigadas, adicionando-os aos respectivos beckers contendo amostras de lodo. As dosagens de polímero usualmente são expressas em gramas de polímero/Kg de SST.
- v) Com auxílio do agitador, promover a mistura do polímero na amostra de lodo durante o período de tempo adequado à completa dispersão da solução de polímero.

- vi) Calcular as novas concentrações de SST em cada becker, tendo em vista a diluição ocasionada pela adição da solução de polímero à amostra de lodo. Ou seja:

$$SST_{i*} = SST_1 \frac{V_{il}}{V_{il} + V_p} \quad (4.5)$$

em que,

SST_{i*} : concentração de sólidos suspensos totais iniciais no lodo após a aplicação de polímero floculante (mg/L).

SST_1 : concentração de sólidos suspensos totais no lodo, antes da adição do polímero (mg/L).

M_{t_i} : massa total inicial de sólidos em suspensão (mg).

V_{il} : volume inicial de lodo (ml).

V_p : volume da solução de polímero adicionada (ml).

- vii) Transferir iguais volumes das misturas “lodo + solução de polímero” de cada becker (numerado) para as respectivas cubetas (com a mesma numeração dos beckers), alojando-as no interior da centrífuga.
- viii) Impor rotação de ensaio no equipamento de centrifugação e escolher quatro ou mais intervalos de tempo de centrifugação (por exemplo, 10, 20, 40 e 60 minutos) para efetuar as leituras do volume ocupado pela fase sólida (torta) nas cubetas da centrífuga. Após cada intervalo de tempo, frear a centrífuga e efetuar as leituras em cada cubeta, anotando-as com critério e calculando as respectivas concentrações de sólidos suspensos totais (ou teor de sólidos na torta) utilizando a expressão (4.4).
- ix) Repetir o procedimento anterior pelo menos mais duas vezes, impondo rotações diferentes à centrífuga.
- x) Para cada rotação investigada, construir “curvas de centrifugação” (uma curva referente a cada dosagem estudada, ou seja, a cada cubeta da centrífuga), plotando-se os valores de teor de sólidos na torta no eixo das ordenadas e o respectivo tempo de centrifugação no eixo das abscissas.
- xi) Após o período de centrifugação, efetuar a leitura do volume ocupado pela fase sólida (torta) no interior de cada cubeta e calcular a concentração final de

SST referente a cada cubeta, ou seja, a cada dosagem estudada conforme descrito no item viii).

- xii) Por meio da comparação entre os diversos valores de SST obtidos, é possível avaliar a dosagem que forneceu maior grau de remoção de água do lodo.

Na prática, caso se queira apenas controle rotineiro do condicionamento químico de um determinado tipo de lodo, podem ser fixados (padronizados) a rotação e o tempo de ensaio de centrifugação, ou seja, não é necessária a construção de “curvas de centrifugação”. Para a fixação desses parâmetros, basta a execução inicial de pelo menos quatro ensaios com diferentes rotações (por exemplo, 750, 1.500, 2.250 e 3.000 rpm), nos moldes descritos nos itens anteriores, obtendo-se as respectivas “curvas de centrifugação”. A rotação a ser escolhida para os futuros ensaios “simplificados” deve ser aquela que forneça curvas que permitam visualizar com maior clareza a melhor dosagem de polímero; já o tempo de ensaio de centrifugação a ser fixado deve ser aquele a partir do qual não se verifique variação significativa no teor de sólidos, através das curvas de centrifugação. Para melhor visualização do método, é apresentado na Figura 4.9 um esquema ilustrativo dos principais procedimentos descritos.

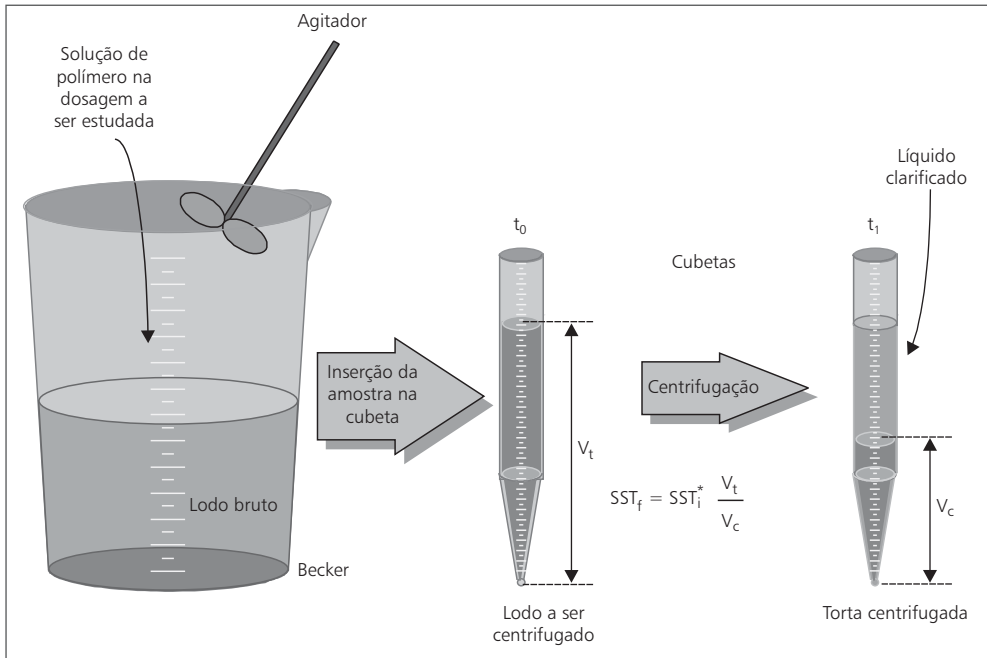


Figura 4.9 Esquema das principais etapas do método utilizado para ensaios de centrifugação.

Além de possibilitar a otimização do condicionamento químico de lodos, o método permite também que se avalie, para um determinado tipo de lodo, a relação entre a eficiência de remoção de água do mesmo e a intensidade da aceleração centrífuga aplicada (a qual, em um mesmo equipamento, é função direta da rotação aplicada e, conseqüentemente, da energia consumida).

Aplicação do Método: Estudo de Caso

A seguir, apresenta-se um estudo de caso em que o método foi aplicado visando à otimização da dosagem de um polímero catiônico de alto peso molecular empregado como condicionador durante a centrifugação de amostra de lodo proveniente dos decantadores de uma ETA que utilizava sulfato de alumínio como coagulante primário. O lodo bruto, contendo inicialmente teor de sólidos no lodo em torno de 0,6%, antes da centrifugação, foi submetido a espessamento por flotação, atingindo teor de SST em torno de 6% após a aplicação de 4,5 Kg de polímero catiônico/Kg de SST durante o espessamento. Após o espessamento por flotação, foram realizados os ensaios de centrifugação utilizando a metodologia proposta. A dosagem adicional de polímero (DP) para a etapa de centrifugação foi variada na faixa de 0,9 a 5,3 g/Kg de SST, em três ensaios efetuados com as seguintes rotações na centrífuga: 1.500 rpm ($G^* = 465$); 2.250 rpm ($G^* = 1.047$) e 3.000 rpm ($G^* = 1.861$). Os ensaios se estenderam até 100 minutos, com intervalos de leitura de 10 minutos. Na Figura 4.10 são mostradas as curvas de centrifugação obtidas durante o ensaio realizado com rotação de 1.500 rpm ($G^* = 465$), e, nas Figuras 4.11 e 4.12, são mostrados os resultados dos ensaios efetuados com 2.250 rpm ($G^* = 1.047$) e 3.000 rpm ($G^* = 1.861$), respectivamente.

Observando-se as curvas de centrifugação mostradas na Figura 4.10, referentes ao ensaio com rotação de 1.500 rpm ($G^* = 465$), verifica-se que, após 60 minutos de ensaio, as dosagens de polímero inferiores a 3,6 g/Kg de SST permitiram obter teor de SST na torta na faixa de 19,4% a 24%; enquanto para dosagens maiores ou iguais a 3,6 g/Kg de SST foram obtidas tortas com teor de sólidos igual a 25%. Portanto, o ensaio nessa rotação permitiu concluir que a melhor dosagem de polímero catiônico para o lodo em estudo foi de 3,6 g/Kg de SST. Além disso, observa-se na Figura 4.10 que, para ensaios a 1.500 rpm ($G^* = 465$), tempos de centrifugação maiores que 60 minutos não resultaram em aumento nos valores de teor de sólidos na torta, permanecendo os mesmos sempre em torno de 25%.

As curvas de centrifugação mostradas na Figura 4.11, referentes ao ensaio com rotação de 2.250 rpm ($G^* = 1.047$), da mesma forma que as curvas obtidas com 1.500 rpm, indicam que a dosagem ótima do polímero foi de 3,6 g/Kg de SST, pois, após 60 minutos de centrifugação, as dosagens inferiores a esse valor forneceram teor de sólidos de no máximo 28,6%, enquanto dosagens maiores ou iguais a 3,6 g/Kg de SST resultaram em teor de sólidos na torta de 33,3%. Também verificou-se nessa rotação que tempos de centrifugação acima de 60 minutos não proporcionaram aumento nos valores de teor de sólidos na torta, para todas as dosagens estudadas. Deve-se salientar

que, comparando-se com a rotação de 1.500 rpm (Figura 4.10), a rotação de 2.250 rpm forneceu curvas mais “próximas” entre si, ou seja, a visualização da melhor dosagem ficou um pouco menos “clara” quando se aumentou a rotação de 1.500 para 2.250 rpm.

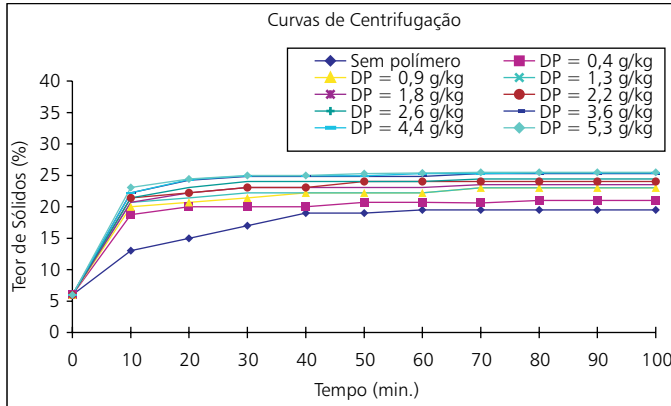


Figura 4.10 Curvas de centrifugação associadas a diferentes valores de dosagens do polímero catiônico referentes a ensaio realizado com rotação de 1.500 rpm ($G^* = 465$).

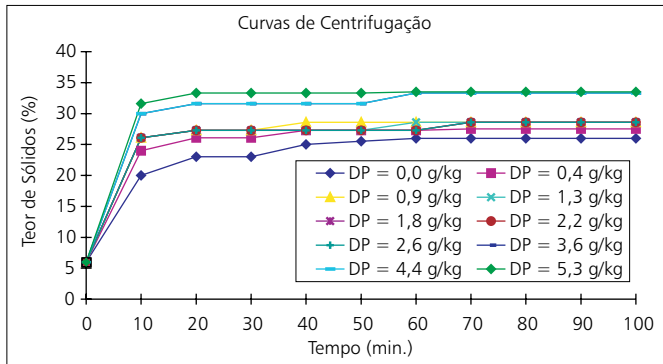


Figura 4.11 Curvas de centrifugação associadas a diferentes valores de dosagens do polímero catiônico referentes a ensaio realizado com rotação de 2.250 rpm ($G^* = 1.047$).

As curvas obtidas com rotação de 3.000 rpm ($G^* = 1.861$) são mostradas na Figura 4.12. Observa-se que para essa rotação fica menos “clara” a visualização da melhor dosagem a partir das curvas de centrifugação resultantes comparadas às rotações menores anteriormente discutidas. Com essa rotação, após 60 minutos de ensaio, as

dosagens na faixa de 0,4 a 2,6 g de polímero/Kg de SST forneceram valores de teor de sólidos na torta entre 35,3% e 36%, enquanto dosagens na faixa de 3,6 a 5,3 g/Kg de SST resultaram em teores de SST iguais a 37,5%. Portanto, apesar de ainda ser possível a seleção da melhor dosagem de polímero com a aplicação dessa rotação mais elevada, os resultados de teores de SST na torta ficaram muito próximos entre si, tornando mais difícil essa seleção.

Assim, para lodos do tipo estudado é recomendável a adoção de valores de G^* na faixa de 500 a 1.000 durante os ensaios de centrifugação, conforme o método proposto. Talvez, para outros tipos de lodo, a faixa de rotação recomendada seja diferente dessa, devendo, nesses casos, ser realizada investigação do tipo da apresentada no presente estudo de caso.

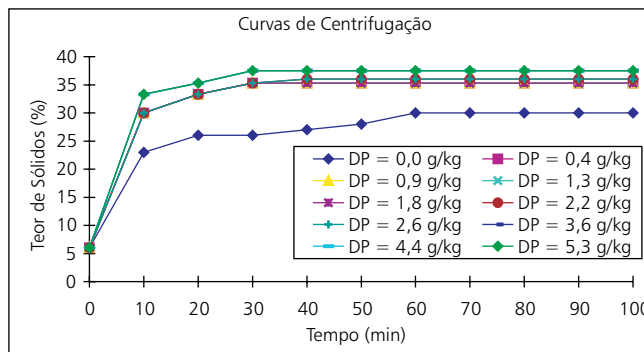


Figura 4.12 Curvas de centrifugação associadas a diferentes valores de dosagens do polímero catiônico referentes a ensaio realizado com rotação de 3.000 rpm ($G^* = 1.861$).

Finalmente, na Figura 4.13, são apresentadas, conjuntamente, apenas as curvas referentes à dosagem ótima de polímero (3,6 g/Kg de SST) obtidas em cada um dos ensaios realizados com diferentes rotações. A análise comparativa dessas curvas permite constatar que o tipo de lodo estudado previamente espessado por flotação com dosagem de polímero de 4,5 g/Kg de SST e condicionado para a centrifugação com mais 3,6 g/Kg de SST do mesmo polímero apresentou teor de SST na torta crescente com o aumento da rotação na centrífuga. Após 60 minutos de ensaio, para valores de G^* de 465 (1.500 rpm), 1.047 (2.250 rpm) e 1.861 (3.000 rpm), resultaram teores de SST na torta de 25%, 33,3% e 37,5%, respectivamente.

Portanto, para o tipo de lodo investigado (lodo de ETA), o método utilizado demonstrou-se uma ferramenta bastante útil e prática para otimização do condicionamento químico do mesmo, visando à centrifugação e permitindo a obtenção rápida de resultados consistentes relacionando a dosagem de agentes condicionadores com o teor de sólidos na torta centrifugada. Nesse caso, a dosagem ótima de polímero catiônico selecionada foi de 3,6 g/Kg de SST.

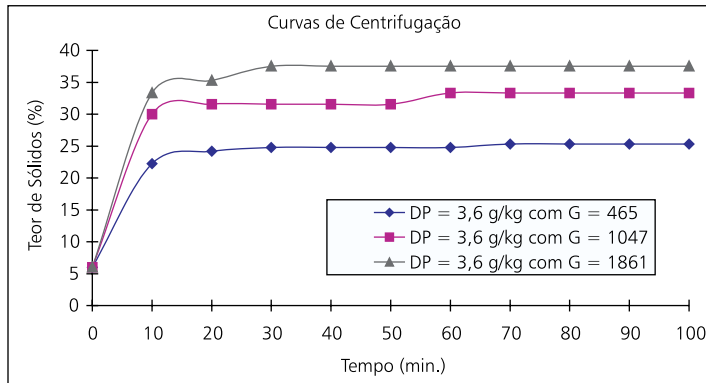


Figura 4.13 Curvas de centrifugação obtidas em ensaios com diferentes rotações, com dosagem de polímero catiônico de 3,6 g/Kg de SST (dosagem ótima).

As curvas de centrifugação obtidas pela aplicação do método permitiram, além da otimização do condicionamento químico do lodo, o estudo da influência do tempo de centrifugação e da intensidade da força centrífuga aplicada ao grau de remoção de água da torta.

Para o lodo investigado, independente do valor de G^* aplicado (até 1.861), o tempo de ensaio de centrifugação, em laboratório, recomendado é de 60 minutos. Para 60 minutos de centrifugação, o lodo de estudo apresentou valores crescentes de teor de sólidos na torta a medida que se aumentou o valor de G^* aplicado, e para o G^* máximo obtido na centrifuga da laboratório, igual a 1.861, obteve-se 37,5% de sólidos (em massa) na torta.

4.5 Referências Bibliográficas

1. KRASAUKAS, J.W. (1969). Review of sludge disposal practices. *Journal AWWA*, v.61, n.5, p.225-230, May.
2. NEUBAUER, W.R. (1968). Waste alum sludges treatment. *Journal AWWA*, v.60, n.7, p.819-826, Jul.
3. NEUBAUER, W.R.; PROUDFIT, D.P. (1969). Status Report on Engineering. *Journal AWWA*, v.61, n.10, p.551-556, Oct.
4. NIELSEN, H.L.; CARNS, K.E.; DEBOICE, J.N. (1973). Scroll centrifuge for dewatering wins at one plant. *Water and Wastes Engineering*, v.10, n.3, p.44-47, Mar.
5. WESTERHOFF, G.P.; DALY, M.P. (1974). Water treatment plant waste disposal. *Journal AWWA*, v.86, n.5 e 6.

6. GRUNINGER, R.M. (1976). Disposal of wastes alum sludges from water treatment plants. *Journal WPCF*, v.47, n.3, p.343-352, Mar.
7. NIELSEN, H.L. (1978). Water treatment sludge disposal – how and what? *Journal Env. Eng. Division ASCE*, v.104, n.EE, p.561-579, Aug.
8. HAGSTRON, L.G.; MIGNONE, N.A. (1977). Dewatering Alum Sludge? Check out a Basket Centrifuge. *Water and Waste Engineering*, v.14, n.4, p.72, Apr.
9. KEITH, F.W.; MOLL, R.T. (1971). Matching a Dewatering Centrifuge to the Waste Sludge Characteristics. In: NATIONAL MEETING OF AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS, 68., Houston, 1971. *Proceedings*. New York, AICHE.
10. KEITH, F.W.; LITTLE, T.H. (1969). Centrifuges in Water and Waste Treatment. *Chemical Engineering Progress*, v.65, n.1, p.77, Nov.
11. RECORDS, F.A. (1973). The Design and Specification of the SDC Centrifuge. Camberley, Penwalt. (Report n. 16232)
12. BISHOP, M.M.; CORNWELL, D.A.; ROLAN, A.T.; BAILEY, T.L. (1991). Mechanical Dewatering of Alum Solids and Acidified Solids: Na Evaluation. *Journal AWWA*, p.50-55, Sep.
13. REALI, M.A.P.; CORDEIRO, J.S.; PATRIZZI, L.J. (1999). Proposição de Método para Ensaios de Remoção de Água de Lodos por Centrifugação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., Rio de Janeiro, 1999. *Anais*. São Paulo, ABES.
14. REYNOLDS, T.D. (1982). *Operations and Processes in Environment Engineering*. Boston, Massachussets, PWS Publishers.
15. CULP, WESNER, CULP (1986). *Hand Book of Public Water Systems*. New York, Van Nostrand Reinhold Company.
16. VESILIND, P.A.; ZHANG, G. (1984). Technique for estimating sludge compactibility in centrifugal dewatering. *Journal WPCF*, v.56, n.12, p.1231-1237, Dec.

Capítulo 5

Remoção de Água de Lodos de ETAs Através de Filtração Forçada

João Sérgio Cordeiro

5.1 Generalidades

A remoção da água livre de lodos de ETAs através de sistemas mecânicos deve ser estudada de forma ampla, no sentido de conhecer as possibilidades de aplicação desses métodos.

Como visto no Capítulo 1, os sistemas mecânicos podem ser: filtro-prensa, filtro a vácuo, prensa desaguadora e centrífugas. Esses sistemas necessitam de energia para seu funcionamento, além de operação e manutenção mais apuradas. Neste capítulo serão apresentados os três primeiros sistemas.

Segundo Murray e Dillon,⁽²⁶⁾ o número de sistemas mecânicos em operação em cerca de 500 ETAs nos EUA não chega a 10%, em levantamento realizado (Tabela 5.1). Os sistemas mecânicos têm por característica a utilização de pressões diferentes da pressão atmosférica para auxiliar a remoção da água livre presente nos lodos. Esse aspecto mostra a necessidade de custos adicionais de implantação/operação e manutenção. Ressalta-se que esses métodos exigem menor área de implantação.

5.2 Filtro-prensa

O sistema de filtro-prensa para remoção de água de lodos funciona de forma intermitente. O lodo é introduzido em câmaras, onde “telas” (mantas) filtrantes estão alojadas. Por meio da aplicação de pressões diferenciais, inicia-se a compressão do material sobre o meio filtrante, fazendo com que o filtrado seja removido, formando-

se na câmara uma mistura com teor elevado de sólidos, usualmente denominado de “torta”.

O sistema de filtro-prensa envolve basicamente duas operações: a primeira é a aplicação de pressão sobre a massa (lodo) e a segunda consiste na filtração da água contida na massa. Na Figura 5.1 pode-se observar o esquema que ilustra o fenômeno.

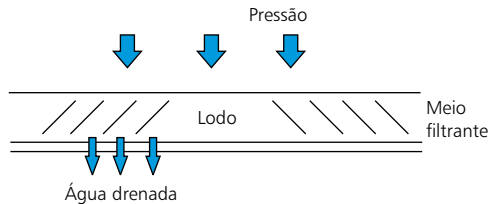


Figura 5.1 Esquema de remoção de água por sistemas sob pressão.

Segundo esse princípio há três tipos de filtro-prensa: filtro-prensa de placas, filtro-prensa de correia ou de esteira e filtro-prensa de diafragma, cada um com suas características próprias.

Os filtros-prensa são utilizados na Inglaterra desde a metade do século XIX. Um trabalho divulgado pelo Comissão Britânica Real em 1908 mostrava que existiam 21 estações de tratamento de esgotos que empregavam esse método (WEF,⁽¹⁵⁾). Nos EUA esses sistemas também são aplicados desde 1901.

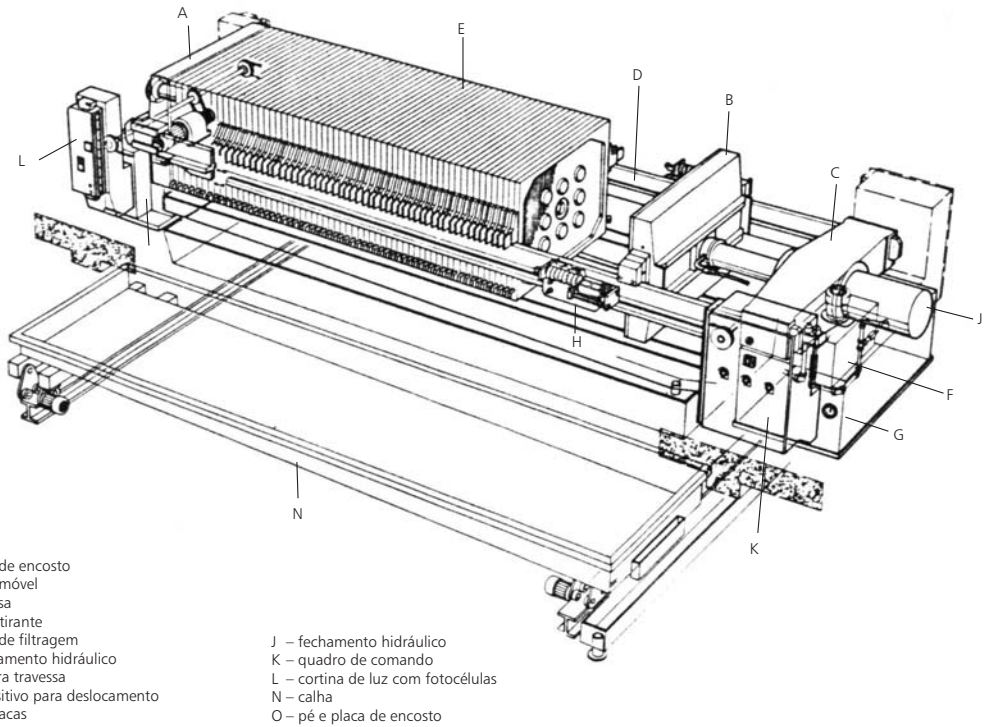
Os filtros-prensa de placa são constituídos por uma estrutura metálica que tem como guia uma viga, onde as placas são colocadas. Essa guia pode ser superior ou lateral, como mostra a Figura 5.2.

Os filtros de placa têm funcionamento em batelada, onde as câmaras são preenchidas com o lodo e a parte móvel do filtro provoca a compressão, de tal maneira que se inicia-se a formação da torta com a retirada do filtrado através de cada câmara. Na Figura 5.3 tem-se um esquema geral do filtro-prensa de placas.

À medida que as tortas de lodo se formam no interior das câmaras, a pressão de alimentação aumenta, mantendo constante o fluxo. Essa pressão aumenta gradativamente até atingir um valor máximo, a partir do qual qualquer acréscimo se torna antieconômico. Na Figura 5.4, apresenta-se esquematicamente a operação de pressão em relação ao tempo e o respectivo fluxo.

A pressão de operação dos filtros varia de 2 a 15 bar (~ 2 a 15 MPa), podendo chegar, em certos casos, a até 20 bar. Essa pressão deve ser fixada em função do tipo de lodo e do teor de sólidos que se deseja na torta. A espessura da torta depende da filtrabilidade do lodo.

As placas utilizadas nos filtros-prensa podem ser construídas com diversos materiais: ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, alumínio, aço inox e ligas especiais, poliéster reforçado com fibras sintéticas, polipropileno, madeira, Nekulit (material sintético exclusivo da marca Netzsch). Como meio filtrante normalmente são utilizados tecidos de fibras orgânicas sintéticas, tais como náilon e propileno.



A – placa de encosto
 B – placa móvel
 C – travessa
 D – trilho-tirante
 E – placa de filtração
 F – equipamento hidráulico
 G – pé para travessa
 H – dispositivo para deslocamento das placas

J – fechamento hidráulico
 K – quadro de comando
 L – cortina de luz com fotocélulas
 N – calha
 O – pé e placa de encosto

Fonte: Netzsch.

Figura 5.2 Esquemas de filtro-prensa.

A escolha do tipo de tecido é um fator importante no projeto de filtro-prensa, uma vez que o tecido promove influência direta na eficiência da operação. Assim, a abertura da trama e a espessura do filamento devem ser bem adaptadas ao tamanho da partícula que se deseja reter.

Um sistema típico de filtro-prensa inclui:

- sistema de recebimento e armazenagem do lodo;
- sistema de transferência do lodo;
- sistema de preparo e dosagem de produtos químicos;

- sistema de condicionamento do lodo;
- sistema de alimentação do filtro-prensa;
- sistema de filtração e compressão do lodo;
- sistema de transporte da torta;
- sistema de lavagem dos tecidos.

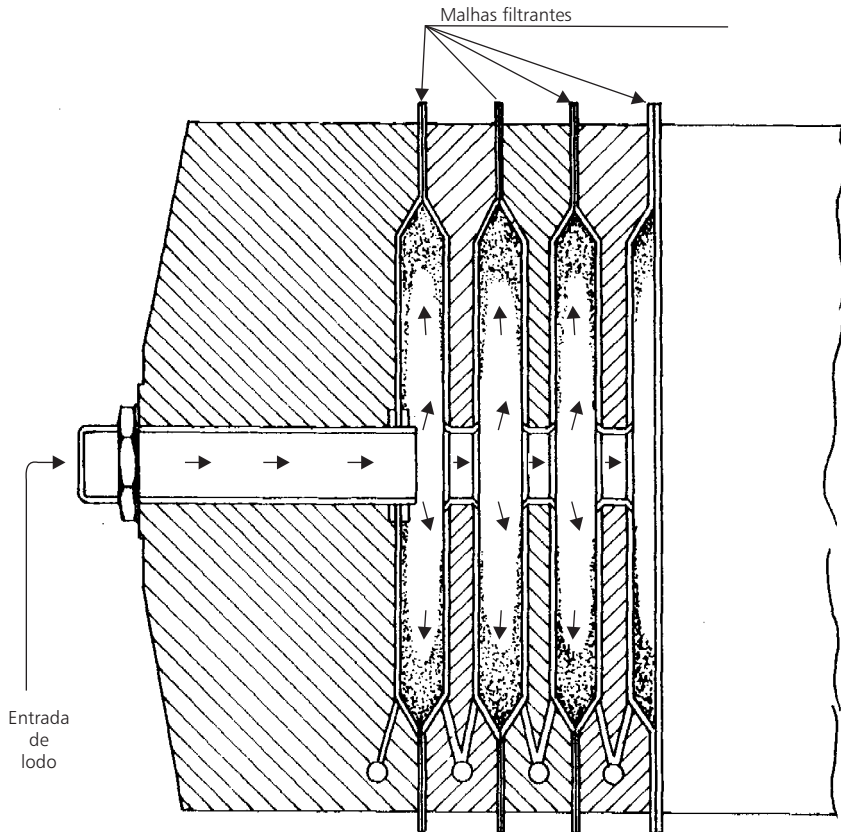


Figura 5.3 Esquema de funcionamento de um filtro-prensa de placas.

A adição de produtos químicos ao lodo bruto visa principalmente melhorar as condições de filtrabilidade do mesmo e a possibilidade de formação de um floco mais compacto.

Os produtos químicos usualmente utilizados são:

- cloreto férrico e cal;
- sulfato ferroso e cal;

- sulfato férrico e cal;
- polieletrólitos (polímeros sintéticos).

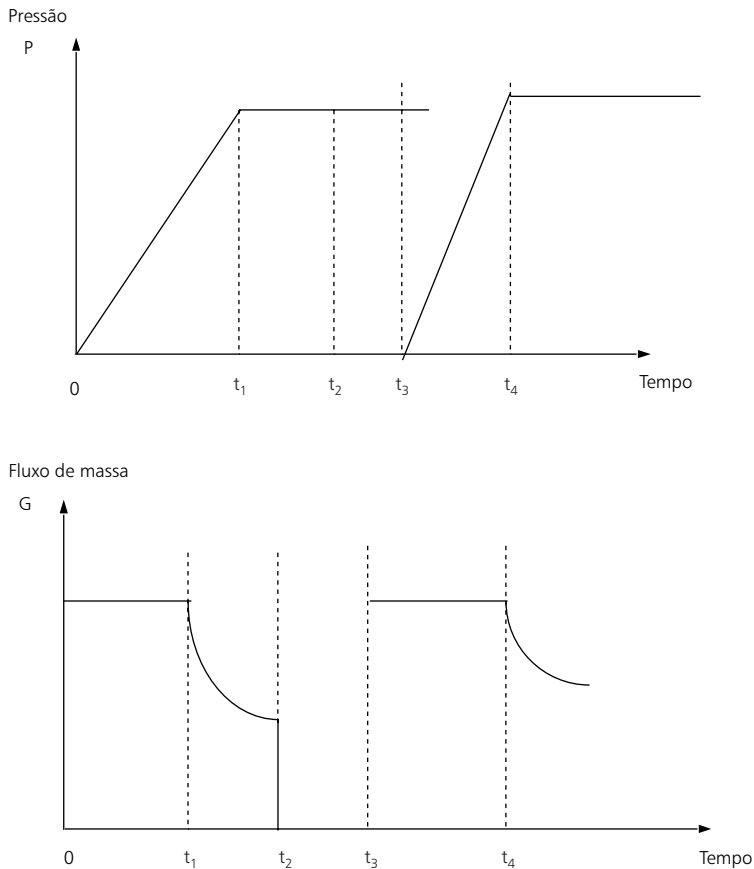


Figura 5.4 Pressão e fluxo de operação.

Segundo Young,⁽⁵⁾ essa técnica foi introduzida para lodos de estações de tratamento de água na Inglaterra, utilizando-se condicionadores, com certo sucesso. Em Armfield, Inglaterra, os lodos resultantes do tratamento da água com cloreto férrico como coagulante primário eram “desidratados” em filtro-prensa, produzindo 80 tortas de 1,2 m² de área e 25 mm de espessura. Nesse sistema era utilizado cal como condicionador e o filtrado era bombeado para a entrada da estação.

Nos EUA, os filtros-prensa começaram a ser utilizados para remoção de água de lodos de ETAs no final da década de 1960, na ETA de Chattahoochee, em Atlanta,

Ga.⁽¹¹⁾ Nessa época, dois problemas eram colocados a respeito do sistema: a reduzida vida útil das mantas e a necessidade de automatização. Para esses lodos, resultantes da utilização de sulfato de alumínio como coagulante primário, tornou-se essencial o condicionamento com cal ou polieletrólito. Dados operacionais desses filtros-prensa, da ETA de Chattahoochee,⁽¹¹⁾ apresentam concentrações de 40% de sólidos na torta, aplicando cal como condicionador. O filtrado possuía 10 mg/L de sólidos suspensos. Segundo Adrian,⁽⁷⁾ não havia estudos sobre custo do sistema.

Trabalho teórico⁽¹⁶⁾ sobre a aplicação de filtros-prensa para lodos de ETAS mostrou a necessidade de utilização de polieletrólito como condicionador. Baseado em dados fornecidos pela experiência britânica, o estudo mostrou que o ciclo de filtração poderia variar de 2 a 24 horas, passando a fornecer torta com concentração de sólidos variando de 25% a 30%, e espessura de 20 a 30 mm.

Quando, no início da década de 1970, as regulamentações sobre o controle de poluição nos EUA começaram a ser mais restritivas, as agências estaduais de controle ambiental passaram a exigir soluções para os resíduos da indústria da água, os quais deveriam ser tratados e dispostos adequadamente. Dessa forma, os serviços de abastecimento de água da Baía de São Francisco foram intimados a resolver essa questão. Iniciaram-se então estudos em estações-piloto de filtro-prensa.⁽¹⁷⁾ Esse sistema possuía quatro câmaras com 600 mm de diâmetro, formando uma torta com 25 mm de espessura. Nos ensaios foram utilizados polímeros não-iônicos, os quais demonstraram a viabilidade da aplicação do sistema.

Nessa mesma época, o Departamento de Saúde do Estado de Nova York exigiu providências para os resíduos das ETAs que utilizavam o lago Erie como manancial. Dessa forma, a ETA de Sturgeon Point em Buffalo, N.Y., em fase de expansão, através de Westerhoff e Daly,⁽¹⁸⁾ empreendeu estudos em estações-piloto para redução do volume do lodo. Analisando-se alternativas de desidratação, o sistema de filtro-prensa demonstrou ser o mais econômico para aquela aplicação.

Ainda no Estado de Nova York, a cidade de Rochester abastecida pelas ETAs de Monroe County Water Authority (MCWA) e Shoremont, que serviam 430.000 pessoas, e a ETA da Eastman Kodak Company, que em conjunto tratavam 7.600 L/s, estabeleceram, em 1971, uma *joint venture* para estudo da viabilidade do tratamento e disposição final de seus lodos. Gruninger e Dyksen⁽¹⁹⁾ mostraram que os filtros-prensa constituíam o sistema mais econômico, o qual, implantado em 1977, se tornou o maior em operação nos EUA, com 112 câmaras de 2 m x 2 m e espessura da torta de 30 mm. O lodo “seco” era depositado em aterros sanitários, após estudos realizados pelo Departamento de Saúde de N.Y.

Segundo Cornwell e Koppers,⁽²⁾ até o final da década de 1970 existiam 15 instalações de filtros-prensa nos EUA, não havendo maiores informações a respeito do funcionamento das mesmas.

No Brasil, não há informações a respeito de aplicações de filtros-prensa para lodos de ETAs em escala real, no entanto, algumas experiências em laboratório e em escala piloto podem ser citadas.

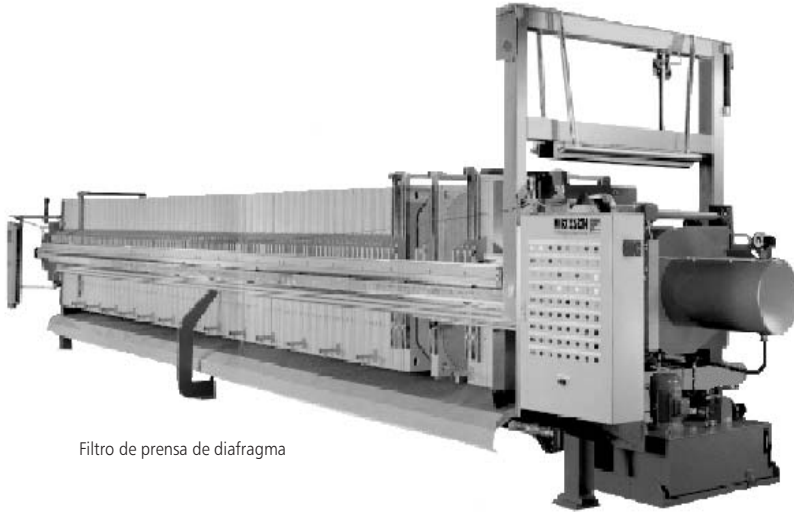
Em 1987 foi realizado estudo⁽⁴⁾ a respeito de sistemas para remoção de água de lodos de sete das maiores ETAs da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, dentre elas Guaraú, Alto Boa Vista, Rio Claro e Rio Grande. Nos estudos foi proposta a utilização de filtro-prensa de correia (filtro-esteira) para a “desidratação” dos resíduos gerados nas ETAs Guaraú e Alto Boa Vista. No entanto, esses não foram implantados e novos estudos foram reiniciados em 1994. Até o final de 1999, nenhum sistema havia sido construído.

O Departamento Municipal de Águas e Esgotos (DMAE), de Porto Alegre, RS,⁽³⁾ efetuou alguns estudos visando à diminuição de volume do lodo gerado nas ETAs São João e Belém Novo, utilizando sistemas mecânicos de remoção de água. Foram estudados os sistemas filtro a vácuo, filtro-prensa de correia e centrífugas, os resultados obtidos mostraram que as centrífugas e os filtros-prensa seriam mais adequados para a solução do problema.

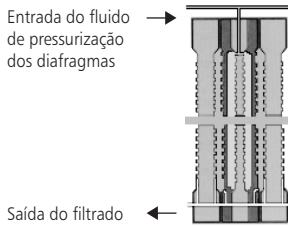
Grandin⁽¹⁰⁾ em estudos realizados em laboratório e em escala piloto com lodos da ETA Guaraú – RMSP, utilizando filtros-prensa de placas, concluiu que havia necessidade de condicionamento do lodo. O condicionante mais apropriado foi o polieletrólito aniônico.

Recentemente foi lançado no Japão o fitro-prensa diafragma, que utiliza uma membrana flexível na parte chanfrada da tela filtrante. Estudos realizados por Doe e Malmrose (1985), citados por Cornwell e Koppers,⁽²⁾ em estação-piloto na cidade de Norfolk, EUA. concluíram que o sistema poderia obter 30% de sólidos na torta, sem necessidade de nenhum tipo de condicionante. Outro fator foi a diminuição do ciclo de prensagem, que passava de 145 minutos no sistema convencional para 55 minutos, utilizando-se um diafragma para cada tela filtrante, e 26 minutos, empregando-se dois diafragmas.

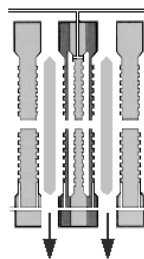
A implantação do sistema em Norfolk, que entrou em operação em 1987, apresentou resultados diferentes dos obtidos na estação-piloto, exigindo o condicionamento do lodo com cal, além da troca do meio filtrante, o qual teve de ser substituído por apresentar problemas de drenagem.



Filtro de prensa de diafragma



Os diafragmas são alimentados com o fluido de pressurização e comprimem a torta



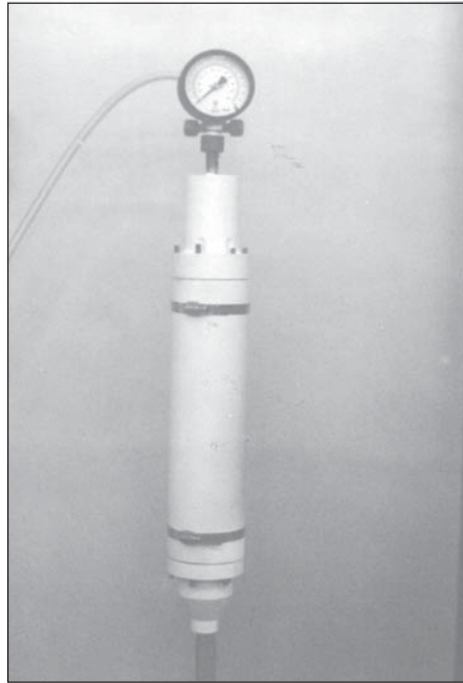
Abertura do pacote de placas

Descarga das tortas

Fonte: Netzsch.⁽⁶⁾

Figura 5.5 Filtro-prensa de diafragma – sistema de funcionamento.

Para analisar a possibilidade de aplicação de filtro-prensa para remoção de águas de lodos ETAs, foi utilizado o protótipo para testes em laboratório desenvolvido por Cordeiro,⁽⁸⁾ como mostra a Figura 5.6.



Fonte: Cordeiro.⁽⁸⁾

Figura 5 6 Sistema de filtro-prensa de laboratório.

O sistema foi construído a partir de tarugo de PVC rígido de 110 mm de diâmetro. O equipamento é constituído de três partes: a parte superior, denominada câmara de compressão, é conectada através de mangueira ao sistema de compressão de ar; a parte intermediária, onde a amostra é colocada, tem diâmetro interno de 50 mm; e a parte inferior é o local onde se aloja a manta e serve para a coleta e direcionamento do drenado.

Na câmara de compressão foi adaptado um manômetro com capacidade de 0 a 1,4 MPa, além de válvula de alívio. A manutenção da pressão era realizada com válvula reguladora.

Como meio filtrante foram utilizadas mantas em náilon, polipropileno e poliéster, com permeabilidade variando de 0,15 a 0,8 m³/m² min.

Os ensaios foram realizados com lodo removido na limpeza dos decantadores da ETA-São Carlos (SP), que utiliza sulfato de alumínio como coagulante. As amostras de lodo foram coletadas no ponto de descarga localizado na margem esquerda do córrego Monjolinho. Esse resíduo foi caracterizado e submetido aos testes no aparelho mostrado na Figura 5.6. Nos ensaios foram utilizadas pressões variando de 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 MPa.

Para a realização dos ensaios foi utilizado o seguinte procedimento:

- remoção das partes inferior e superior do aparelho;
- colocação do meio filtrante, após sua seleção;
- fechamento da parte inferior;
- colocação de 500 ml de lodo na câmara intermediária;
- fechamento da parte superior;
- acionamento da compressão.

A amostra colocada no equipamento foi submetida à pressão e comprimida contra a manta filtrante. A partir daí, duas etapas eram estabelecidas: na primeira, a água livre era drenada e coletada. Nessa etapa os sólidos e a água restante formavam uma torta úmida; na segunda era realizada a secagem da torta.

O volume total filtrado era medido em função do tempo de aplicação da pressão e a torta resultante era colocada em estufa para que fosse efetuado o balanço final. Na Figura 5.7 apresentam-se as curvas de drenagem. Pode-se perceber que a porcentagem de remoção de água pode chegar a 30% com tempo de aplicação de pressão de 120 minutos e $P = 0,8$ MPa.

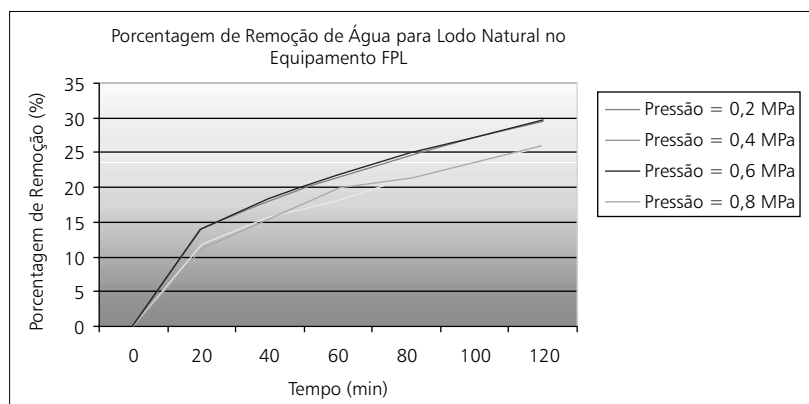
Por meio desses ensaios foram determinadas: a capacidade de remoção de água para as várias mantas, pressões e a qualidade do drenado (pH, turbidez, cor, sólidos, DQO).

Considerando-se os valores do lodo bruto mostrados na Tabela 1.3 do Capítulo 1, pode-se perceber que ocorreu remoção de DQO de cerca de 99%; e Sólidos Totais de 93%. No entanto, os valores de cor ainda eram elevados. Ressalta-se que nesse caso a torta ainda possuía elevada umidade, havendo então necessidade de condicionamento.

Através da Tabelas 5.1 pode-se observar a qualidade do líquido drenado quando se utiliza o sistema.

Tabela 5.1 Parâmetros físico-químicos apresentados pelo drenado.

Manta	Pressão (Mpa)	pH	Turbidez (UT)	Cor (UC)	Sólidos Totais (mg/L)	DQO (mg/L)
4400-T	0,6	6,9	40	4.000	2.090	372
4400-T	0,4	7,0	65	4.000	1.770	416
1098-T	0,6	7,1	42	1.250	82	42
4400-T	0,2	6,8	22	2.500	583	110
1098-T	0,4	6,5	42	700	208	218
2075-TNT	0,4	6,5	46	1.250	212	204
4360-T	0,4	7,0	12	2.500	811	312
2075-TNT	0,6	6,5	32	1.800	241	202



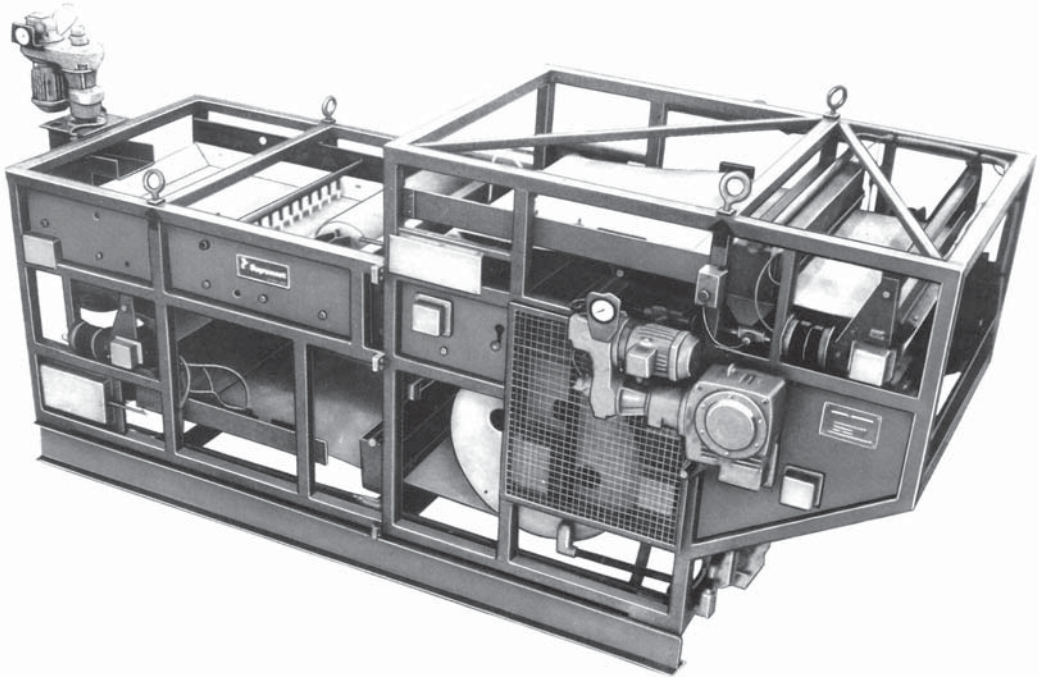
Fonte: Cordeiro.⁽⁸⁾

Figura 5.7 Remoção de água por drenagem e evaporação de lodo de ETA.

5.3 Prensa Desaguadora

O filtro-prensa de correia é um equipamento que funciona com o lodo sendo introduzido entre duas correias, em que uma delas é o meio filtrante. Estas deslocam-se entre roletes que promovem a compressão de uma esteira ou correia sobre a outra, provocando a drenagem do líquido. Na Figura 5.8 tem-se um esquema desse equipamento.

Esse equipamento foi desenvolvido no início da década de 1960.



Fonte: Degremont.⁽²⁴⁾

Figura 5.8 Prensa desaguadora.

A operação envolve três etapas básicas em seu funcionamento: a primeira é o condicionamento do afluente, a segunda é uma drenagem gravitacional e a terceira é a compactação do lodo, por meio de forças de compressão. Deve-se ressaltar que a realização de um bom condicionamento constitui fator fundamental para que se obtenha bom desempenho final.

O lodo é introduzido na esteira orientado por um sistema de distribuição através de rastelos, permitindo uniformidade na entrada. Em seguida, o lodo é comprimido por um rolo. Até esse ponto é chamado de zona de drenagem gravitacional. Assim, o lodo é introduzido no espaço que forma uma cunha, entre as esteiras em movimento, sofrendo compressões sucessivas e chegando a um tambor perfurado. Em seguida, as esteiras são comprimidas por uma série de roletes que aumentam a pressão de desaguamento. As duas esteiras se separam após o rolo e o lodo seco é removido através de raspadores.

Dispositivos automáticos permitem o controle e a centralização das esteiras. Equipamento de lavagem de alta pressão limpa as esteiras e os tambores através de pulverizadores, e o filtrado é removido.

O equipamento é dotado de sistema de segurança para o caso de desvio das correias, pane no sistema de injeção de água de lavagem e falta de ar comprimido que efetua estiramento das correias.

O filtro-prensa de esteira é utilizado em lodos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários e também em processos industriais. Entre as vantagens que o equipamento apresenta podem ser citadas: simplicidade de operação e manutenção, baixo consumo de água (5 a 8 m³/m de esteira) e alta taxa de captura de sólidos.

O sistema de desidratação utiliza galpão fechado de construção simples, bomba de alimentação de lodo, equipamento de preparo e dosagem de floculante (se necessário), correia transportadora de lodo, painel de alimentação, água com pressão de 0,4 a 0,6 MPa e ar comprimido com pressão de 0,7 MPa.

Segundo Cornwell⁽⁹⁾ a Orange Water and Sewer Authority (OWASA), localizada na cidade de Carboro, Carolina do Norte, EUA, que opera uma ETA convencional que trata 420 l/s, em fevereiro de 1986 terminou a construção de um sistema de remoção de água de lodos de ETAs, utilizando filtros-prensa de esteira.

Os resíduos dos decantadores e filtros eram equalizados em tanques de 360 m, com concentração de 2% a 4% de sólidos. A aplicação do *belt-press* permitiu que chegasse à média de 15% de sólidos. Esse material era removido por caminhões para disposição final no solo.

Segundo Gebrin,⁽²³⁾ no Brasil, alguns ensaios utilizando o *belt-press* foram realizados no ETA de Cubatão, em agosto de 1988, sistema esse operado pela Sabesp. O lodo removido diretamente dos decantadores sem adensamento e com condicionamento prévio através de polímero (1986-H aniônico de Cyanamid) obteve como resultado tortas com 85% de umidade em média, utilizando a prensa desaguadora modelo 811 da Degremont.

5.4 Filtro a Vácuo

Os filtros a vácuo são equipamentos utilizados na “desidratação” de lodos industriais que operam desde 1872, nos EUA. Seu funcionamento baseia-se em um tambor posicionado horizontalmente dentro de uma caixa que contém o lodo. A superfície do tambor é dividida em setores que servem de suporte para o meio filtrante. A pressão negativa é aplicada em cada setor por meio de tubos internos e a superfície do tambor é envolvida com o meio filtrante (manta) através do qual a água é drenada para o tambor, passando através do lodo. Os sólidos são depositados sobre a manta e removidos por raspadores para fora do sistema.

Os filtros a vácuo consistem em tambores suspensos que giram em recipientes de lodo (de eixo horizontal) revestidos com uma tela filtrante. Esse movimento é lento, variando de 1/8 a 1 rotação por minuto (rpm). A submersão é de cerca de 1/4 de suas superfícies externas. Seções do tambor são submetidas à sucção e pressões positivas alternadamente, durante cada revolução. Por meio dessa operação, os sólidos depositam-se sobre a superfície do tambor e a água drenada através do lodo e da superfície filtrante é recolhida.

Um esquema em corte de um filtro a vácuo pode ser observado na Figura 5.9. Na Figura 5.10 são mostradas as etapas de filtração.

A tela filtrante pode utilizar os mais diversos materiais, tais como tecido de algodão, lã, fibras sintéticas, fios plásticos, entre outros. Esse meio filtrante é um dos principais parâmetros a ser considerado no sistema.

A instalação da filtração a vácuo inclui:

- bombas para vácuo;
- entrada para produtos químicos;
- filtro a vácuo;
- tanque de recuperação;
- bomba para o filtrado;
- correia para transporte da massa;
- receptor da massa.

As dimensões variam de 1,0 a 3,6 metros de diâmetro e de 0,9 a 6,0 m de comprimento, dependendo do tipo de equipamento.

A eficiência dos filtros a vácuo é influenciada por fatores tais como:

- concentração de sólidos na torta;
- temperatura;
- demanda de água;
- eficiência de clarificação;
- tempo de secagem;
- operação a vácuo.

Para lodos muito diluídos (de 1% a 2% de sólidos), faz-se necessário o pré-condicionamento para a desidratação, utilizando-se cal, cloreto férrico ou polieletrólito.

A seleção do filtro a vácuo é efetuada a partir do conhecimento do ciclo de operação, da quantidade total de sólidos a secar e a obtida após a filtragem em $\text{kg/m}^2\text{h}$ de área de filtragem, por hora de operação.

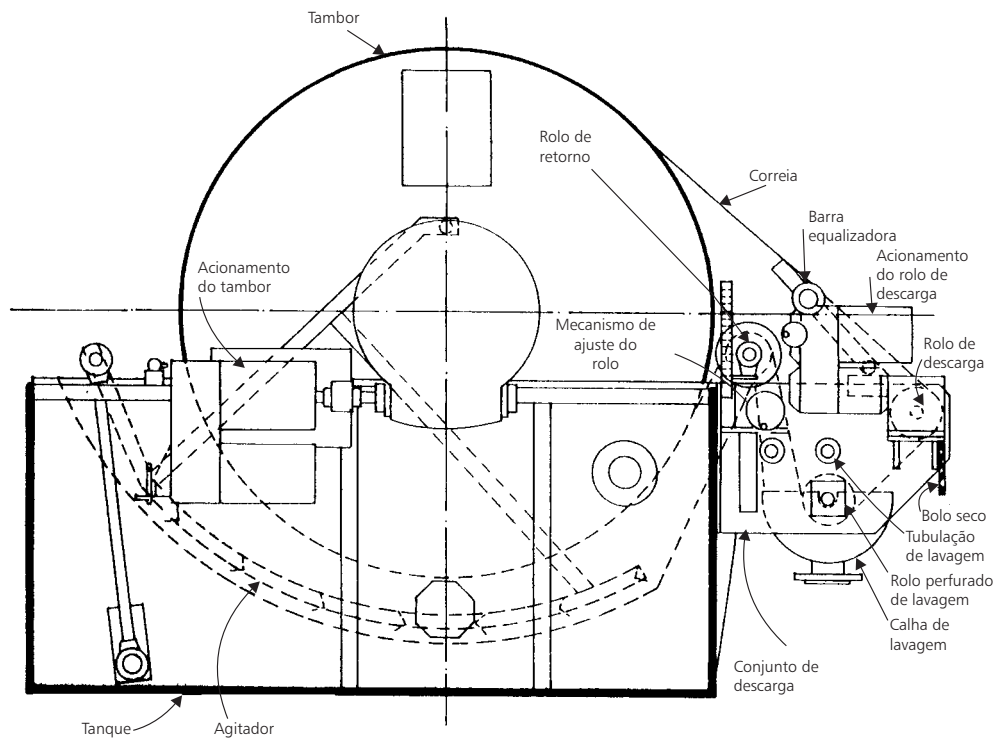


Figura 5.9 Esquema de sistema de filtro a vácuo.

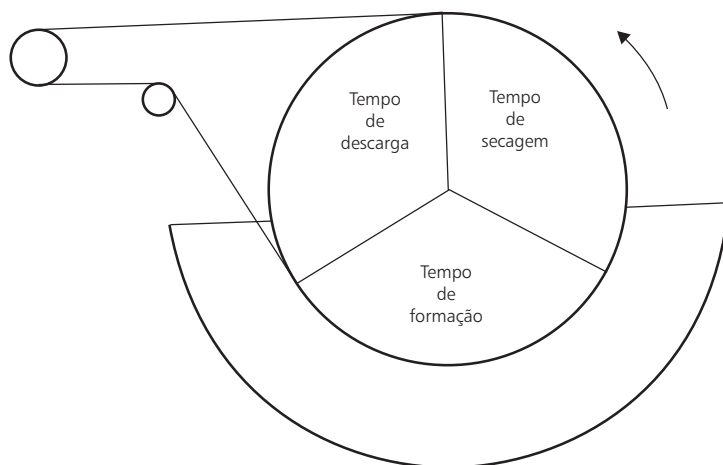


Figura 5.10 Esquema das etapas de funcionamento do filtro a vácuo.

Neubauer,⁽¹²⁾ realizando testes do funil de Buchner em laboratório, com lodos das ETAs de Shoremont, Rochester, N.Y., e Wolcott, Wolcott, N.Y., com capacidades de 1.300 L/s e 43 L/s, respectivamente, mostrou que a operação utilizando filtro a vácuo poderia remover 99% de SS, 50% de DBO e 95% de DQO.

Neubauer e Proudifit,⁽¹³⁾ citaram o exemplo da utilização dos filtros a vácuo para remoção de água dos lodos de ETAs, realizada pela Opel Car Works na Alemanha, cujo sistema de tratamento de água utilizava sulfato de alumínio como coagulante primário. O método obteve sucesso em função da grande quantidade de carbonato de cálcio, fornecendo concentração de sólidos na faixa de 20% a 40%.

Mahoney e Duensing,⁽²¹⁾ realizando testes com filtro a vácuo rotativo, fornecido pela Johns Mainville Products Corp, na ETA de Albany, N.Y., mostraram que a concentração de sólidos passava de 1,2% no lodo afluente para 32% concentrado.

Experiências realizadas por Gruninger⁽¹⁹⁾ para desidratação dos lodos das ETAs de Sturgeon Point, Buffalo, N.Y., e da Kodak, através de filtros a vácuo com adição de condicionantes, mostraram que poderiam ser obtidos de 20% a 30% de sólidos.

Vários autores têm demonstrado restrições quanto à utilização destes equipamentos para remoção da água de lodos resultantes da coagulação com sulfato de alumínio. Krausaukas⁽¹¹⁾ relatou essa limitação. Fulton⁽²²⁾ enfatizou a natureza gelatinosa dos lodos de ETAs, sendo necessário o condicionamento dos mesmos. Nielsen et al.⁽¹⁷⁾ mostraram maior custo operacional desses sistemas em relação a outros e a necessidade de altas dosagens de polímeros, além de problemas com o meio filtrante.

5.5 Considerações Finais

Analisando-se as condições de utilização de sistemas mecânicos para remoção de água de lodos de ETAs pode-se perceber que, apesar de toda a experiência descrita, a aplicação efetiva ainda é um fato a ser analisado com cuidado.

Deve-se ressaltar que, mesmo nos países onde a conscientização sobre a necessidade de buscar soluções para os lodos de ETAs é mais desenvolvida, os projetos envolvendo esses métodos é ainda acanhado. Isso se deve ao fato de os lodos de ETAs terem características próprias e de difícil manejo. A remoção de água livre depende do tamanho das partículas que influenciam a filtrabilidade e resistência específica dos mesmos.

Os fabricantes de equipamentos de remoção de água deverão, no futuro, estudar esse material de forma a efetuar modificações na estrutura construtiva dos sistemas. Isso irá se refletir na forma de redução de volume do lodo.

5.6 Referências Bibliográficas

1. BISHOP, S.L. (1978). Alternate processes for treatment of water plant wastes. *Journal AWWA*, Denver, v.70, n.9, p.503-506, Sep.
2. CORNWELL, D.A.; KOPPERS, H.M.N. (1990). *Slib, Schlamm Sludge*. AWWA, Reseach Foundation, 267p.
3. DMAE (1994). Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água – Comissão de lodos. Porto Alegre, Dez.
4. SABESP (1987). Recuperação de água de lavagem, tratamento e disposição de resíduos sólidos das ETAs da RMSF. *Revista DAE*, São Paulo, v.47, n.150, p.216-219, Dez.
5. YOUNG, E.F. (1968). Water treatment plant sludge disposal practices in the United Kingdon. *Journal AWWA*, Denver, v.60, n.6, p.717-732, Jun.
6. NETZSCH (1999). Informativo Técnico, São Paulo.
7. ADRIAN, D.D.; NEBKLER, J.H. (1969). Report on current technology and costs. *Journal AWWA*, Denver, v.61, n.12, p.682-708, Dec.
8. CORDEIRO, J.S. (1993). *O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas*. São Carlos. 342p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
9. CORNWELL, D.A.; BISHOP, M.M.; GOULD, R.G. et al. (1987). *Handbook on water treatment plant wastes management*. Denver, AWWA Research Foundation, 461p.
10. GRANDIN, S.R. (1992). *Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água*. São Paulo. 465p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
11. KRASAUSKAS, J.M. (1969). Review of sludge disposal practices. *Journal AWWA*, Denver, v.61, n.5, p.225-230, May.
12. NEUBAUER, W.R. (1968). Waste alum sludges treatment. *Journal AWWA*, Denver, v.60, n.7, p.819-826, Jul.
13. NEUBAUER, W.R.; PROUDIFIT, D.P. (1969). Status report on engineering. *Journal AWWA*, Denver, v.61, n.10, p.551-566, Oct.
14. MURRAY, K.; DILLON, G. (1994). Waterworks residuals management: a comparison of US and UK practice, *Management of water and wastewater solids for 21st century – A global perspective*, Washington, June.
15. WATER POLUTION CONTROL FEDERATION (1983). *Sludge dewatering – Manual of Practice n.20*. Washington, DC.

16. THOMAS, C.M. (1971). The use of filter press for the dewatering of sludges. *Journal WPCF*, Washington, v.43, n.1, p.93-101, Jan.
17. NIELSEN, H.L.; CARNS, K.E.; DEBOICE, J.N. (1974). Alum sludge thickening and disposal. *Processing water treatment plant sludge*, Denver, AWWA, p.7-25.
18. WESTERHOFF, G.P.; DALY, M.P. (1974). Water treatment plant wastes disposal-part 2. *Journal AWWA*, Denver, v.66, n.6, p.379-384, Jun.
19. GRUNINGER, R.M., DYKESEN, J.E. (1979), Success story times two. *Water and waste Engineering*. N.Y., v.16, n.1, p.25-30, Jan.
20. GRUNINGER, R.M. (1975). Disposal of wastes alum sludge from water treatment plants. *Journal WPCF*, Washington, v.47, n.3, p.543-552, Mar.
21. MAHONEY, P.F.; DUENSING, W.J. (1972). Precoat vacuum filtration and natural freeze dewatering of alum sludge. *Journal AWWA*, Denver, v.64, n.10, p.665-669, Oct.
22. FULTON, G.P. (1969). Disposal of wastewater from water filtration plants. *Journal AWWA*, Denver, v.61, n.7, p.322-326, Jul.
23. GEBRIN, M. (1992). *Comunicação pessoal*. Degremont – Saneamento e Tratamento de Água Ltda., São Paulo.
24. DEGREMONT (1999). *Catálogo Técnico*, São Paulo.

Capítulo 6

Remoção Natural de Água de Lodos de ETAs Utilizando Leitos de Secagem e Lagoas de Lodo

João Sérgio Cordeiro

6.1 Generalidades

De acordo com Cordeiro,⁽⁵⁾ os resíduos das ETAs ainda são lançados em cursos d'água, podendo provocar alterações significativas no meio ambiente. Em alguns casos, os gerentes de sistemas de abastecimento de água podem ser enquadrados como poluidores e infringindo a Lei 6.938 de 31 de agosto de 1998 em seu artigo 3, incisos II e III (alíneas c, d e e), inciso IV. Hoje, com a Lei 9.605, chamada de “Crimes Ambientais”, os gerentes de ETAs e ETEs estão sujeitos a penas severas por seu não cumprimento.

Dessa forma, como no Brasil existem cerca de 7.500 ETAs e várias ETEs industriais e sanitárias, os rejeitos gerados nesses sistemas podem provocar impactos ambientais e a possibilidade de projetar *leitos de secagem* torna-se oportunidade ímpar.

A remoção natural de água livre de lodos gerados em decantadores de ETAs e ETEs tem sido utilizada há alguns anos. Em regiões onde as condições climáticas mostram-se favoráveis e há a disponibilidade de área física, a aplicação desse método pode reduzir impactos ambientais, diminuindo o volume de despejos, possibilitando o reuso da água livre e minimizando perdas.

Os leitos de secagem constituem o método mais utilizado para “desidratação” de esgotos sanitários nos EUA. Praticamente dois terços (2/3) das estações utilizam esse método. Pesquisas para remoção de água dos lodos em leitos de secagem têm sido efetuadas desde 1900, quando se verificou que lodos digeridos desidratavam-se mais rapidamente do que lodos brutos. Os dados de projeto, no entanto, são muito empíricos e somente há pouco tempo é que têm sido estudados com mais efetividade, em termos

de engenharia. Esses sistemas caracterizam-se por serem multifásicos, envolvendo algumas etapas que podem ser analisadas na Figura 6.1.

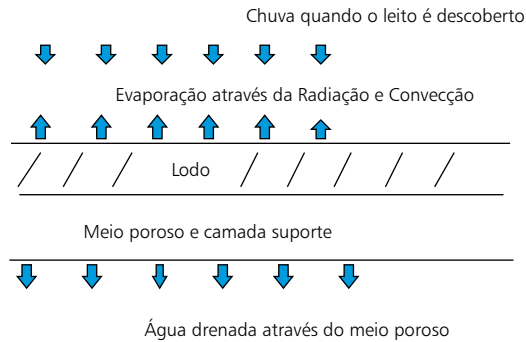


Figura 6.1 “Desidratação” esquemática em um leito de secagem.

Os leitos de secagem são constituídos por tanques rasos, com duas ou três camadas de areia com granulometria diferente e cerca de 30 cm de espessura. O sistema completo é composto por camada suporte, meio filtrante e sistema drenante, conforme a Figura 6.2.

A camada suporte tem por finalidade:

- manter a espessura do lodo uniforme;
- facilitar a remoção manual do lodo;
- evitar a formação de buracos devido à movimentação de funcionários sobre o leito.

Essa camada possui uma espessura de 0,3 m de areia com tamanho efetivo de 0,3 a 0,5 mm e o coeficiente de não-uniformidade menor que 5,0. O meio filtrante é constituído por britas graduadas de 1/8” a 1/4”, com 0,15 a 0,3 m de espessura. O sistema drenante é constituído por tubos perfurados de 150 ou 200 mm de diâmetro.

Tradicionalmente, o fundo do leito é geralmente o próprio solo, podendo, às vezes, receber uma camada de concreto simples. O lodo é espalhado em camadas de 20 a 30 cm e uma nova camada deve ser lançada somente após a secagem total do lodo.

Nos EUA, os leitos de secagem têm sido construídos com 4,5 a 18 m de largura por 15 a 47 m de comprimento. No sistema, a “desidratação” é afetada por inúmeros parâmetros, como: temperatura, umidade do ar, viscosidade do lodo e ventilação. Na Tabela 6.1 são apresentadas vantagens e desvantagens sobre a utilização de leitos de secagem.

Nos EUA, quando se utiliza esses sistemas para lodos de ETEs, as cargas de sólidos aplicadas variam de 49-122 Kg/m² ano para sistemas descobertos e 58-196 Kg/m² ano para cobertos, pois estes se encontram protegidos de chuva e neve.

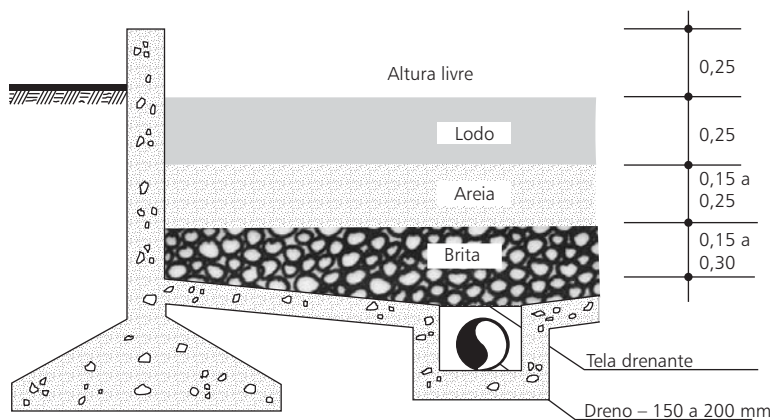


Figura 6.2 Esquema do leito (corte).

Tabela 6.1 Vantagens e desvantagens do uso de leitos de secagem.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo inicial quando o custo da terra é baixo. • Pequena necessidade de operação. • Baixo consumo de energia. • Pouca necessidade de utilização condicionantes químicos. • Alta concentração de sólidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de maior área. • Necessita trabalhar com lodo estabilizado. • Seu projeto tem necessidade de conhecimentos sobre o clima. • Remoção do lodo seco exige trabalho intensivo.

Fonte: Water Pollution Control Federation.⁽²⁰⁾

Os tubos que transportam os lodos para os leitos de secagem devem ser dimensionados para trabalharem com velocidade de 0,75 m/s.

O filtrado através do leito, deve também ser caracterizado, pois pode possuir valores elevados de DQO, metais, cor e turbidez. No entanto, a possibilidade de retorno à entrada da ETA e o reuso do drenado é fator fundamental.

Nos EUA, os dados de custo de leito de secagem para lodos de ETEs têm sido divulgados por meio da USEPA, em que os custos de capital são calculados pela equação (6.1).

$$C = 9,89 \times 10^4 \times Q^{1,35} \quad (6.1)$$

em que:

C = custo do capital (dólares);

Q = vazão da ETE em milhões de galões por dia.

Esses custos incluem: escavação, equipamentos, concreto, aço tubulações. E os custos de administração e de projeto são iguais a 0,2264 vezes a equação.

A operação do sistema de leitos de secagem inclui:

- remoção do lodo seco dos leitos;
- manutenção do leito filtrante.

No caso do Brasil, esses dados praticamente não existem. Dessa forma, deve-se tomar cuidado na aplicação desses valores, uma vez que nossa realidade é diferente.

6.2 Sistemas de Leitos de Secagem Alternativos

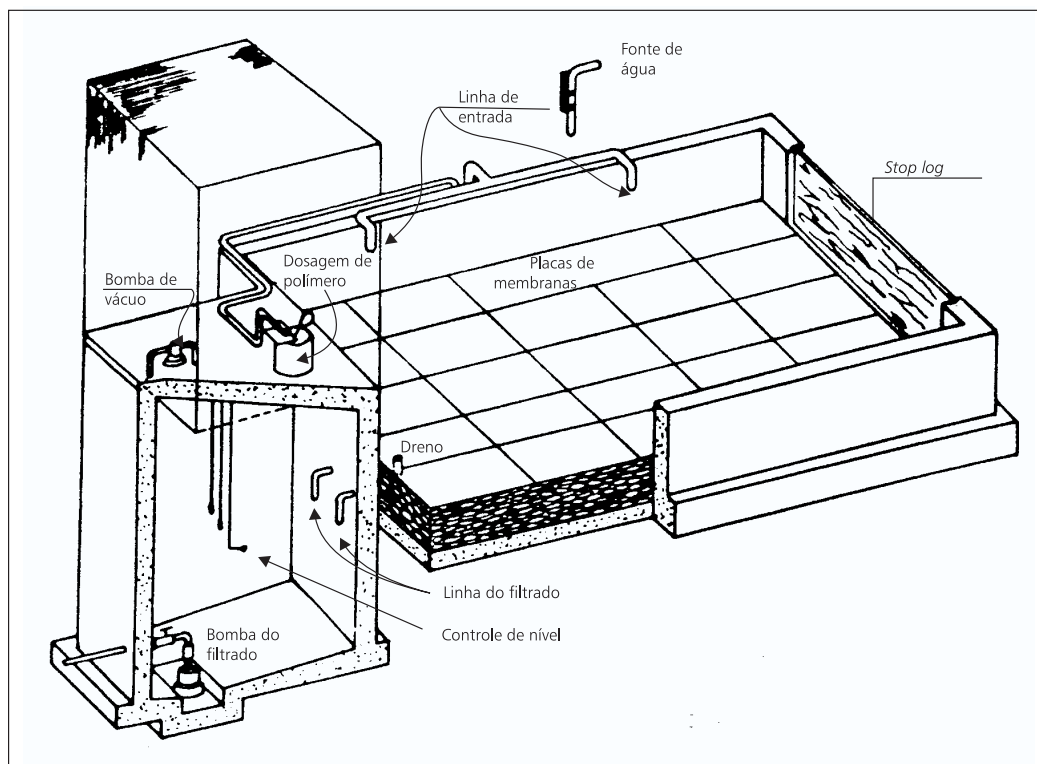
Leitos de Secagem a Vácuo

O sistema de leitos de secagem a vácuo utiliza pressões negativas para ativar a operação de drenagem. O sistema é composto pelos seguintes componentes:

- laje de fundo em concreto armado;
- camada de brita;
- membrana filtrante apoiada sobre a camada de brita;
- paredes divisórias e retentoras;
- sistema de tubulações;
- comportas de alimentação;
- bomba de vácuo;
- bomba de remoção de filtrado.

Na Figura 6.3 apresenta-se o esquema do sistema sugerido pela WPCF.⁽²⁰⁾ O lodo é introduzido sobre o leito filtrante em camadas de 30 a 50 cm. A aplicação da pressão é realizada com valores de 0,3 a 8,4 mca, mantida no poço de sucção e sob o meio filtrante. O filtrado removido é mantido no poço de acumulação até determinado nível em que a bomba de acionamento entrará em funcionamento automático.

A partir do momento em que a torta sobre o leito começa a fissurar e o vácuo passa a se perder, o sistema gerador de pressão é desligado. Esse sistema pode ser vantajoso para lodos gerados em locais com pequena disponibilidade de área para implantação de secagem de resíduo e estações que produzam pouco lodo. Por meio dessa sistemática podem ser utilizados polímeros para condicionamento do lodo.



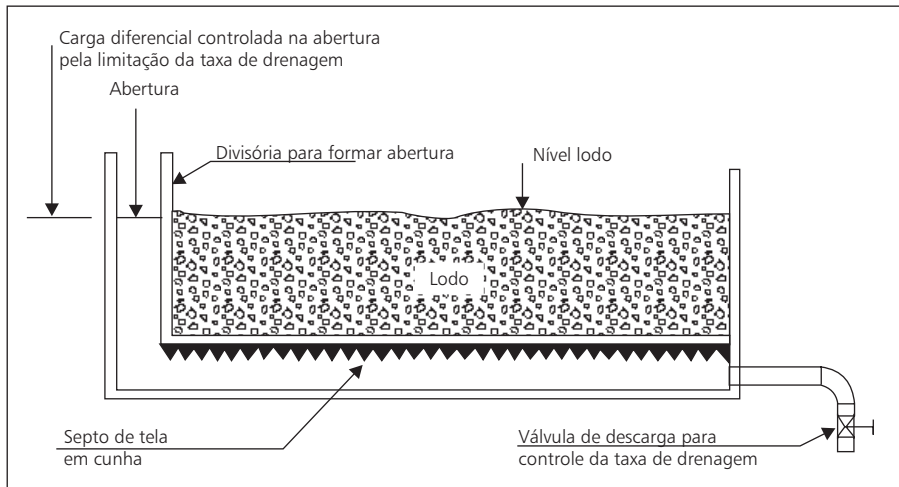
Fonte: WPCF⁽²⁰⁾

Figura 6.3 Componentes do leito de secagem a vácuo.

Leito de Secagem de Tela em Cunha

Os leitos de secagem chamados de “tela em cunha” são constituídos por tanques retangulares rasos e impermeáveis. O fundo é formado por um septo de tela em cunha, como mostrado na Figura 6.4. O fundo falso é vedado e o controle do drenado é realizado através de uma válvula de gaveta.

Esse sistema tem sido utilizado com sucesso na Inglaterra e nos EUA nos últimos 30 anos, desidratando lodos de origem sanitária e industrial. Os leitos de secagem de tela em cunha podem “desidratar” 2,4 a 4,9 Kg/m² de matéria por ciclo de operação, segundo a WPCF⁽²⁰⁾. Considerando-se um período de 24 horas, o sistema pode atingir teor de sólidos de até 12%. A utilização desse mecanismo tem sido recomendada para ETEs de pequeno porte com vazões de até 20 L/s.



Fonte: WPCF.⁽²⁰⁾

Figura 6.4 Construção de leitos de secagem de tela em cunha

6.3 Aplicações de Leitos de Secagem para Remoção de Água de Lodos de ETAs

Os leitos de secagem para remoção de água de lodos de ETAs têm sido utilizados em vários locais na Europa e EUA. Segundo o trabalho realizado por Murray & Dillon,⁽¹⁹⁾ em 469 sistemas de remoção de água de lodos de ETAs, 47 utilizam sistemas de leitos de secagem – 10% do total.

O desempenho dos leitos de secagem (LS) é afetado pelos fatores mais diversos, como: características físico-químicas do material a ser desidratado, espessura da camada aplicada, teor de sólidos, tipo de lodo a ser desidratado, condicionamento do lodo, condições climáticas do meio, características e condições do meio de drenagem, entre outros.

No Brasil, há somente a experiência da cidade de Campo Grande, Mato Grosso do Sul, que está aplicando sistemas de leitos de secagem para remoção de água de lodos de ETAs. Para países como os EUA e alguns situados na Europa, os dados são um pouco mais consistentes. Como apresentado no Capítulo 1, cerca de 10% de ETAs utilizam leitos de secagem nos EUA.

Neubauer⁽¹⁵⁾ realizou experiências com estações-piloto de leitos de secagem. A temperatura ambiente variou de 20 a 27°C, e a umidade do ar, de 72% a 93%. Os resultados obtidos mostraram que a taxa de descarga de drenagem decaiu até cessar completamente em período de 20 a 24 horas e a secagem por evaporação durou de 24

a 72 horas. Os estudos utilizaram dois lodos provenientes da coagulação com sulfato de alumínio, das ETAs de Shoremont, Rochester, N. Y., com capacidade de 1.300 L/s e Wolcot, N. Y., com vazão de 42 L/s.

O'Brian e Gere (1968), citados por Krasauskas,⁽¹⁴⁾ observaram que os lodos de ETAs dispostos em leitos de secagem, cujo afluyente continha concentração de 1% de sólidos, após intervalo de tempo de 70 a 100 horas, produziam resíduo com 20% de sólidos.

Adrian & Nebkler,⁽¹⁾ descrevendo a Estação de Tratamento de Água de Rinconada, em Los Gatos, Califórnia, que empregava leitos de secagem para lodos e água de lavagem de filtros (após recuperação de água), mostraram que a lâmina máxima de lodo utilizada era de 60 cm. Nesse sistema, o drenado do leito de secagem era lançado em um curso d'água e os sólidos dispostos no solo.

Culp⁽⁹⁾ apresentava como desvantagens da utilização de leitos de secagem para "desidratação" de lodos de ETAs a necessidade de grandes áreas para locação do sistema e a dificuldade de secagem.

Novak & Montgomery⁽¹⁶⁾ salientaram que o conhecimento das características reológicas dos lodos de estações de tratamento de água era fator fundamental para o projeto de leitos de secagem, principalmente a concentração de sólidos e a resistência específica.

Novak & Calkins,⁽¹⁶⁾ trabalhando em escala-piloto, simularam leitos de secagem em colunas com tubos plásticos de diâmetro igual a 50 mm e meio filtrante constituído por areia, com 75 mm de espessura. A camada de lodo adicionada foi de 150 mm. Foram utilizados lodos das ETAs de: Lexington, Moberly, Boonville, Jefferson City e St. Louis County, todas utilizando como manancial o Rio Missouri, no Estado de Missouri. A pesquisa revelou que as propriedades reológicas dos lodos estavam relacionadas com a concentração dos sólidos presentes.

Utilizando lodos das ETAs de Boonville, Jefferson City, Higginsville, Kirksville, Moberly e Macon, Estado de Missouri, Novak & Langford⁽¹⁸⁾ pesquisaram o condicionamento dos lodos com polímeros, para diminuição dos valores da resistência específica. Por meio dessa sistemática havia melhores condições de remoção da água. O polímero utilizado foi o Betz 1120 (Betz Labs, Trevese, Pa).

Até essa época, pouco progresso havia ocorrido para que se pudesse estabelecer formulações que permitissem determinar os valores da drenagem e evaporação dos lodos de ETAs em leitos de secagem.⁽⁸⁾ Segundo o autor, os projetos até então desenvolvidos baseavam-se em experiências anteriores ou em testes laboratoriais. Como ilustração foi citado o sistema de disposição de lodos realizado na cidade de Durham, North Carolina, em funcionamento desde 1978. Ele era composto por adensador, bomba

de lodo, condicionamento com polímeros e o leito de secagem. O lodo “seco” era removido por meio de caminhões com sistema de sucção. No adensador, a concentração de sólidos que variava de 0,5% a 1%, chegava a 3% a 5%. O leito de secagem ocupava área de aproximadamente 600 m², resultando um resíduo com 15% a 20% de sólidos. Esse sistema utilizava polímeros não-iônicos como condicionante.

As condições climáticas são também fundamentais para a eficiência dos sistemas. Locais com alto grau de insolação, baixa precipitação e umidade apresentam excelente eficiência de evaporação. Já para locais onde as precipitações são constantes e a umidade relativa do ar é elevada, as taxas de evaporação serão muito menores, resultando em um tempo de secagem muito mais longo. A velocidade do vento e sua direção predominante, aliadas às condições construtivas do sistema de secagem e às construções em torno, serão também decisivas no tempo de secagem.

Um aspecto operacional que poderá ser de grande influência nos projetos de leito de secagem está ligado à altura do lodo colocado, o meio de drenagem e a possibilidade de estabelecimento de uma interface na camada de lodo, como mostrado na Figura 6.5.

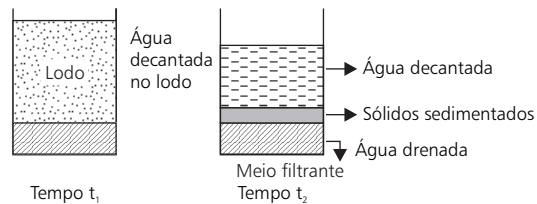


Figura 6.5 Formação de interface no lodo a ser desidratado com estabelecimento de água decantada sobre os sólidos sedimentados.

Nesse caso, as condições operacionais poderão ser auxiliadas se essa água decantada for removida por meio de dispositivos específicos.

Após a “secagem” do lodo, a torta poderá ser removida manualmente ou por meio de dispositivos mecânicos. No caso manual, haverá necessidade de emprego de mão-de-obra durante maior período. Assim, deverão ser utilizadas ferramentas e equipamentos, como:

- carrinhos de mão;
- ancinhos;
- pequenos caminhões ou vagões.

Nesse caso, é necessário que se utilize pranchas para que não haja circulação direta de pneus sobre o leito de drenagem de forma a danificá-lo.

A torta deverá conter umidade com valores entre 30% e 40%, fato esse que ocorre quando se inicia o estabelecimento de rachaduras e destacamento da superfície.

Para a remoção mecânica de torta, nos países mais desenvolvidos, são utilizados caminhões com carregamento frontal ou caminhões equipados com sistema de vácuo.

Foram realizadas experiências para remoção de água de lodos de ETAs em leitos de secagem.⁽⁷⁾ Para a realização dos ensaios foi utilizado o sistema mostrado na Figura 6.6.

O sistema foi constituído por tubos de acrílico com 150 mm de diâmetro e 500 mm de altura. Na parte inferior, a 20 mm do fundo, foi instalada uma placa acrílica perfurada, sobre a qual foi colocada uma manta de poliéster como camada suporte. Uma camada de 100 mm de areia, com granulometria variando de 0,3 a 0,5 mm e coeficiente de não-uniformidade 1,3, foi colocada sobre o meio suporte.

O drenado resultante foi recolhido em provetas e o volume medido em função do tempo. Foram aplicadas alturas de lodos de: 100, 150, 200 e 250 mm de espessura.

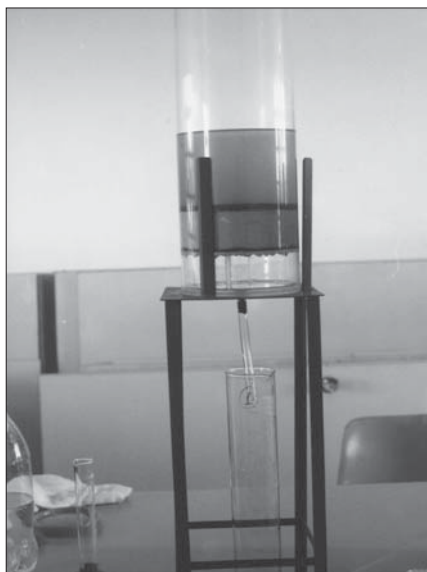


Figura 6.6 Sistema de leito de secagem.

Os ensaios foram realizados com a coleta do resíduo nos decantadores da ETA convencional que utiliza sulfato de alumínio e com descargas de fundo realizadas em intervalos de tempo próximo de 50 dias.

Após a coleta do lodo, o mesmo era conduzido ao laboratório do DECIv/UFSCar, onde os ensaios eram realizados.

Após a remoção da água e medição do tempo requerido, foram desenvolvidos gráficos como mostrado na Figura 6.7.

O ensaio 1 foi realizado com 100 mm de lodo, o ensaio 2 com 150 mm, o ensaio 3 com 200 mm e o ensaio 4 com 250 mm de lodo sobre o leito. O drenado foi coletado e foram realizadas análises para determinação de pH, sólidos, DBO, DQO. Na Tabela 6.2 são mostrados os valores obtidos para esses parâmetros.

A porcentagem de remoção no drenado atingiu 99,99% para valores de DQO, sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos.

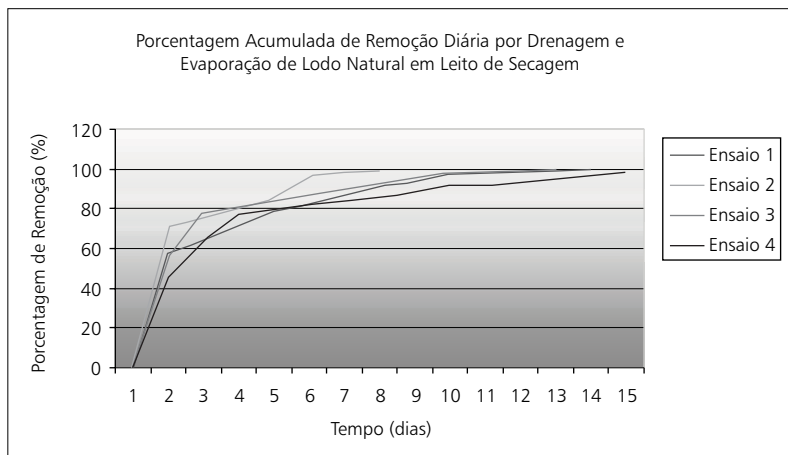


Figura 6.7 Curvas típicas obtidas em leitos de secagem piloto, utilizado para desidratação de lodo de ETA que utiliza sulfato de alumínio.

Tabela 6.2 Características do drenado nos leitos de secagem.

Altura do Lodo (mm)	pH	Cor (uC)	Turbidez (uT)	DQO (mg/L)	Sólidos Totais (mg/L)	Sólidos Fixos (mg/L)
100	7,0	200	44	71	71	1
150	7,3	150	48	24	126	99
200	7,2	50	35	24	130	107
250	7,0	75	58	20	105	75

Observação: Os dados do lodo bruto constam na Tabela 1.3 (Capítulo1).

6.4 Lagoas de Lodo

A remoção de água em lagoas de lodo é outro método que poderá ser utilizado quando o custo da terra for baixo, sendo o sistema bastante parecido ao dos leitos de secagem.

Nos EUA, as lagoas constituem-se em método bastante popular tanto para lodos de ETEs quanto para lodos de ETAs. Essas lagoas podem ser naturais ou artificiais (construídas por meio de diques ou escavações). As áreas necessárias são grandes e o custo da terra é um dos fatores essenciais na definição do método.

A desidratação ocorre em três fases: drenagem, evaporação e transpiração. Na Figura 6.8 são mostrados os mecanismos de desidratação em lagoas.

Algumas experiências têm mostrado que a drenagem é independente da profundidade da lagoa. Ressalta-se, no entanto, que a evaporação é o principal fator para a desidratação.

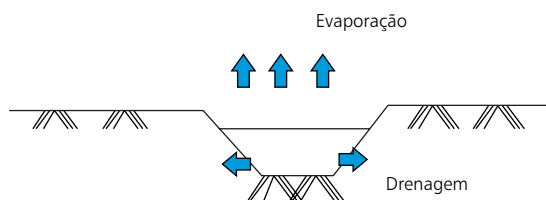


Figura 6.8 Mecanismos de desidratação em lagoas.

O projeto de lagoas de lodo inclui: sistema de tubulações de entrada de lodo e saída do decantado, sistema de bombeamento (se necessário) e equipamentos para remoção mecânica de lodo.

Recomenda-se que a profundidade das lagoas varie de 0,7 a 1,4 m, apesar de existirem lagoas que atinjam 3,0 m de profundidade.

O sobrenadante decantado pode ser removido continuamente ou de forma intermitente, podendo retornar ao sistema de tratamento. O tempo para desidratação pode variar bastante, principalmente quando são consideradas as condições climáticas.

Vários são os fatores que devem ser avaliados nos critérios de projeto, podendo ser citados: clima, permeabilidade do subsolo, características do lodo, profundidade da lagoa e área superficial. Quanto ao clima, devem ser analisados:

- precipitação – índices pluviométricos, distribuição anual e sazonal;
- temperaturas extremas;
- taxa de evaporação (média anual e flutuações anuais e sazonais).

A permeabilidade do subsolo deve possuir valores moderados, variando de $4,2 \times 10^{-4}$ a $1,4 \times 10^{-3}$ cm/s, e o fundo da lagoa deverá estar, no mínimo, 50 cm acima do nível de água do lençol freático, ou de acordo com as legislações locais.

A profundidade e a superfície necessárias para as lagoas dependem de diversos fatores, como: precipitação, evaporação, tipo de lodo, concentração e volume de sólidos. Recomenda-se que se utilize de 36 a 39 Kg de sólidos/m³, devendo ser previstas duas células, no mínimo, para facilitar a estocagem do lodo.

Os trabalhos envolvidos na operação e manutenção das lagoas, incluem: aplicação de lodo, remoção periódica do sobrenadante, remoção periódica dos sólidos e reparos no talude.

Segundo a USEPA, os tempos para operação e manutenção variam de acordo com a aplicação de sólidos, podendo ser avaliados na Tabela 6.3. As áreas ocupadas pelas lagoas podem ser duas ou três vezes maior que a dos leitos de secagem de mesma capacidade.

Tabela 6.3 Horas-homem/ano para operação e manutenção de lagoas.

Sólidos Secos Aplicados (Ton/ano)	Operação	Manutenção	Total
100	30	55	85
1.000	55	90	145
10.000	120	300	420
50.000	450	1.500	1.950

Fonte: USEPA.⁽²¹⁾

Neubauer⁽¹⁵⁾ apresentou resultados de levantamentos realizados, durante quatro meses, na Estação de Tratamento de Água de Shoremont Rochester, N.Y., que utilizava lagoa para disposição dos lodos de ETAs. Com 122 m de comprimento, 97,5 m de largura e 2,10 m de profundidade, essa lagoa possuía concentração média de sólidos de 1,7% na superfície e 14% no fundo. No sistema obteve-se remoção de 70% da DBO afluente, 99% da DQO e 99% de sólidos suspensos (SS). O efluente apresentava turbidez de 10 UT.

Segundo o autor, essa lagoa, após três anos em operação, gerou um resíduo “desidratado” que não apresentava condições de ser disposto no solo.

Na Figura 6.9 pode-se analisar as curvas de isoconcentrações, mostrando que o adensamento natural faz com que a variação de concentração de sólidos cresça da superfície para o fundo de 1,7% a 10%.

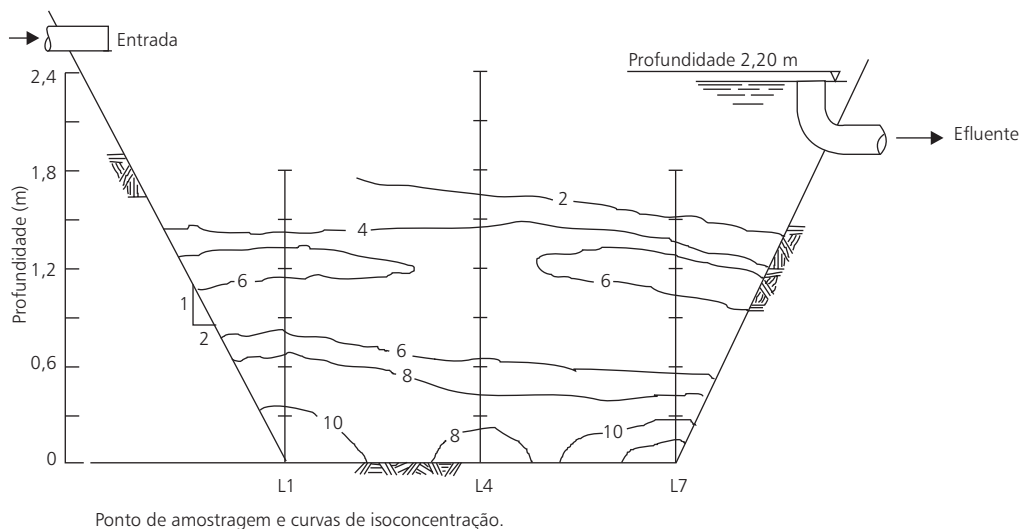


Figura 6.9 Seção da Lagoa de Shoremont.

Para essa lagoa apresenta-se os resultados de alguns parâmetros, mostrando sua eficiência.

Tabela 6.4 Características do afluente e efluente da Lagoa de Shoremont.

Características	Afluente	Efluente
DBO (mg/l)	36-77	16
DQO (mg/l)	500-1.000	5
Turbidez (UNT)	-	10
PH	7,0	7,4
ST (mg/L)	4.300	38,7
SS (mg/L)	3.612	< 0,1
SV (mg/L)	688	-

Fonte: Neubauer.⁽¹⁵⁾

Para o projeto de lagoas, devem ser tomados alguns cuidados, como:

- cerca de proteção para evitar o acesso de crianças, evitando assim, eventos danosos;
- o local de implantação deve ser estudado criteriosamente, pois há a possibilidade de proliferação de insetos e ocorrência de maus odores;
- necessidade de limpezas periódicas;
- devem ser estudadas as condições climáticas da região;
- algumas vezes pode ser economicamente viável o bombeamento de lodos até uma determinada distância para implantação da lagoa.

Levantamento realizado em 1969,⁽¹⁴⁾ em 29 agências estaduais responsáveis pelo tratamento de água, mostrou que 8 cidades utilizavam lagoas para dispor seus lodos, porém não foram revelados aspectos técnicos de construção e nem resultados do funcionamento desses sistemas.

Hubbs & Pavoni⁽¹¹⁾ analisaram o sistema de disposição de Louisville realizado em 3 lagoas de 200 m de largura, 650 m de comprimento e 5 m de profundidade com tempo de detenção de 3 dias. O sistema revelou que a camada superficial apresentava boa desidratação, o que não ocorria com as camadas inferiores. Outro problema colocado recaiu sobre o sistema de distribuição do lodo, que não permitia uma operação uniforme na lagoa.

Culp⁽⁹⁾ investigou a ETA de Somerville, New Jersey, EUA, com capacidade de 6.800 l/s, a qual duas vezes ao ano dispunha os lodos de ETAs em lagoa de 122 m de largura, 366 m de comprimento e 1,80 m de profundidade. Após 10 anos de funcionamento havia sido comprometido apenas 1,00 m da profundidade útil da lagoa. A desidratação era considerada satisfatória, o que permitia andar sobre o lodo seco.

A AWWA⁽¹²⁾ mostrou que no Japão a utilização de lagoas para lodos de ETAs era realizada em locais com grande disponibilidade de áreas.

Cornwell⁽⁸⁾ enfatizou que, dependendo da profundidade da lagoa e da porcentagem de sólidos contida no lodo, a evaporação poderia se prolongar por longos períodos, pois na camada superior havia a possibilidade da formação de crosta, não permitindo a desidratação das camadas inferiores. Outro problema que pode ocorrer é a possibilidade de poluição do lençol freático com a água drenada para o subsolo, principalmente por metais presentes no lodo.

A experiência brasileira com lagoas para remoção de água de lodos de ETAs é a desenvolvida na ETA – Alto Tietê (Taçopeba), na Região Metropolitana de São Paulo. Essa estação foi inaugurada em 1991, entrando em operação com sistema de recuperação de água de lavagem e lagoas para “desidratação” de lodos. O sistema não funcionou adequadamente em função das características do tamanho de partículas do lodo e do clima da região.

6.6 Considerações Finais

Os sistemas naturais para remoção de água livre de lodos de ETAs podem ser de grande aplicação no Brasil. Esse fato se deve principalmente pelas condições climáticas apresentadas no País. No entanto, alguns cuidados devem ser tomados.

Comparando leitos de secagem e lagoas de lodo, como mostrado na Figura 6.10, percebe-se que, no caso dos leitos de secagem, pode haver recuperação de água e reciclagem para o sistema de tratamento, com os devidos cuidados.

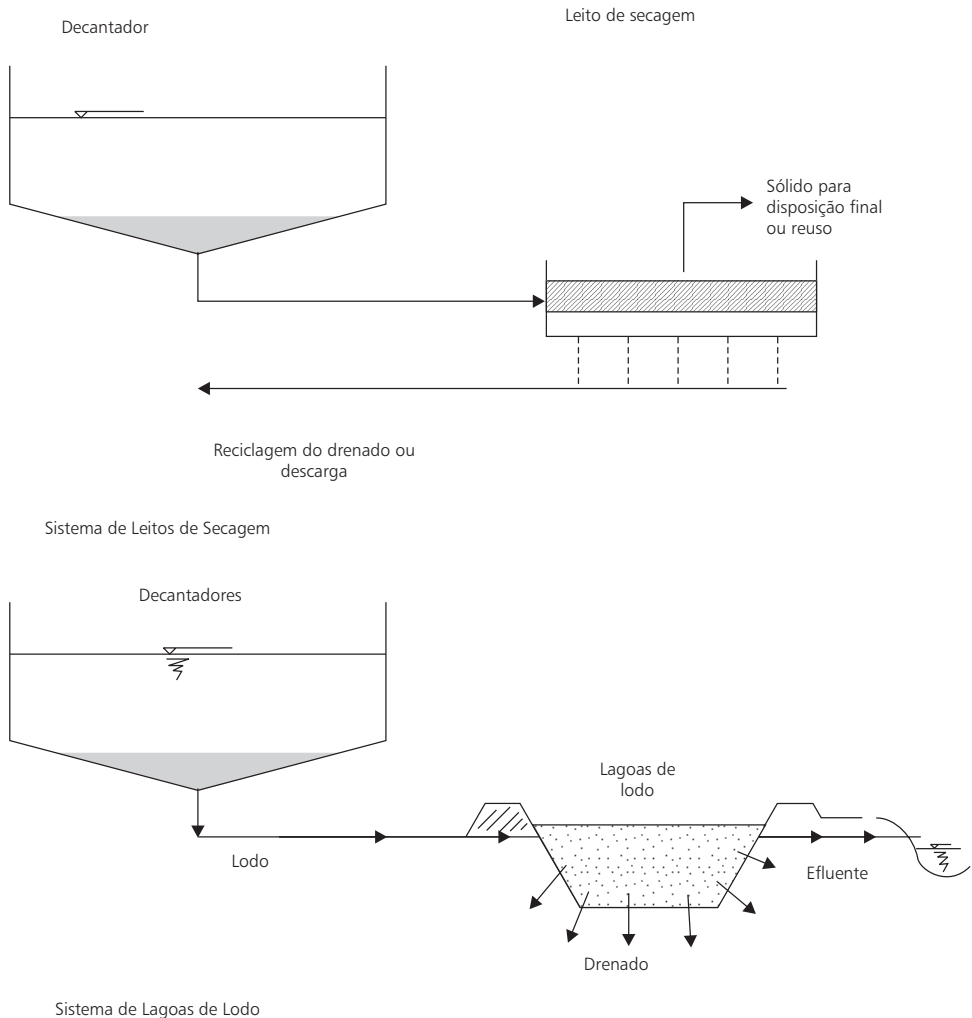


Figura 6.10 Esquemas gerais de leitos de secagem e lagoas de lodo.

As lagoas de lodo exigem maiores preocupações, pois dependem das condições do solo local e de fatores climáticos. Além disso, a recuperação da água torna-se mais difícil.

Os leitos de secagem podem ter seu desempenho melhorado através de mudanças na estrutura construtiva. Essas mudanças, hoje estudadas, poderão levar a construções de menor custo, exigindo menor área. O PROSAB, Tema 4 (edital 2), está empreendendo estudos que deverão mostrar resultados desses sistemas.

6.7 Referências Bibliográficas

1. ADRIAN, D.D.; NEBKLER, J.H. (1969). Report on current technology and costs. *Journal AWWA*, Denver, v.61, n.12, p.682-708, Dec.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). *NBR 10004 – Resíduos sólidos*. São Paulo, 63p., Setembro.
3. FABER, H.A. (1969). Report on what is know – Conference Introductory statement. *Journal AWWA*, Denver, v.61, n.16, p.542-543, Oct.
4. CORDEIRO, J.S. (1981). Disposição, tratabilidade e reuso de estações de tratamento de águas. São Carlos. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
5. CORDEIRO, J.S. (1993). *O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas*. São Carlos. 342p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
6. CORDEIRO, J.S.; CAMPOS, J.R. (1996). A remoção de águas de lodos em leitos de secagem não convencionais. *Revista Saneamento Ambiental*. Montevideú. Ano VI, n.39, p.30-35.
7. CORNWELL, D.A.; BISHOP, M.M.; GOULD, R.G. et al. (1987). *Handbook on water treatment plant wastes management*. Denver, AWWA Research Foundation, 461p.
8. CULP, G.L.; CULP, R.L. (1974). *New concepts in water purification*, New York, Van Nostrand Reinhold.
9. GRANDIN, S.R. (1992). Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água. São Paulo. 465p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
10. HUBBS, S.A.; PAVONI, J.L. (1974). Optimization of sludge dewater ability in sludge disposal lagoon. *Journal AWWA*, Denver, v.66, n.11, p.658-663, Nov.
11. AMERICAN WATER WORK ASSOCIATION – AWWA (1978). Water treatment plant sludges – Na update of the satate of the art – Commite Report – part 2. *Journal AWWA*, Denver, v.70, n.10, p.548-554, Oct.

12. KRASAUSKAS, J.M. (1969). Review of sludge disposal practices, *Journal AWWA*, Denver, v.61, n.5, p.225-230, May.
13. NEUBAUER, W.R. (1968). Waste alum sludges treatment. *Journal AWWA*, Denver, v.60, n.7, p.819-826, Jul.
14. NOVAK, J.T.; CALKINS, D.C. (1975). Sludge dewatering and its physical properties. *Journal AWWA*, Denver, v.67, n.1, p.42-45, Jan.
15. NOVAK, J.T.; MONTGOMERY, G.E. (1975). Chemical sludges dewatering on sand beds, *Journal of the Environmental Engineering Division ASCE*, New York, EE-1, n.2, p.01-13, Feb.
16. NOVAK, J.T.; LONGFORD, M. (1977). The use of polymers for improving chemical sludge dewatering on sand beds. *Journal AWWA*, Denver, v.68, n.2, p.106-110, Feb.
17. MURRAY, K.; DILLON, G. (1994). Waterworks residuals management: a comparison os US and UK pratice. *Management of water and wastewater solids for 21st century – A global perspective*, Washington, June.
20. WATER POLLUTION CONTROL FEDERATIOM – WPCF (1983). *Sludge Dewatering – Manual of Practice n.20*. Washington.
21. U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1979). *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal*. Cincinatti, EPA, 1047p.

Capítulo 7

Água de Lavagem de Filtros Rápidos

Luiz Di Bernardo, Paulo Sérgio Scalize e Aloysio Gomes de Souza Filho

7.1 Introdução

Como visto no Capítulo 1, a problemática dos resíduos líquidos gerados nas ETAs, tanto do ponto de vista quantitativo quanto qualitativo, representa um problema sério para as instituições que gerenciam tais sistemas. No presente capítulo é considerado o caso específico da água de lavagem de filtros rápidos de ETAs.

7.2 Origem e Caracterização Qualitativa e Quantitativa

Na Tabela 7.1 são apresentados dados relativos às caracterizações da água de lavagem de filtros de algumas ETAs.

Tabela 7.1 Características de águas de lavagens de filtros de ETAs. (Coagulante primário: ETAs 1 e 2 – cloreto férrico; ETAs 3 e 4 – sulfato de alumínio.)

Parâmetros	Estações de Tratamento de Água			
	ETA 1	ETA 2	ETA 3	ETA 4
Turbidez (uT)	130	171	58	76
Cor aparente (uC)	200	2690	310	400
DQO(mg/L)	40,8	52	35	48
pH	7,1	8,0	6,9	7,3
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	37	*	17	12,6
Dureza (mg/L CaCO ₃)	40,8	*	12	*
Condutividade (µS/cm)	95	*	38	37,1

Tabela 7.1 Características de águas de lavagens de filtros de ETAs. (Coagulante primário: ETAs 1 e 2 – cloreto férrico; ETAs 3 e 4 – sulfato de alumínio.) (Continuação.)

Parâmetros	Estações de Tratamento de Água			
	ETA 1	ETA 2	ETA 3	ETA 4
Sólidos totais (mg/L)	367	*	88	130
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	157	*	65	*
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	210	*	23	*
Sólidos suspensos totais (mg/L)	250	313	59	95
Sólidos Totais Fixos (mg/L)	210	230	42	*
Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	40	83	17	*
Sólidos sedimentáveis (ml/L)	74	41	3,4	8
Nitrogênio total (mg/L N)	*	*	4,0	*
Fosfato (mg/L PO ₄ ⁻³)	0,037	*	0,022	*
Carbono orgânico total (mg/L)	11,8	*	6,3	6,4
Coliformes totais (NMP/100 mL)	241920	17329	1640	1095
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	17820	20	72	3
Metais: Ferro (mg/L)	700	170	6,9	6,5
Alumínio (mg/L)	*	*	0,30	0,80
Manganês (mg/L)	2,19	1,17	0,10	0,10
Zinco (mg/L)	2,00	0,10	0,64	*
Cobre (mg/L)	0,35	0,84	0,06	*
Chumbo (mg/L)	0,58	ND	ND	*
Níquel (mg/L)	0,35	ND	ND	*
Cromo (mg/L)	0,09	ND	ND	*
Cádmio (mg/L)	0,01	ND	ND	*
Cálcio (mg/L)	95,6	*	*	*
Magnésio (mg/L)	22,8	*	*	*

ND = não detectado; (*) não pesquisado.

7.3 Importância e Influência do Tipo de Operação da Filtração

A lavagem dos filtros pode ser efetuada de diversas maneiras, podendo gerar maior ou menor volume de resíduos líquidos. Na Tabela 7.2 são apresentados os tipos de lavagem empregados nas ETAs em estudo. A lavagem dos filtros apenas com água no sentido ascensional concorre para a geração de um volume maior de água quando comparado ao sistema que possui lavagem auxiliar com ar, seguida da lavagem com água ascensional.

Tabela 7.2 Características do sistema de lavagem, método de filtração e coagulantes primários usados nas ETAs da Tabela 7.1.

ETA	Lavagem	Método	Coagulante
ETA 1	Insuflação de ar, seguida da lavagem com água no sentido ascensional	Filtração com taxa declinante	Cloreto férrico
ETA 2	Insuflação de ar, seguida da lavagem com água no sentido ascensional	Filtração com taxa declinante	Cloreto férrico
ETA 3	Lavagem com água no sentido ascensional	Filtração com taxa constante	Sulfato de alumínio
ETA 4	Lavagem com água no sentido ascensional	Filtração direta ascendente com taxa constante	Sulfato de alumínio

A tecnologia de tratamento depende da qualidade da água bruta, tendo influência na quantidade e qualidade de resíduos líquidos gerados durante as lavagens dos filtros. O sistema de filtração direta requer menor quantidade de coagulante, pois a coagulação é realizada no mecanismo de adsorção-neutralização de cargas, não havendo necessidade de produção de flocos para posterior sedimentação. No caso da filtração direta tem-se a retenção de partículas primárias ou de pequenos flocos destas, enquanto na filtração de água decantada tem-se a retenção de fragmentos de flocos, principalmente. Evidentemente, o comportamento da filtração é diferente, assim como resultam diferentes as características do resíduo líquido gerado nas lavagens dos filtros. Assim sendo, as ETAs em ciclo completo possuem unidades de mistura rápida, floculação, decantação e filtração, enquanto as de filtração direta possuem, em geral, unidades de mistura rápida e de filtração.

Os filtros da ETA 3 (ciclo completo) funcionam com taxa e nível constantes (com regulador de vazão) e, devido à falta de um reservatório de água que permita a lavagem de um filtro de acordo com a perda de carga no decorrer de seu funcionamento, efetua-se a lavagem seqüencial de todos os filtros no período noturno (geralmente entre 22 e 24 horas), quando o consumo na cidade é menor. Isso representa, em um determinado período de tempo (1 semana, 1 mês ou 1 ano), maior quantidade de água para lavagem dos filtros e, conseqüentemente, maior volume de resíduos líquidos, pois são lavados filtros que poderiam operar por mais tempo, ou seja, não é necessário lavá-los todos de uma única vez diariamente. A filtração nas ETAs 1 e 2 é realizada segundo o método de taxa declinante variável, no entanto, por problemas relacionados aos turnos dos operadores, tem-se a lavagem do filtro mais sujo da bateria por turno, independentemente da ocorrência do nível máximo de água no canal comum de alimentação dos filtros. Com isso, o volume de água utilizado para lavagens em um período de tempo determinado resulta maior, concorrendo para a geração de um volume maior dos resíduos líquidos. A ETA 4 é do tipo de filtração direta ascendente com taxa aproximadamente

constante, sendo a lavagem (somente com água no sentido ascensional) determinada pela perda de carga no meio granular.

O tipo de coagulante empregado tem influência direta na quantidade de resíduos líquidos gerados durante as lavagens dos filtros. Quando é empregado cloreto férrico em comparação ao sulfato de alumínio, a duração das carreiras de filtração pode resultar mais longa, dependendo das características da água bruta, pois a água decantada pode apresentar-se com menor quantidade de sólidos e, com isso, diminuir o número de lavagens e gerar menor volume de resíduos líquidos em um mesmo período de tempo.

7.4 Tratamento do Resíduo Líquido e Reuso da Fase Clarificada

Por razões técnicas e ambientais, os resíduos líquidos gerados nas ETAs devem ser adequadamente tratados, sendo necessário o conhecimento de sua composição, dos processos ou operações para redução de volume e das alternativas de disposição final do lodo. Em ETAs de ciclo completo, uma alternativa que pode ser usada é a de coletar, homogeneizar e recircular (de forma regularizada) a água de lavagem dos filtros para o início da ETA, de modo que somente são tratados os resíduos líquidos provenientes dos decantadores. Evidentemente, essa forma de gerenciar o sistema de tratamento dos resíduos líquidos merece atenção especial, tendo em vista a qualidade microbiológica da água de lavagem dos filtros. Já em ETAs de filtração direta, essa alternativa pode afetar seriamente a qualidade da água afluyente aos filtros e inviabilizar o emprego dessa tecnologia de tratamento.

Devido à escassez crescente de mananciais em condições adequadas para utilização de sua água, há interesse na clarificação da água de lavagem de filtros para futuro reaproveitamento do sobrenadante e disposição apropriada do sedimento. Scalize⁽¹⁴⁾ verificou que a fração de água tratada utilizada nas lavagens de filtros da ETA 3 era da ordem de 1,5%. Segundo a Sabesp,⁽¹³⁾ a perda na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), nas descargas de decantadores e lavagens de filtros, era de aproximadamente 4% do volume diário de água tratada, suficiente para abastecer uma população da ordem de 400 mil habitantes. Souza Filho⁽¹⁵⁾ constatou que a fração do volume diário de água tratado, usado nas lavagens dos filtros da ETA 1, era da ordem de 0,86%. Segundo Di Bernardo et al.,⁽⁹⁾ o volume de água usado nas lavagens pode chegar a 5 % do volume diário de água tratada na ETA 4, valor significativo diante da escassez de água e da qualidade insatisfatória de muitos cursos d'água.

Visando melhorar este quadro, devem ser estudadas soluções racionais para esses problemas em cada ETA. O sistema de tratamento e disposição dos resíduos deve ser compatível com as condições locais, ressaltando-se a situação financeira, a localização,

a disponibilidade de área, a existência de mão-de-obra qualificada para operação e manutenção, a quantidade de lodo produzido, a qualidade da água bruta etc.

Em cada ETA, o método de tratamento dos resíduos e a forma empregada para disposição do lodo deve se basear em estudo de alternativas viáveis do ponto de vista técnico e econômico, além de se considerar a sustentabilidade da solução adotada. Uma escolha adequada deve levar em conta a quantidade e características dos resíduos líquidos, a disponibilidade de área, as características dos mananciais próximos às ETAs, os custos de implantação e operação envolvidos. A alternativa encontrada para uma determinada ETA não pode ser aplicada indiscriminadamente em outras, pois as características dos resíduos variam consideravelmente.

Antes de iniciar o tratamento dos resíduos gerados nas ETAs, deve-se fazer um estudo com a finalidade de reduzir a quantidade dos resíduos, como, por exemplo, mudanças do tipo de coagulante, do sistema de lavagem dos filtros e outras que só serão visualizadas após o conhecimento do funcionamento da ETA. Pode ser incluído, ainda, neste item, a automatização da ETA, que terá por finalidade controlar seu funcionamento, diminuindo os resíduos gerados, pois a adição dos produtos químicos, bem como as descargas de decantadores, lavagens de filtros e outras funções, poderão ser controlados com maior precisão.

As tecnologias utilizadas para o tratamento dos resíduos resumem-se basicamente na separação das fases líquida e sólida, aumentando a concentração dos sólidos no material sedimentado por clarificação/adensamento e desidratação, de maneira que o reuso do sobrenadante e a disposição final do material sedimentado sejam possíveis. O grau de tratamento necessário depende diretamente do método de disposição do lodo a ser utilizado e da qualidade desejada para a parcela líquida recirculada, pois os resíduos apresentam grande quantidade de água que pode ser retirada antes da disposição final do lodo.

Nas Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 são apresentados esquemas gerais das alternativas geralmente consideradas visando ao reuso dos resíduos líquidos gerados nas ETAs. No esquema da Figura 7.1, tem-se um tanque de recepção e homogeneização da água de lavagem dos filtros, a qual é recirculada para o início da ETA. Evidentemente, nem todas as impurezas presentes na água de lavagem dos filtros serão removidas nos decantadores, de forma que poderá ser necessário o descarte eventual da água de lavagem dos filtros, que será conduzida ao tanque de recepção dos resíduos gerais da ETA. No esquema da Figura 7.2, a água de lavagem dos filtros é coletada em um tanque e conduzida a uma unidade de clarificação/adensamento, sendo o sedimento conduzido ao tanque de recepção das descargas dos decantadores e o sobrenadante recirculado ao início da ETA. No esquema da Figura 7.3, todos os resíduos líquidos gerados na ETA são conduzidos para um tanque de recepção para regularização de vazão e homogeneização. Em seguida, tem-se a clarificação e adensamento, resultando no lodo,

que vai para tratamento subsequente, e no sobrenadante, que é recirculado para o início da ETA. Note que, neste caso, a descarga dos decantadores é semicontínua, diferentemente dos casos dos esquemas mostrados nas Figuras 7.1 e 7.2, nos quais a limpeza dos decantadores pode ser periódica.

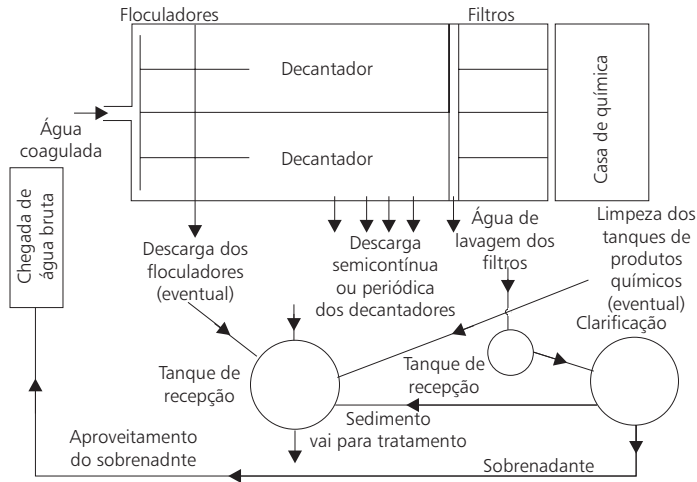


Figura 7.1 Recirculação da água de lavagem de filtros após homogeneização e regularização de vazão.

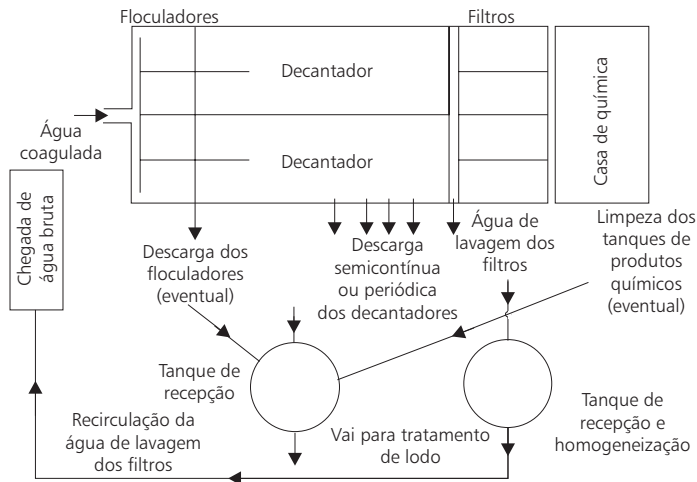


Figura 7.2 Recirculação do sobrenadante da água de lavagem de filtros após clarificação.

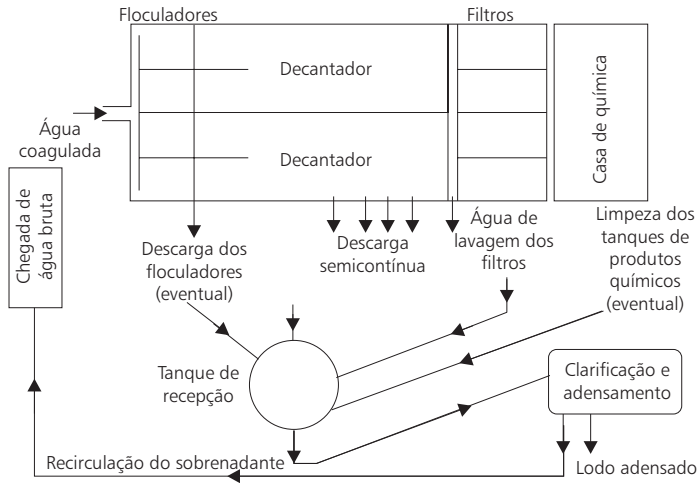


Figura 7.3 Recirculação do sobrenadante da água de lavagem de filtros e descargas dos decantadores após clarificação.

Condicionamento/Adensamento dos Resíduos Líquidos das ETAs

Geralmente, o condicionamento dos resíduos líquidos e o adensamento do lodo são realizados antes da desidratação mecânica, mas podem ser realizados antecedendo outros processos. Os resíduos decorrentes das lavagens de filtros apresentam concentrações baixas de sólidos totais, geralmente entre 100 e 500 mg/L, tornando importante seu condicionamento e o adensamento do lodo resultante. Segundo Cornwell et al.,⁽⁶⁾ a clarificação e o adensamento por gravidade dos resíduos resultantes, tanto da limpeza de decantadores como da lavagem de filtros, geralmente tem resultado em uma concentração de sólidos totais final de 1.000 a 3.000 mg/L no lodo, para taxa de carga hidráulica superficial de aproximadamente 20 Kg/m²/dia. Scalize,⁽¹⁴⁾ utilizando polímero aniônico para clarificação, por sedimentação, da água de lavagem de filtros da ETA 3, encontrou valores de resistência específica da ordem de $3,0 \times 10^{12}$ m/Kg para o sedimento proveniente da água de lavagem dos filtros (ETA que utiliza sulfato de alumínio como coagulante) e, Souza Filho,⁽¹⁵⁾ utilizando o mesmo polímero, encontrou valores da ordem de $10,0 \times 10^{12}$ m/Kg para o sedimento proveniente de água de lavagem dos filtros da ETA 1 (que utiliza cloreto férrico como coagulante). Di Bernardo et al.,⁽⁹⁾ estudando a água de lavagem dos filtros da ETA 4 (filtração direta ascendente), obtiveram valores de resistência específica para o sedimento proveniente do ensaio, sem uso de polímero para clarificação, da ordem de 30×10^{12} m/Kg, e quando empregado polímero aniônico, de 5×10^{12} m/Kg, mostrando uma maior eficiência quando utilizado polímero como condicionante.

São vários os fatores que dificultam a remoção de água do lodo. As partículas de lodo são carregadas eletricamente e tendem a se repelir em vez de formar flocos. Além disso, devido à hidratação, as partículas podem formar uma película líquida carregada negativamente que impede a aproximação das mesmas para que se aglutinem. Por outro lado, o lodo está sujeito à agitação durante seu processamento que pode reduzir o tamanho médio dos flocos e, conseqüentemente, aumentar a área superficial das partículas, impondo maior resistência à separação das fases sólida e líquida. Os polímeros empregados podem ser natural (amídeos em geral) ou sintético, e dependendo da carga elétrica que possui em solução aquosa, são classificados como catiônicos, aniônicos ou não-iônicos. Sendo os polímeros solúveis em água, a viscosidade resultante da solução depende do peso molecular e da carga iônica do mesmo. Os polímeros podem ser usados na clarificação e adensamento por gravidade e por flotação (conforme foi visto no Capítulo 3), os quais aderem às superfícies das partículas causando a dessorção de água superficial quimicamente ligada a elas, a neutralização da carga e a aglomeração entre pequenas partículas. Como resultado, o lodo produzido é mais facilmente desidratado. O tipo de polímero a ser empregado depende do pH do resíduo, sendo que, geralmente, os catiônicos funcionam melhor em valores de pH abaixo de 7,0 e os não-iônicos e aniônicos, em geral, funcionam satisfatoriamente em valores de pH entre 6,5 e 8,5. Com pH acima de 8,5, o polímero recomendado seria o aniônico. Para melhorar os resultados com o uso de polímeros, tem-se empregado cal antes da adição dos mesmos. De acordo com ASCE & AWWA,⁽¹⁾ os polímeros usados com mais sucesso na desidratação de lodo de ETAs são os aniônicos de alto peso molecular. Segundo Scalize⁽¹⁴⁾ e Souza Filho,⁽¹⁵⁾ o polímero aniônico foi o mais indicado para clarificação da água de lavagem de filtro, sendo de 24 e 10 g polímero/Kg de SST, respectivamente, as dosagens encontradas para resíduos provenientes de ETAs que utilizam sulfato de alumínio e cloreto férrico. É recomendável a execução de ensaios visando à determinação do melhor tipo de polímero e sua dosagem, pois é muito difícil generalizar os dados obtidos nas ETAs mencionadas na Tabela 7.2.

A clarificação da água de lavagem de filtros possibilita a recirculação do sobrenadante na câmara de chegada de água bruta da ETA. É imprescindível o monitoramento microbiológico do sobrenadante, pois este pode contribuir para um aumento significativo no número de microrganismos na água a ser tratada. Dependendo da qualidade microbiológica da água bruta, a pré-desinfecção do sobrenadante pode ser necessária antes de ser misturado à água bruta.

Recirculação Água de Lavagem dos Filtros

Segundo Souza Filho,⁽¹⁵⁾ a água de lavagem dos filtros pode retornar à câmara de chegada de água bruta para ser misturada com a mesma, sem ou com sua clarificação, nas ETAs com tecnologia de tratamento em ciclo completo. Como o volume de água de lavagem gerado é variável e depende da qualidade da água bruta, da eficiência dos decantadores e das condições de operação e manutenção, é essencial que se tenha um tanque de recepção dos resíduos líquidos para promover sua equalização e que possibilite

regularizar a vazão de retorno, no máximo igual a 10% da vazão de água bruta. A recirculação poderá ser integral ou não, ou seja, sem ou com um processo de clarificação por sedimentação ou flotação, sem ou com adição de condicionante.

Scalizer⁽¹⁴⁾ relata que, após clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros, utilizando polímero aniônico, ocorreu diminuição considerável dos valores de vários parâmetros no sobrenadante (concentração de sólidos suspensos totais, cor aparente, turbidez, número de coliformes totais e de *Escherichia coli*, DQO e alguns parasitas). Portanto, o líquido clarificado pode ser recirculado à entrada da ETA ou ser lançado sem problemas em alguns cursos d'água ou na rede coletora de esgoto, desde que não ocorram problemas de escoamento e não prejudique o funcionamento do sistema de tratamento dos esgotos (quando existe).

A recirculação do sobrenadante pode comprometer o funcionamento da ETA ou prejudicar a qualidade da água final, pela presença dos sólidos suspensos totais ou microrganismos indesejáveis como cistos de *Giardia* e *Cryptosporidium*, de metais como manganês e ferro, de carbono orgânico total, de precursores dos trihalometanos e substâncias que conferem sabor e odor.⁽⁷⁾ Então, para cada tipo de água deve-se estudar os possíveis métodos a serem empregados, levando em consideração a eficiência do sistema, o que poderá ser feito em relação à remoção de sólidos suspensos totais.

No Brasil, algumas ETAs realizam a recirculação da água de lavagem de filtros sem qualquer tipo de tratamento, destacando-se a ETA Guaraú e Alto da Boa Vista da cidade de São Paulo, ambas responsáveis pelo abastecimento de água da maior parte da RMSP, com capacidade para 33,0 e 11,0 m³/s, respectivamente, conforme Ferreira Filho.⁽¹⁰⁾ O autor relata ainda que esse reaproveitamento da água de lavagem reduz, além das perdas, a dosagem de sulfato de alumínio, pois tais ETAs são do tipo ciclo completo. Outro exemplo, relatado por Barbosa,⁽²⁾ refere-se ao reaproveitamento de água de lavagem dos filtros após clarificação da ETA Rio Descoberto, na cidade de Brasília, DF. Os resultados obtidos indicaram uma excelente tratabilidade da água de lavagem dos filtros, sem o comprometimento do desempenho da ETA. A autora recomenda estudos para verificar a viabilidade de esse sobrenadante ser utilizado na preparação e lavagens dos tanques de soluções, irrigação de áreas próximas à ETA etc., representando uma economia nos gastos.

Destinação do Lodo Resultante

Lodos produzidos em ETAs que utilizam sulfato de alumínio exigem cuidado especial, pois segundo Cornwell et al.,⁽⁶⁾ os aterros de resíduos sólidos são anaeróbios e produzem ácidos voláteis, sendo que o pH na faixa de 5 a 5,5 permite a dissolução do alumínio e outros metais. Segundo a NBR 10.004, os lodos gerados em ETAs são classificados como resíduos sólidos, devendo, portanto, ser devidamente tratados e dispostos sem que provoquem danos ao meio ambiente. Na Tabela 7.3 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização do lodo de duas ETAs, uma que utiliza cloreto férrico (ETA 2) e outra com sulfato de alumínio (ETA 4).

Tabela 7.3 Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização, realizados nos sedimentos obtidos dos ensaios de clarificação, por sedimentação, dos resíduos líquidos da ETA 2 e da ETA 4.

Poluente	Lixiviação			Solubilização		
	Limite máximo no extrato (mg/L)	Resultado (mg/L)		Limite máximo no extrato (mg/L)	Resultado (mg/L)	
		ETA 2	ETA 4		ETA 2	ETA 4
Arsênio	5,0	NR	NR	0,05	NR	NR
Bário	100,0	NR	2,0	1,0	NR	4,0
Cádmio	0,05	ND	ND	0,005	ND	ND
Chumbo	5,0	ND	ND	0,05	ND	ND
Cianeto	-	-	-	0,1	NR	0,003
Fenol	-	-	-	0,001	NR	NR
Nitrato	-	-	-	10,0	NR	6,0
Cromo total	5,0	ND	ND	0,05	ND	ND
Fluoreto	150,0	NR	0,04	1,5	NR	0,38
Mercurio	0,1	NR	NR	0,001	NR	NR
Prata	5,0	NR	ND	0,05	NR	0,03
Selênio	1,0	NR	NR	0,01	NR	NR
Aldrin	0,003	NR		$3,0 \times 10^{-5}$	NR	
DDT	0,1	NR		$1,0 \times 10^{-4}$	NR	
Dieldrin	0,003	NR		$3,0 \times 10^{-4}$	NR	
Endrin	0,02	NR		$2,0 \times 10^{-4}$	NR	
Epóxi-heptacloro	0,01	NR		$1,0 \times 10^{-4}$	NR	
Heptacloro	0,01	NR		$1,0 \times 10^{-4}$	NR	
Hexaclorobenzeno	0,001	NR		$1,0 \times 10^{-4}$	NR	
Lindano	0,3	NR		$3,0 \times 10^{-4}$	NR	
Pentaclorofenol	1,0	NR		0,01	NR	
Alumínio	-	4,9	-	0,2	2,8	ND
Cloreto	-	-	-	250,0	-	32,4
Cobre	-	0,05	0,14	1,0	0,22	0,03
Dureza	-	-	-	500,0	-	254
Ferro	-	0,02	0,01	0,3	28,0	0,25
Manganês	-	0,4	2,24	0,1	140,0	0,12
Sódio	-	-	-	200,0	-	15,6
Surfactantes	-	-	-	0,2	-	NR
Sulfato	-	-	-	400,0	-	3,0
Zinco	-		0,19	5,0		0,01

ND: Não detectado. NR: Não realizado.

Conforme relatado por Barbosa,⁽²⁾ no sistema de reaproveitamento de água de lavagem dos filtros após clarificação, na ETA Rio Descoberto (Brasília, DF), o lodo resultante, após homogeneização, adensamento por gravidade e desidratação por meio de centrífugas, também denominado torta, é conduzido para um aterro sanitário, projetado e construído para tratamento dos resíduos sólidos domésticos.

7.5 Ensaios de Laboratório e Exemplos

A seguir são apresentados estudos de ensaios de clarificação, por sedimentação, realizados por Scalize⁽¹⁴⁾ e Souza Filho,⁽¹⁵⁾ tendo o primeiro estudado a água de lavagem da ETA 3 e o segundo, da ETA 1. Os resultados das caracterizações das amostras da água de lavagem de filtros, bem como dos sobrenadantes e sedimentos, obtidos como produtos finais dos ensaios de clarificação, encontram-se nas Tabelas 7.4, 7.5 e 7.6.

Tabela 7.4 Características das amostras utilizadas nos ensaios de clarificação, por sedimentação, da água de lavagem de filtro proveniente da ETA 3.⁽¹⁴⁾

Parâmetro	Amostras		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Turbidez (uT)	60	149	232
Cor aparente (uC)	290	680	1400
DQO (mg/L)	14	33	62
pH	6,9	6,9	6,9
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	15	22	17
Dureza (mg/L CaCO ₃)	12	13	11
Condutividade (µS/cm)	32	35	48
Sólidos totais (mg/L)	88	192	286
Fixos (mg/L)	72	124	232
Voláteis (mg/L)	16	68	76
Sólidos suspensos totais (mg/L)	58	156	248
Fixos (mg/L)	44	112	200
Voláteis (mg/L)	14	44	48
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	30	38	38
Fixos (mg/L)	28	12	32
Voláteis (mg/L)	2	24	28
Sólidos sedimentáveis (ml/L)	2,6	17	29
Nitrogênio total (mg/L N)	10	10	10
Fosfato (mg/L PO ₄ ⁻³)	0,036	0,040	0,055

Tabela 7.4 Características das amostras utilizadas nos ensaios de clarificação, por sedimentação, da água de lavagem de filtro proveniente da ETA 3.⁽¹⁴⁾ (Continuação.)

Parâmetro	Amostras		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
COT (mg/L)	10,4	9,6	14,2
Coliformes totais (NMP/100 mL)	1890	2880	3440
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	84	145	453
Parasitológico:			
Cisto de <i>Entamoeba coli</i>	+	+	+
Larva de <i>Strongyloides stercoralis</i>	+	+	+
Larva de <i>Ancylostomatidae</i>	ND	+	+
Ovo de <i>Hymenolepis nana</i>	ND	ND	ND
Ovo de <i>Ancylostomidae</i>	+	ND	+
Metais (mg/L):			
Ferro	4,62	21,12	30,12
Alumínio	2,60	3,80	4,40
Manganês	0,08	0,30	0,34
Zinco	1,84	0,92	0,72
Níquel	0,12	ND	ND
Cobre	0,16	0,02	0,02
Cromo	ND	ND	ND
Chumbo	ND	ND	ND

ND = não detectado; (+) positivo.

Na ETA 2 foram realizados ensaios de tratabilidade dos resíduos líquidos (água de lavagem de filtros + descarga de decantadores), simulando-se a recirculação da água de lavagem dos filtros somente após regularização de vazão. Isso foi feito por meio de ensaio de clarificação/adensamento por gravidade da água de lavagem dos filtros e mistura do sedimento resultante ao resíduo líquido proveniente das descargas dos decantadores, mantendo-se a proporção entre os volumes de água de lavagem de filtros e de descargas de decantadores. Nessas condições, a ETA 3, no futuro, deverá reaproveitar integralmente a água de lavagem dos filtros, com o lodo gerado retirado somente nos decantadores. A caracterização das amostras compostas dos resíduos líquidos foi efetuada segundo os parâmetros contidos na Tabela 7.7.

Tabela 7.5 Características dos sobrenadantes e sedimentos obtidos nos ensaios de clarificação, por sedimentação, da água de lavagem de filtro proveniente da ETA 3.^(1,4)

Parâmetros	Sedimento						Sobrenadante			
	1		2		3		1		2	
	Sem poli	Com poli	Sem poli	Com poli	Sem poli	Com poli	Sem poli	Com poli	Sem poli	Com poli
Turbidez (uT)	*	*	*	*	*	*	30,7	8,97	40,8	8,12
DQO (mg/L)	*	*	*	*	*	*	12	4	22	4
pH	*	*	*	*	*	*	6,9	6,9	6,9	6,9
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	*	*	*	*	*	*	18	14	17	15
Dureza (mg/L CaCO ₃)	*	*	*	*	*	*	13	8	14	9
Condutividade (µS/cm)	*	*	*	*	*	*	38	22	40	26
Sólidos suspensos totais (mg/L)	5,20	7,70	8,70	10,60	5,92	12,67	34	16	28	14
Fixos (mg/L)	3,53	5,73	6,22	8,03	4,58	9,43	26	10	20	4
Voláteis (mg/L)	1,67	1,97	2,48	2,57	1,34	3,24	8	4	8	10
Resistência específica (x 10 ¹² m/Kg)	13,73	3,97	7,74	2,97	36,79	2,80	*	*	*	*
Distribuição granulométrica - Tamanho médio (µm)	*	7,8	*	7,0	*	1,3	*	*	*	*
Densidade (g/cm ³)	*	2,0	*	2,0	*	2,0	*	*	*	*
Nitrogênio (mg/L N)	*	*	*	*	*	*	8,0	5,0	5,5	4,2
Fosfato (mg/L PO ₄ ⁻³)	*	*	*	*	*	*	0,024	0,018	0,031	0,020
COT (mg/L)	*	*	*	*	*	*	8,321	3,327	6,286	4,045
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	*	*	*	*	*	*	612	200	741	324

* Não pesquisado.

Tabela 7.5 Características dos sobrenadantes e sedimentos obtidos nos ensaios de clarificação, por sedimentação, da água de lavagem de filtro proveniente da ETA 3.⁽¹⁴⁾ (Continuação.)

Parâmetros	Sedimento						Sobrenadante			
	1		2		3		1		2	
	Sem poli	Com poli	Sem poli	Com poli	Sem poli	Com poli	Sem poli	Com poli	Sem poli	Com poli
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	*	*	*	*	*	*	24	3	42	11
Parasitológico:										
Cisto de <i>Entamoeba coli</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Larva de <i>Strongyloides stercoralis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Larva de <i>Ancylostomatidae</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ovo de <i>Hymenolepis nana</i>	ND	ND	ND	ND	+	+	ND	ND	ND	ND
Ovo de <i>Ancylostomatidae</i>	+	+	+	+	+	+	+	ND	+	ND
Metais (mg/L):										
Ferro	910,00	1223,0	1104,0	1452,0	1210,0	1568,0	2,2	1,05	4,46	0,46
Alumínio	126,93	137,80	204,15	222,14	218,01	247,45	0,12	0,02	0,26	0,02
Manganês	10,0	18,14	14,20	22,30	16,40	29,63	0,04	ND	0,12	ND
Zinco	7,60	8,60	8,87	10,20	12,02	14,30	0,68	0,07	0,12	0,02
Níquel	0,21	0,32	0,32	0,38	0,51	0,59	ND	ND	ND	ND
Cobre	1,67	1,86	1,40	2,08	1,37	2,62	0,03	ND	ND	ND
Cromo	0,30	0,41	0,38	0,46	0,36	0,54	ND	ND	ND	ND

ND = não detectado; (+) positivo; (-) negativo; (*) não pesquisado. *Observação:* Pb e Cd não foram detectados nos sobrenadantes sedimentos. poli: polímero aniônico com dosagem de 5 g/kg de SST.

Tabela 7.6 Características dos sobrenadantes e sedimentos obtidos nos ensaios de clarificação, por sedimentação, da água de lavagem de filtro proveniente da ETA1.⁽¹⁵⁾

Parâmetros	Água de Lavagem de Filtro	Sedimento		Sobrenadante	
		Sem poli	Com poli	Sem poli	Com poli
Turbidez (uT)	130	*	*	3,7	0,87
pH	7,1	6,9	6,9	7,0	7,1
Cor aparente (uC)	2000	*	*	*	*
DQO (mg/L)	40,8	389	491	11,7	19,6
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	37	173,6	182	25,8	25,8
Condutividade (µS/cm)	95	*	*	78,2	80,1
Sólidos totais (mg/L)	367	2926	3616	*	*
Sólidos suspensos totais (mg/L)	250	2802	3284	5	1
Resistência específica (x 10 ¹² m/Kg)	*	2,32E+13	1,08E+13	*	*
Fosfato (mg/L PO ₄ ⁻³)	0,037	0,039	0,070	0,014	0,10
COT (mg/L)	11,8	12,0	11,9	10,5	12,1
Coliformes totais (NMP/100 mL)	241920	1413600	*	1413,6	410,6
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	17820	125900	*	172,2	17,3
Parasitológico:					
Cisto de <i>Entamoeba coli</i>	ND	ND	ND	ND	ND
Larva de <i>Strongyloides stercoralis</i>	ND	ND	ND	ND	ND
Larva de <i>Ancylostomatidae</i>	ND	ND	ND	ND	ND
Ovo de <i>Hymenolepis nana</i>	ND	ND	ND	ND	ND
Ovo de <i>Ancylostomadiae</i>	ND	ND	ND	ND	ND
Metais:					
Ferro (mg/L)	700	2600	2300	1,62	0,10
Manganês (mg/L)	2,19	4,8	4,6	0,02	0,02
Zinco (mg/L)	2,00	2,7	2,2	ND	ND
Níquel ((mg/L)	0,35	0,46	0,51	ND	ND
Cobre (mg/L)	0,35	2,23	1,07	ND	ND
Cromo(mg/L)	0,09	0,40	0,31	ND	ND
Chumbo (mg/L)	0,58	1,00	0,85	ND	ND
Cálcio (mg/L)	22,8	115	123	0,83	0,82
Magnésio (mg/L)	22,8	65,0	36,6	0,68	0,75
Cádmio (mg/L)	0,01	0,02	0,02	ND	ND

ND = não detectado; (*) não pesquisado; poli: polímero aniônico com dosagem de 1,5 g/kg SST.

Tabela 7.7 Caracterização das amostras de água de lavagem de filtro (ALF), da descarga dos decantadores, do sedimento da ALF e da mistura formada pelo sedimento da ALF e descarga dos decantadores utilizados nos ensaios.^(1,2)

Parâmetro	Água de lavagem de filtro (ALF)	Descarga decantador (DD)	Sedimento ALF	Mistura: sedimento ALF + DD
Turbidez (uT)	207	*	*	*
pH	7,5	8,3	8,5	8,5
Cor aparente (uC)	2264	*	*	*
Sólidos suspensos totais (mg/L)	272	9180	11330	9240
Sólidos suspensos totais fixos (mg/L)	224	8060	9700	8040
Sólidos suspensos totais voláteis (mg/L)	48	1120	1630	1200
Sólidos Sedimentáveis (ml/L) - (2 h)	27	*	*	370
Coliformes totais (NMP/100 mL)	*	*	*	344800
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	*	*	*	200
DQO (mg/L)	45	1670	1640	840
Metais: Ferro (mg/L)	-	-	-	660,00
Manganês (mg/L)	-	-	-	3,14
Cobre (mg/L)	-	-	-	2,00
Zinco (mg/L)	-	-	-	2,00
Chumbo (mg/L)	-	-	-	0,13
Níquel (mg/L)	-	-	-	0,14
Cromo (mg/L)	-	-	-	0,58
Cádmio (mg/L)	-	-	-	ND
Bário (mg/L)	-	-	-	ND

ND = não detectado.

* = não pesquisado.

Com a amostra de estudo (sedimento da água de lavagem dos filtros – ALF, misturada com amostra da descarga dos decantadores – DD), apresentando 9,24 g SST/L, foram realizados ensaios de clarificação e adensamento por gravidade, com e sem uso de polímero aniônico, nas dosagens de 1,0, 2,5 e 5,0 mg de polímero/g de SST da amostra. Na Figura 7.4 é ilustrada, em função do tempo de sedimentação, a interface de clarificação em coluna de sedimentação, da amostra de descarga dos decantadores e da amostra de estudo (sedimento da ALF + DD) com dosagens de polímero de zero, 1, 2,5 e 5,0 mg de polímero/g SST. Como foi visto no Capítulo 3, em função dos dados apresentados na Figura 7.4, poderá ser determinada a área para

clarificação (sobrenadante com características previamente fixadas) e para adensamento (lodo com concentração fixada), devendo ser adotada aquela que resultar maior. Na Figura 7.5 são mostradas fotos do adensamento da amostra do sedimento da ALF+DD, no início e final do ensaio.

Paralelamente aos ensaios em coluna de sedimentação, foram executados ensaios em Cone Imhoff, tendo resultado as curvas do teor de sólidos sedimentáveis mostradas na Figura 7.6. Após ensaios de clarificação e adensamento foram obtidos os sobrenadantes e os sedimentos, os quais foram caracterizados segundo os parâmetros das Tabelas 7.8 e 7.9

Tabela 7.8 Caracterização dos sobrenadantes obtidos nos ensaios de clarificação, sem e com emprego de polímero aniônico nas dosagens de 1,0, 2,5 e 5,0 mg polímero/g SST.⁽¹²⁾

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Dosagens do polímero aniônico empregado na clarificação (mg polímero/g SST)	0,0	1,0	2,5	5,0
Turbidez (uT)	34,5	6,90	7,43	15,10
pH	7,8	7,7	7,5	7,5
Cor aparente (uC)	292	55	59	102
Sólidos suspensos totais (mg/L)	20	1	6	8
Sólidos suspensos totais fixos (mg/L)	18	1	5	6
Sólidos suspensos totais voláteis (mg/L)	2	0	1	2
Coliformes totais (NMP/100 mL)	35550	3180	6867	11199
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	10	0	0	0
DQO (mg/L)	20	20	20	25
Ferro (mg/L)	ND	ND	0,07	0,11
Manganês (mg/L)	ND	ND	ND	ND
Chumbo (mg/L)	ND	ND	ND	ND
Cobre (mg/L)	0,02	0,02	0,03	0,02
Zinco, Cádmio, Níquel, Cromo	ND	ND	ND	ND

ND = não detectado.

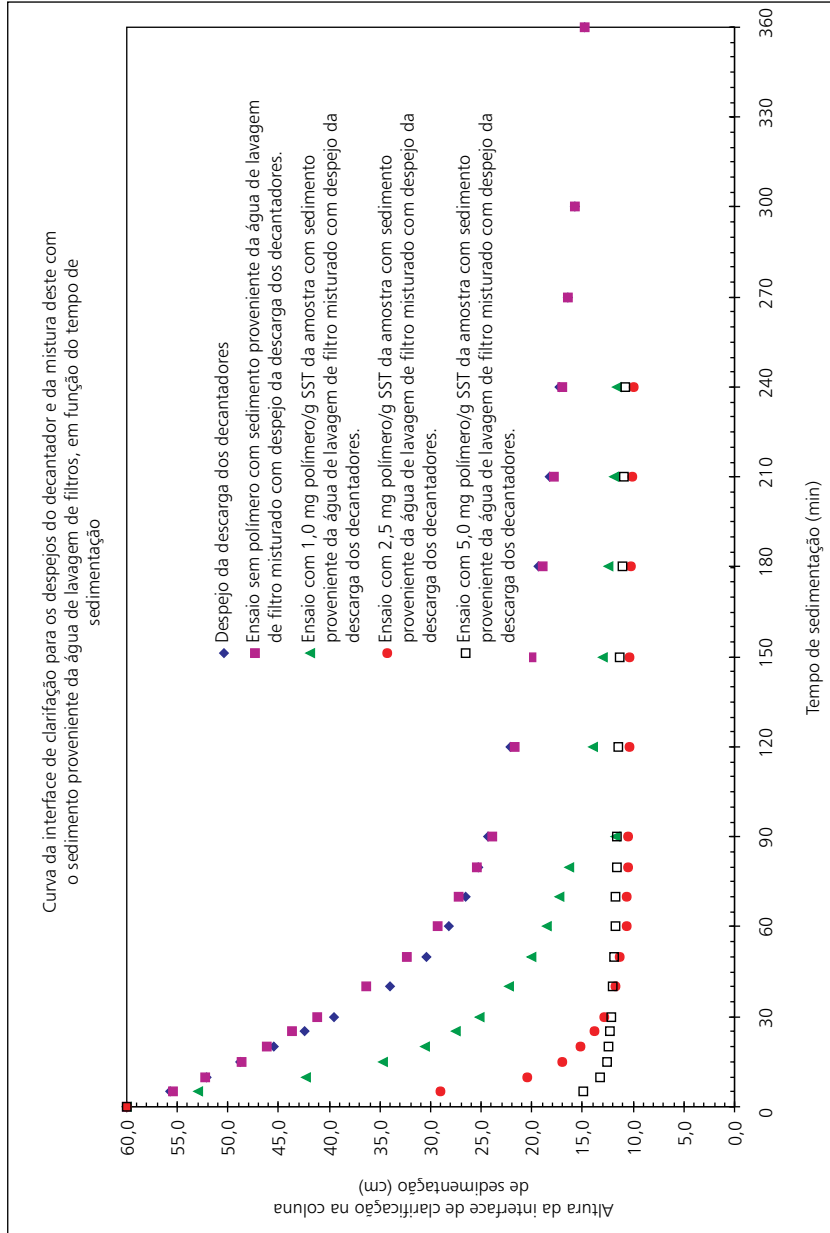


Figura 7.4 Curvas da interface de clarificação/adensamento por gravidade em função do tempo para diferentes dosagens de polímero.⁽¹²⁾



Figura 7.5 Fotos ilustrando a coluna durante um ensaio de clarificação e adensamento de sedimento de ALF + DD.

A passagem de um líquido através de uma massa sólida pode enfrentar maior ou menor resistência, dependendo de certas condições. A resistência específica pode ser definida como a maior ou menor resistência à passagem de um líquido através de uma massa sólida, podendo ser determinada por meio da equação (7.1).

$$U = \frac{2 \cdot E \cdot 3 \cdot A^2}{\mu \cdot r} \quad (7.1)$$

em que:

r = resistência específica (cm/g);

P = pressão de filtração (g/cm.seg²);

A = área filtrante (cm²);

m = viscosidade do filtrado (g/cm.seg);

C = massa de sólidos suspensos por unidade de volume filtrado (g/cm³);

b = coeficiente (s/cm⁶), dado pela equação (7.2);

Tabela 7.9 Caracterização dos sedimentos obtidos dos ensaios de clarificação, por sedimentação, sem e com emprego de polímero aniônico, nas dosagens de 1,0, 2,5 e 5,0 mg polímero/g SST da amostra.^(1,2)

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Dosagens do polímero aniônico empregado na clarificação (mg de polímero/g de SST)	0,0	1,0	2,5	5,0
Sólidos sedimentáveis (mL de lodo adensado/L de amostra), após 2 h de sedimentação em cone Imhoff	370	242	215	130
Sólidos suspensos totais (g/L de lodo)	39,40	49,40	47,30	60,00
Sólidos suspensos totais fixos (g/L de lodo)	37,1	45,4	43,0	51,28
Sólidos suspensos totais voláteis (g/L de lodo)	2,3	4,0	4,3	8,72
Resistência específica do lodo (E+12 m/Kg)	8,28	6,29	3,86	5,68
DQO (mg/L de lodo)	2956	3764	3956	3848
Ferro (mg/L de lodo)	2520	3050	2900	3540
Manganês (mg/L de lodo)	12,0	15,0	13,6	16,2
Cobre (mg/L de lodo)	6,9	10,4	103	11,7
Zinco (mg/L de lodo)	2,6	3,0	3,5	3,3
Cromo (mg/L de lodo)	2,1	2,5	2,35	3,08
Níquel (mg/L de lodo)	1,14	1,27	1,2	1,2
Cádmio (mg/L de lodo)	0,04	0,07	0,05	0,09
Chumbo (mg/L de lodo)	1,15	1,4	1,34	1,62
Bário (mg/L de lodo)	ND	1,2	1,3	1,5

Observação: todos os metais foram medidos com amostras digeridas.

$$b = \operatorname{tg}\alpha = \frac{\left(\frac{t_2}{v_2}\right) - \left(\frac{t_1}{v_1}\right)}{v_2 - v_1} \quad (7.2)$$

em que:

t = tempo de filtração (s);

v = volume filtrado (cm³).

O valor do coeficiente b é obtido construindo-se um gráfico no qual se tem os valores de v e (t/v), conforme mostrado na Figura 7.7.

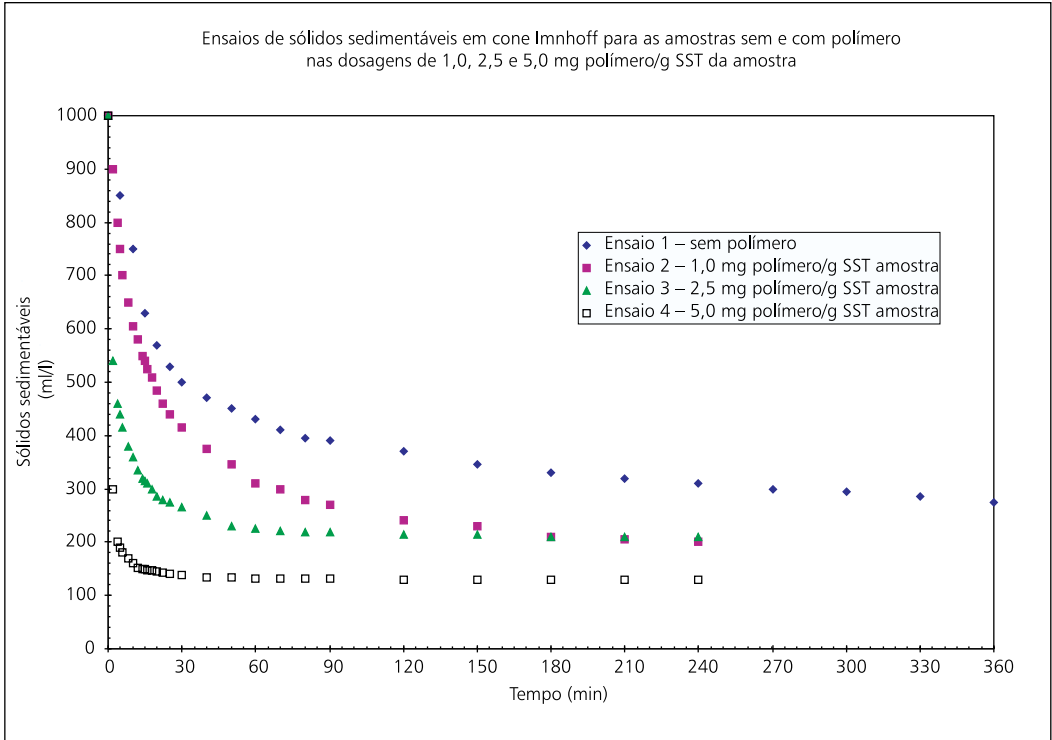


Figura 7.6 Teor de sólidos sedimentáveis em cone Imhoff para diferentes dosagens de polímero aniônico (amostra do sedimento ALF + DD).⁽¹²⁾

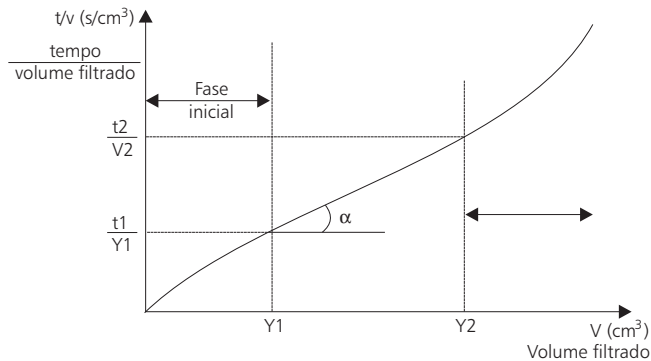


Figura 7.7 Gráfico típico dos valores de (t/v) em função de v , para obtenção de b no cálculo da resistência específica.

O teste da resistência específica foi adaptado para ser realizado utilizando 25 mL do material sedimentado, devido à dificuldade encontrada para obtenção de um volume maior do material. O ensaio foi adaptado com base no teste do tempo de filtração, descrito no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998), no qual são utilizados volumes menores. Os equipamentos e materiais utilizados no teste da resistência específica estão esquematizados na Figura 7.8.

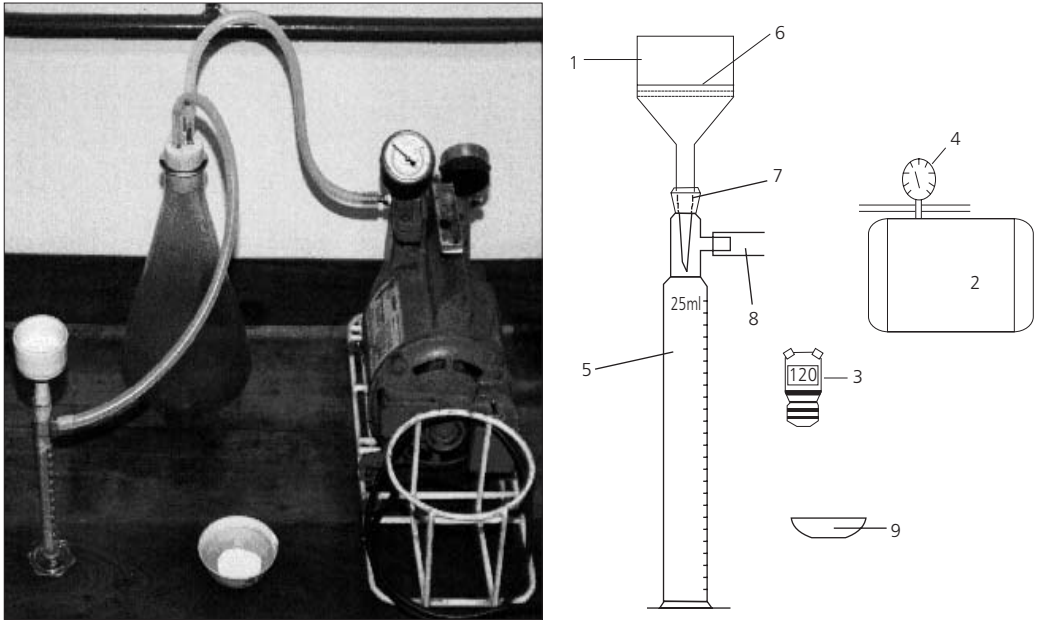


Figura 7.8 Foto mostrando a aparelhagem utilizada para determinação da resistência específica; à direita estão os equipamentos e materiais utilizados no teste da resistência específica: 1 – funil de Buchner nº 2; 2 – bomba de vácuo; 3 – cronômetro; 4 – medidor de vácuo (manômetro); 5 – proveta graduada de ml com dispositivo para tomada de vácuo; 6 – papel de filtro Whatman nº 42; 7 – anel em borracha vedante para funil de Buchner encaixar na proveta; 8 – mangueira para ligar a proveta à bomba; e 9 – cadinho de porcelana.

Para o teste da resistência específica foi adotado o seguinte procedimento:

- a) O papel de filtro Whatman 42 é recortado igual ao diâmetro interno do funil de Buchner, molhado e colocado em um cadinho de porcelana, e levado para o interior de uma estufa mantida a uma temperatura de 100°C, permanecendo por 2 horas.

- b) Após este tempo, o material é retirado da estufa e esfriado para ser realizada a pesagem inicial.
- c) O papel de filtro, após pesado, é molhado e colocado no funil de Buchner. Em seguida, aplica-se vácuo (380 mmHg) para que ocorra aderência do papel ao funil e remoção do excesso de água.
- d) É colocada uma quantidade fixa do material sedimentado, ou seja, 25 mL, dentro do funil e aplicado vácuo no sistema, registrando-se, em função do tempo, o volume do filtrado. Com os valores de t/v em função de v é construído um gráfico, no qual se obtém o valor de b , a ser utilizado na equação (7.1) para calcular a resistência específica. Após o término da filtração ou queda do vácuo, o ensaio está encerrado.
- e) O papel de filtro com os sólidos retidos é retirado e colocado em cadinho de porcelana. Todos os sólidos presos ao funil são removidos. O cadinho, juntamente com o papel de filtro e os sólidos retidos, são levados para estufa, onde permanecem para secagem durante 2 horas.
- f) Após estar seco, o cadinho é pesado e a diferença entre o peso inicial e o peso final fornece a massa seca de sólidos totais utilizados no cálculo da resistência específica, empregados na equação (7.2).

Para cálculo da resistência específica foi realizado o teste para determinação do tempo de filtração, em papel de filtro Whatman 40, de um determinado volume de sedimento e do material flotado. Os resultados estão mostrados na Tabela 7.10. Na Figura 7.9 são apresentados os valores da relação tempo/volume em função do volume filtrado e a obtenção de b , coeficiente utilizado no cálculo da resistência específica do sedimento, sem e com o emprego de polímero aniônico na clarificação por sedimentação.

Tabela 7.10 Tempo de filtração dos sedimentos obtidos nos ensaios de clarificação, por sedimentação, sem e com emprego de polímero aniônico nas dosagens de 1,0, 2,5 e 5,0 mg/g SST, em função do volume no teste da resistência específica.⁽¹²⁾

Volume Filtrado (mL)	Tempo (s)				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Flotação
	Sem polímero	1,0 mg/g SST	2,5 mg/g SST	5,0 mg/g SST	5,0 mg/g SST
3	8,27	8,88	4,41	8,03	1,9
5	20,60	24,49	13,18	21,47	5,09
7	41,75	47,74	25,84	45,99	10,56
9	72,82	78,90	44,21	76,22	18,70
11	107,04	111,79	62,67	112,27	28,80
13	151,43	156,40	90,42	160,00	42,05
15	207,35	210,22	117,73	216,00	59,32
17	260,54	269,80	154,07	278,34	85,96
19	325,56	336,34	203,12	356,30	140,50
21	414,32	433,48	276,95	466,11	285,33
23	526,70	740,54	446,94	750,76	-

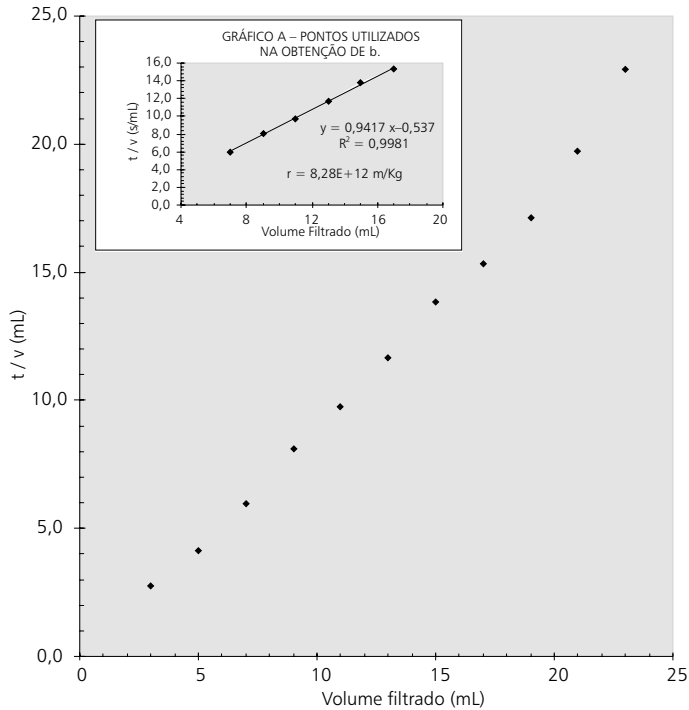


Figura 7.9 Valores de t/v em função de v para a obtenção do coeficiente b , utilizado para a determinação da resistência específica.

7.6 Referências Bibliográficas

1. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS; AMERICAM WATER WORKS ASSOCIATION (1996). *Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residual*. New York, 294p.
2. BARBOSA, A.B.D. (1997). *A Experiência da CAESB em Recuperação de Água de Lavagem de Filtros e Desidratação de Lodo de ETA*. (CD ROM). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., Foz do Iguaçu, 1997. Anais. Rio de Janeiro, ABES. II-070 p. 1501-07.
3. CHRISTENSEN, J.R.; CHRISTENSEN, G.L.; HANSEN, J.A. (1995). Improved characterization of mixing for sludge conditioning. *Journal of Environmental Engineering*, v.121, n.3, p.236-244, mar.

4. CORDEIRO, J.S. (1981). *Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de estações de tratamento de água*. São Carlos. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
5. CORDEIRO, J.S. (1993). *O problema dos lodos gerados nos decantadores em estações de tratamento de água*. São Carlos. 342p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
6. CORNWELL, D.A. et al. (1987). *Handbook water treatment plant waste management*. Denver, AWWA, Reserch /Foudation, 431p.
7. CORNWELL, D.A.; LEER, R.G. (1994). Waste strem recycling: its effect on water quality. *Journal AWWA*, p.50-63, nov.
8. DI BERNARDO, L. (1993). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. Rio de Janeiro, ABES.
9. DI BERNARDO, L. et al. (1999). Clarificação da água de lavagem de filtros de sistemas de filtração direta ascendente e desaguamento do lodo por centrifugação. (CD ROM) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20., Rio de Janeiro, 1999. *Anais*. Rio de Janeiro, ABES.
10. FERREIRA FILHO, S.S. (1997). Pré-condicionamento de lodos de estações de tratamento de água visando a seu adensamento por gravidade. (CD ROM). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., Foz do Iguaçu, 1997. *Anais*. Rio de Janeiro, ABES. II-025, p.1181-92.
11. GRANDIN, S.R. (1992). *Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água*. São Paulo. 456p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
12. HIDROSAN ENGENHARIA S/C LTDA. (1999). *Estudos de Tratabilidade dos Resíduos Líquidos Gerados na ETA Fonte Luminosa de Araraquara*. Relatório entregue ao Departamento de Água e Esgotos de Araraquara.
13. SABESP (1987). Recuperação das águas de lavagens, tratamento e disposição de resíduos sólidos das ETAs da RMSP. *Revista DAE*, v.47, n.150, p.216-219, dez.
14. SCALIZE, P.S. (1997). *Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água que utilizam sulfato de alumínio como coagulante primário*. São Carlos. 220p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
15. SOUZA FILHO, A.G. (1998). *Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros rápidos de estação de tratamento de água que utiliza cloreto férrico como coagulante primário*. São Carlos. 245p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
16. TALMADGE, W.P.; FITCH, E.B. (1955). Determining thickner unit areas. *Ind. Eng. Chem.*, USA, v.47, n.1.

Capítulo 8

Disposição de Resíduos Líquidos de ETAs em ETEs

Luiz Di Bernardo, Eraldo Henriques de Carvalho e Paulo Sérgio Scalize

8.1 Introdução

Historicamente, os resíduos líquidos gerados nas ETAs têm sido lançados nos cursos d'água, direta ou indiretamente. Ultimamente, tal prática tem sido bastante questionada, devido aos possíveis riscos à saúde pública e à vida aquática. Por outro lado, os sistemas comumente utilizados para tratamento dos resíduos estão se tornando mais complexos e onerosos, visto que os padrões de lançamento em cursos d'água e de disposição final em aterros sanitários têm se tornado cada vez mais rígidos.⁽²⁾ Na Lei nº 9.605, publicada no Diário Oficial da União, em 13 de fevereiro de 1998, relativamente às sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, merece destaque a Seção III – Da Poluição e outros Crimes Ambientais, artigo 54, “causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora”; pena : reclusão, de 1 a 4 anos, e multa. Sem dúvida, o lançamento direto dos resíduos líquidos nos cursos d'água infringe esse artigo e pode causar sérios aborrecimentos aos responsáveis pelas ETAs.

Um método alternativo de disposição dos resíduos gerados nas ETAs, que tem sido observado em alguns países da Europa e nos Estados Unidos, é seu lançamento nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), via rede coletora de esgoto ou por meio de transporte em caminhão. Tal procedimento surge como uma proposta bastante atraente, visto que elimina a implantação de sistemas de tratamento de resíduos nas próprias ETAs. No entanto, não se deve esquecer que nessa alternativa está sendo transferido o gerenciamento da disposição do lodo para a administração da ETE. Entretanto, algumas interferências podem ocorrer nas unidades da ETE, de maneira

que tal procedimento deve ser criteriosamente analisado. Dentre essas unidades, destacam-se os digestores de lodo e os decantadores primários, já que, devido às características dos resíduos líquidos da ETA, estes receberão a maior parte das impurezas contidas nos mesmos.⁽²⁾

8.2 Fatores Relacionados à Operação das Estações de Tratamento de Água Que Interferem nas Características de Seus Resíduos Líquidos

A seguir, serão apresentados e discutidos os principais fatores relacionados à operação da ETA que interferem nas características dos resíduos líquidos.

Tipo de Decantador e Procedimento de Limpeza

O tipo de decantador e suas características operacionais interferem no método de tratamento e de disposição dos resíduos líquidos, pois os decantadores convencionais (sem equipamento de extração de lodo) geralmente são limpos em intervalos de tempo de 1 a 4 meses (depende da qualidade da água bruta), gerando resíduos bem mais concentrados que os observados em decantadores de alta taxa ou convencionais com dispositivos de extração de lodo, os quais são limpos diariamente com uma frequência que depende da qualidade da água bruta.

O procedimento utilizado na limpeza dos decantadores também interfere na qualidade dos resíduos líquidos gerados, principalmente no que diz respeito à concentração de sólidos. A remoção de lodo dos decantadores pode ser manual ou mecanizada (remoção intermitente ou contínua). O emprego de equipamento para extração de lodo é justificado quando a água bruta possui alta concentração de sólidos suspensos ou for elevada a concentração de matéria orgânica, ou quando a matéria removida for rapidamente degradada. Adicionalmente, em ETAs relativamente grandes (em geral, com capacidade para tratamento de vazão maior que $1 \text{ m}^3/\text{s}$) os decantadores são providos de dispositivos automáticos para extração de lodo.

Os decantadores convencionais, que não possuem equipamentos de extração de lodo, são limpos quando se observa intenso arrastamento de flocos para as calhas de coleta de água decantada ou quando a fermentação do lodo causa o surgimento de odor desagradável e de bolhas que prejudicam a eficiência da unidade. Inicialmente, o decantador é esvaziado e, em seguida, é efetuada a lavagem do mesmo por jateamento de água sob pressão para remover o restante de lodo que permanece no fundo.

A formação de uma zona de turbilhonamento de pequenas bolhas de gás na superfície do decantador convencional indica o início da fermentação. Se o operador não atentar para esse fenômeno e a fermentação prosseguir, haverá, além da produção

de sabor e odor desagradáveis na água decantada, desprendimento de grandes placas de lodo na zona de decantação, deteriorando ainda mais a qualidade da água decantada.

A limpeza manual resulta na produção de resíduo líquido em bateladas, o que dificulta o gerenciamento do mesmo. Além de permitir maior eficiência e controle do sistema de tratamento, a descarga contínua ou semi-contínua de lodo evita ocorrência de condições anaeróbias. Dessa forma, o armazenamento do lodo por longo período, visando aumentar sua concentração, não é recomendado.⁽⁶⁾ Na Figura 8.1 é mostrada a foto de um decantador convencional, de escoamento horizontal, após sua limpeza manual. Na parede lateral foi demarcada a altura do lodo depositado, observando-se que a maior quantidade de lodo é retida no primeiro terço médio da unidade. Nas fotos da Figura 8.2 é mostrado um equipamento de extração de lodo do tipo sifão flutuante instalado em um decantador convencional de escoamento horizontal.



Perfil de lodo indicado ao longo de um decantador convencional de escoamento horizontal após limpeza manual



Limpeza manual de decantador convencional de escoamento horizontal com introdução de água proveniente de mangueira

Figura 8.1 Limpeza manual de decantadores convencionais.

Segundo levantamento efetuado por Cordeiro em 1993, na maioria das ETAs de ciclo completo no Brasil, a limpeza dos decantadores é feita manualmente, por meio de jatos d'água. O período de tempo entre limpezas sucessivas em um mesmo decantador variou de 20 a 180 dias. O local de disposição desses resíduos é quase sempre um curso d'água próximo à ETA.

Nos decantadores de alta taxa contendo poços de lodo e remoção por meio de descarga de fundo, a duração dessa descarga depende da qualidade do resíduo descartado, que é visualmente observada pelo operador. Tal procedimento pode interferir nas características dos resíduos, visto que é uma comparação muito subjetiva.



Figura 8.2 Fotos ilustrando equipamento de sifão flutuante móvel para remoção de lodo de decantador convencional.

No entanto, há muitas ETAs no Brasil que tiveram seus decantadores convencionais transformados em unidades de alta taxa, mediante a introdução de módulos tubulares ou de placas planas paralelas em parte deles, sem ter sido construído um sistema adequado para extração de lodo. Como a vazão é geralmente aumentada e é diminuída a área de concentração do lodo, há necessidade de paralisações periódicas para execução das limpezas.

Nas fotos da Figura 8.3 é mostrado um decantador de uma ETA cujos decantadores encontram-se nas condições descritas, que necessitam de limpezas mensais.

Lavagem dos Filtros – Procedimento e Frequência

Em geral, a lavagem dos filtros é realizada em intervalos de 12 a 48 horas, com duração de 4 a 15 minutos e taxa de aplicação de água da ordem de 10 a 15 L/m²s, dependendo do método de lavagem.

A concentração de sólidos suspensos da água de lavagem de filtros varia bastante durante tal procedimento, sendo relativamente baixa no início, aumenta depois de 1 a 3 minutos e, após atingir um pico, diminui gradativamente até o final. O filtro é considerado limpo quando se observa clarificação e ausência de flocos na água de lavagem.⁽⁴⁾

As características desses resíduos dependem, dentre outros fatores, do método e periodicidade das lavagens. Usualmente, a lavagem dos filtros, somente com água, consiste na aplicação de uma vazão no sentido ascensional, que causa expansão do meio granular e libera o material sólido retido na camada filtrante, resultando um resíduo líquido com concentração de sólidos que pode variar de 50 a 300 mg/L, em condições normais de operação, mas que pode atingir 500 mg/L se a carreira de filtração alcançar de 80 a 100 horas.^(7,8,9)

A matéria sólida nos resíduos é formada por flocos remanescentes da decantação (argilas muito finas, hidróxido de ferro ou alumínio, matéria orgânica etc.), podendo também ser resultante da oxidação de ferro ou manganês.

Conforme visto no Capítulo 2, os filtros podem ser operados com taxa constante ou com taxa declinante, sendo o volume de água da lavagem e suas características dependentes de vários fatores, também discutidos no Capítulo 2.

Na Figura 8.4 são apresentadas fotos da lavagem de um filtro de uma ETA, somente com água, cuja duração é da ordem de 10 minutos e, na Figura 8.5, tem-se fotos mostrando a lavagem com ar-água.

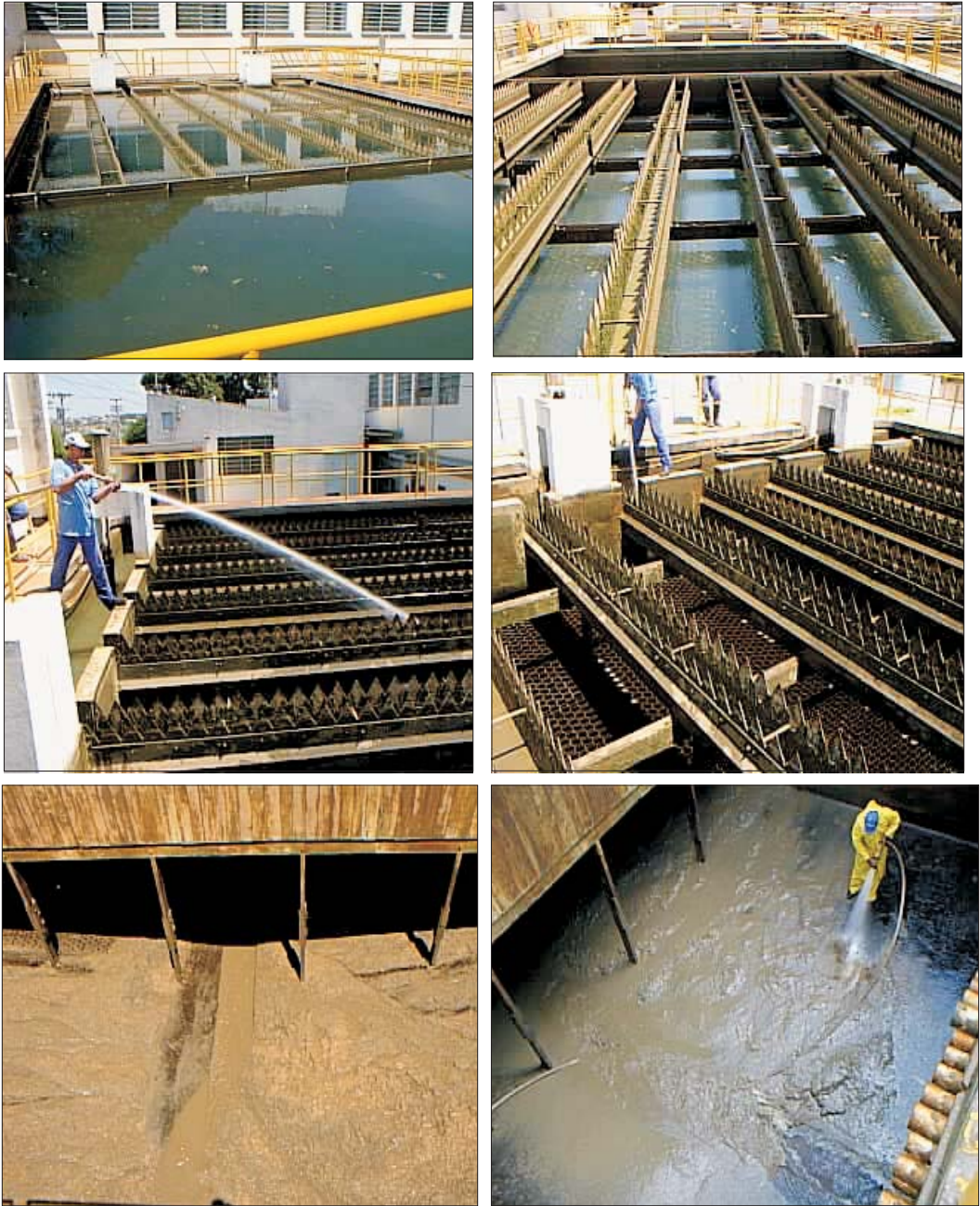


Figura 8.3 Fotos ilustrando decantador convencional transformado em decantador de alta taxa, com limpeza manual.



4 min. após o início da lavagem



8 min. após o início da lavagem

Figura 8.4 Fotos ilustrando a lavagem de filtros de uma ETA somente com água.



Aplicação de ar



Final da aplicação de ar



Lavagem com água



Final da lavagem com água

Figura 8.5 Fotos da lavagem de um filtro com ar e água, separadamente.

8.3 Alternativas de Disposição dos Resíduos Líquidos Gerados nas ETAs nas Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs

Nesta seção serão apresentadas, de forma resumida, as alternativas comumente consideradas para a disposição dos resíduos líquidos de ETAs nas ETEs. Posteriormente, serão apresentados dois estudos de caso. Há sempre que se considerar a especificidade da ETA, pois em muitos casos tem-se descarga semi-contínua dos decantadores e, em outros, os decantadores são limpos após um ou mais meses de funcionamento.

Disposição dos Resíduos Líquidos de ETAs nas ETEs

Dependendo da quantidade de resíduos líquidos gerados, estes poderão ser lançados diretamente na rede coletora, após a regularização de vazão dos resíduos líquidos da ETA, pois as vazões decorrentes das lavagens de filtros e das limpezas de decantadores convencionais resultam relativamente elevadas. Ainda assim, é necessário verificar a capacidade da rede coletora de esgoto de atender tal incremento de vazão.

Reuso da Fase Líquida dos Resíduos Líquidos da Limpeza de Decantadores e Filtros Após Clarificação e Lançamento do Lodo Resultante na ETE

Os resíduos líquidos decorrentes da lavagem dos filtros e limpeza dos decantadores são encaminhados para um tanque de clarificação onde ocorre separação de suas fases sólida e líquida, em geral com o uso de polímero. A fase líquida é recirculada, enquanto o lodo resultante é geralmente transportado para a ETE em caminhão-tanque.

Disposição do Lodo Obtido na Clarificação da Água de Lavagem de Filtros e os Resíduos Líquidos da Limpeza dos Decantadores na ETE

Devido a possibilidade do acúmulo de ovos de parasitas na ETA, segundo a alternativa descrita no item anterior, geralmente é reaproveitada somente a água de lavagem de filtros, após sua clarificação. Assim, o resíduo a ser disposto consiste no lodo gerado no tanque de clarificação da água de lavagem dos filtros, juntamente com aquele devido a limpeza dos decantadores. De qualquer forma, é necessária a regularização de vazão se esse resíduo resultante for lançado na rede coletora de esgoto ou for armazenado para posterior transporte por meio de caminhões-tanque à ETE.

8.4 Estudos de Caso de Disposição dos Resíduos Líquidos de ETAs em ETEs

Serão apresentados dois estudos de caso, um deles de uma ETA que utiliza cloreto férrico como coagulante primário e, outra, que usa sulfato de alumínio.

Estudo de Caso 1

Esses estudos foram realizados em uma ETA que utiliza tecnologia de tratamento do tipo ciclo completo e emprega cloreto férrico como coagulante primário. A ETA possui dois decantadores de alta taxa com módulos tubulares e quatro filtros rápidos operados com taxa declinante, em meio filtrante de antracito e areia. A limpeza dos decantadores é realizada diariamente por meio de descargas de fundo; sendo, à noite, parcialmente drenados e lavados manualmente com auxílio de mangueiras. Em cada decantador geralmente são efetuadas três descargas por dia, resultando, junto com a lavagem manual noturna, um volume mensal médio de resíduo líquido igual a aproximadamente 3.420 m³. A concentração média de sólidos suspensos totais presentes nos resíduos da descarga é da ordem de 1.000 mg SST/L. Em média, são lavados três filtros por dia, aplicando-se ar e água, resultando um volume mensal médio de água de lavagem da ordem de 981 m³. A concentração média de sólidos suspensos totais presentes é de 400 mg SST/L. Do volume total de resíduos líquidos gerados na ETA, 22% devem-se à limpeza dos filtros e 78% à dos decantadores. Para simular o afluente de uma suposta ETE que passasse a receber os resíduos da ETA, a vazão média mensal de esgoto foi estimada como sendo 80% da vazão média da água tratada na ETA (111.462 m³ água tratada/mês), resultando uma contribuição média dos resíduos líquidos da ETA igual a 5% do afluente à ETE. Os decantadores primários e os digestores anaeróbios de lodo foram selecionados como unidades críticas da ETE, já que reteriam a maior parte das impurezas contidas nos despejos da ETA. As interferências no desempenho dos decantadores foram simuladas em ensaios de sedimentação, enquanto a digestão anaeróbia foi avaliada por meio de testes de tratabilidade anaeróbia dos lodos obtidos nos ensaios de sedimentação.

Simulação do Lançamento Direto das Descargas de Decantadores e das Lavagens de Filtros na ETE

Neste estudo, para preparar o afluente à ETE, foi adotada a relação volumétrica média entre resíduo líquido da ETA e esgoto sanitário igual a 5%, variando-se a concentração de sólidos suspensos totais dos resíduos líquidos da ETA. Para a lavagem dos filtros foi utilizado o valor máximo observado (500 mg SST/L), enquanto para a descarga dos decantadores foram utilizadas as concentrações de 1.500, 3.000 e 4.500 mg SST/L. Foram utilizadas quatro colunas de sedimentação, providas de agitadores, conforme a Figura 8.6.



Figura 8.6 Foto ilustrando as colunas de sedimentação.

Os resíduos líquidos, provenientes da descarga dos decantadores e lavagens de filtros da ETA, e o esgoto sanitário foram caracterizados previamente em termos de sólidos (totais, voláteis, suspensos e sedimentáveis), DQO, alcalinidade, pH e ferro total. Tem-se, na Tabela 8.1, a caracterização dos resíduos gerados na ETA e do esgoto sanitário utilizado neste estudo.

Os principais resultados dos ensaios realizados nas colunas de sedimentação foram os seguintes:

- a) A concentração de sólidos sedimentáveis nas colunas aumentou proporcionalmente à concentração de sólidos suspensos presente nos resíduos líquidos da ETA. Na Tabela 8.2 são apresentados os valores de sólidos sedimentáveis obtidos nas diferentes colunas de sedimentação.
- b) A remoção de sólidos suspensos totais aumentou proporcionalmente à concentração de sólidos suspensos totais presentes no resíduo líquido da ETA, como mostrado na Figura 8.7. Na Tabela 8.3, encontram-se os valores de sólidos suspensos totais no início e término do teste de sedimentação em cada coluna.

Tabela 8.1 Características dos resíduos líquidos gerados na ETA e do esgoto sanitário utilizado no estudo – Estudo de Caso 1.

Parâmetro	Descarga de Decantador	Lavagem de Filtros	Esgoto Sanitário
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	85 a 242	42	140
Demanda química de oxigênio (mg/L)	150 a 540	64	537
Ferro total (mg/L)	300 a 950	100	3,3
pH	7,4 a 7,7	7,3	6,7
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	550 a 800	70	4
Sólidos suspensos totais (mg/L)	1.500 a 4.500	491	260
Sólidos totais (mg/L)	1.700 a 4.750	507	528
Sólidos voláteis totais (mg/L)	300 a 793	75	264
Turbidez (UT)	676 a 3.077	288	167

Tabela 8.2 Concentração de sólidos sedimentáveis encontrada para as diferentes colunas de sedimentação utilizadas no estudo.

Coluna de Sedimentação	Sólidos Sedimentáveis (mL/L)
Coluna de controle (somente esgoto sanitário)	4,5
Coluna 1 (água de lavagem de filtro com 500 mgSST/L + descarga de decantador com 1.500 mgSST/L + esgoto sanitário)	7,5
Coluna 2 (água de lavagem de filtro com 500 mgSST/L + descarga de decantador com 3.000 mgSST/L + esgoto sanitário)	19
Coluna 3 (água de lavagem de filtro com 500 mgSST/L + descarga de decantador com 4.500 mgSST/L + esgoto sanitário)	27

- c) Na Tabela 8.4 encontram-se as concentrações de metais pesados no sobrenadante no final do teste de sedimentação (chumbo, cádmio, níquel e cromo não foram detectados).

Os resultados dos ensaios de tratabilidade anaeróbia dos lodos provenientes das colunas de sedimentação foram os seguintes:

- a) A produção de metano foi praticamente a mesma para os diferentes frascos-reatores, como mostrado na Figura 8.8.

Tabela 8.3 Concentrações iniciais e finais de sólidos suspensos encontradas nos sobrenadantes para as diferentes colunas de sedimentação utilizadas no estudo.

Coluna de Sedimentação	Concentração de SST nos sobrenadantes (mg/L)	
	Início do teste	Final do teste
Coluna de controle (somente esgoto sanitário)	260	132
Coluna 1 (água de lavagem de filtro com 500 mg SST/L + descarga de decantador com 1.500 mg SST/L + esgoto sanitário)	305	120
Coluna 2 (água de lavagem de filtro com 500 mg/L + descarga de decantador com 3.000 mg SST/L + esgoto sanitário)	350	89
Coluna 3 (água de lavagem de filtro com 500 mg/L + descarga de decantador com 4.500 mg SST/L + esgoto sanitário)	446	78

- b) O tratamento estatístico dos valores de produção de metano dos diferentes frascos-reatores indicou uma leve tendência de aumento na taxa de produção de metano, à medida que a concentração do resíduo da ETA contida no lodo primário aumentou. No entanto, essa pequena diferença entre os valores de taxa de produção de metano pode ser desprezível, tendo em vista que o valor estimado para o erro embutido nas medições (amostragem de gás e cromatografia, por exemplo) é de aproximadamente 10%. Na Tabela 8.5 encontram-se os valores de taxa máxima e média de produção de metano obtidos pelos ajustes às funções hiperbólica e linear.

Tabela 8.4 Metais pesados encontrados no sobrenadante das colunas no final do teste de sedimentação.

Coluna de Sedimentação	Zn	Fe	Mn	Cu	Ca	Mg
Coluna de controle (somente esgoto sanitário)	0,35	3,3	0,17	0,05	16	1,36
Coluna 1 (água de lavagem de filtro com 500 mg SST/L + descarga de decantador com 1.500 mg SST/L + esgoto sanitário)	0,25	2,92	0,15	0,04	11	1,3
Coluna 2 (água de lavagem de filtro com 500 mg SST/L + descarga de decantador com 3.000 mg SST/L + esgoto sanitário)	0,13	1,8	0,16	0,06	13	1,63
Coluna 3 (água de lavagem de filtro com 500 mg SST/L + descarga de decantador com 4.500 mg SST/L + esgoto sanitário)	0,09	1,46	0,15	0,08	12	1

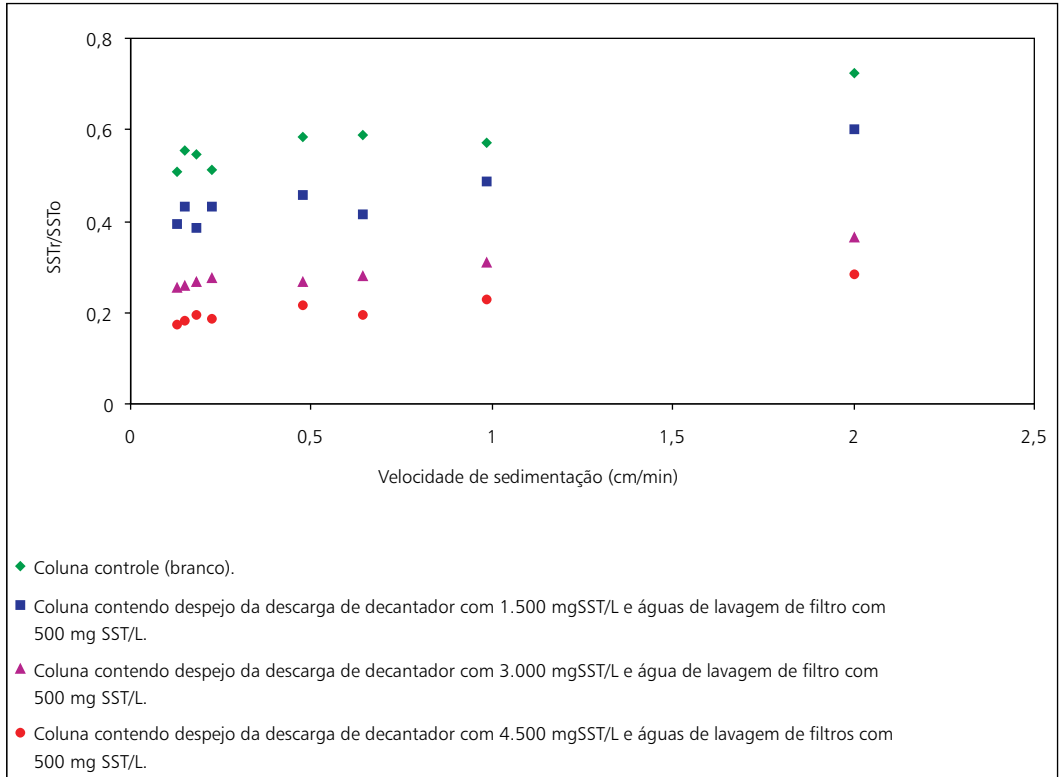


Figura 8.7 Fração dos sólidos suspensos totais iniciais sedimentando com velocidade menor ou igual à considerada (SST_r = sólidos suspensos totais remanescentes e SST_o = sólidos suspensos totais iniciais).

Simulação do Lançamento das Descargas dos Decantadores com o Lodo Obtido na Clarificação da Água de Lavagem dos Filtros na ETE

Neste estudo de simulação, as concentrações de sólidos suspensos totais dos resíduos líquidos gerados na ETA foram mantidas constantes, tendo sido utilizadas diferentes relações volumétricas entre resíduo líquido da ETE e esgoto da ETE (5%, 7% e 9%), para compor o afluente da suposta ETE. Para clarificação água de lavagem de filtros, foi utilizado um polímero aniônico e aplicada dosagem de 3 mg de polímero/g SST (1,38 mg de polímero/L de resíduo líquido). Segundo Souza Filho,⁽⁹⁾ que trabalhou com a clarificação de água de lavagem de filtros gerados na ETA, essas foram as condições ótimas encontradas. Na Tabela 8.6 é apresentada a caracterização dos resíduos líquidos da ETA e do esgoto sanitário utilizado neste estudo de caso.

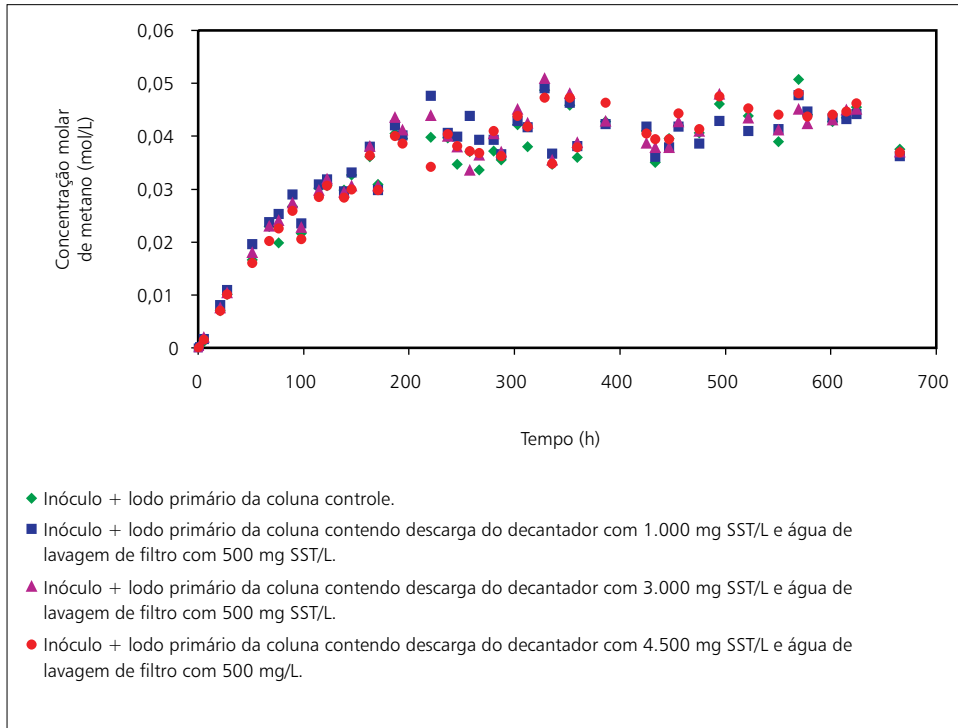


Figura 8.8 Curvas de produção de metano para os diferentes frascos-reatores.

Os principais resultados dos ensaios realizados nas colunas de sedimentação foram os seguintes:

- a) A concentração de sólidos sedimentáveis aumentou proporcionalmente ao percentual de despejo da ETA contido no afluente da ETE. Na Tabela 8.7 são apresentados os valores de sólidos sedimentáveis obtidos nas diferentes colunas de sedimentação.
- b) A remoção de sólidos suspensos totais aumentou proporcionalmente ao percentual de resíduo da ETA contido no afluente da ETE, como mostrado na Figura 8.9. Na Tabela 8.8 encontram-se os valores de sólidos suspensos totais no início e término do teste de sedimentação para cada uma das colunas.

Tabela 8.5 Comparação das curvas de produção de metano para os diferentes reatores.

Frasco-reator	Taxa de Produção de Metano (MOL CH ₄ /L.H) × 10 ⁻⁴			Coef. Correlação (R ²)
	Valor Máximo		Valor Médio	
	Ajuste Função Hiperb.	Ajuste Função Linear	Ajuste Função Hiperb.	
Lodo primário da coluna controle	5,2	4,6	0,713	0,9298 ^(a) 0,9980 ^(b)
Lodo primário da coluna que recebeu descarga do decantador com 1.500 mg SST/L e água de lavagem de filtro com 500 mg SST/L	6,4	6,1	0,714	0,9232 ^(a) 0,9956 ^(b)
Lodo primário da coluna que recebeu descarga do decantador com 3.000 mg SST/L e água de lavagem de filtro com 500 mg SST/L	5,8	6	0,719	0,9192 ^(a) 0,9962 ^(b)
Lodo primário da coluna que recebeu descarga do decantador com 4.500 mg SST/L e água de lavagem de filtro com 500 mg SST/L	4,8	5,2	0,738	0,9507 ^(a) 0,9974 ^(b)

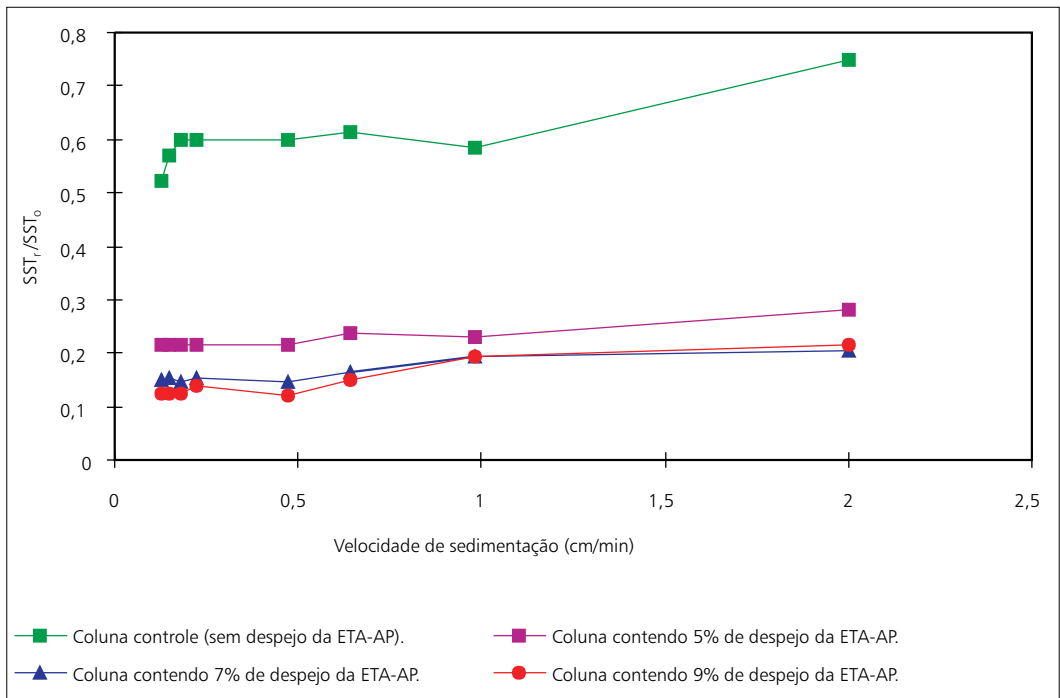
(a) ajuste à função linear; (b) ajuste à função hiperbólica.

Tabela 8.6 Características da descarga de decantadores, do lodo obtido na clarificação da lavagem dos filtros e do esgoto sanitário.

Parâmetro	Descarga do Decantador	Lodo Obtido Após Clarificação da Água de Lavagem dos Filtros	Esgoto Sanitário
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	206	412	144
Demanda química de oxigênio (mg/L)	320	1.500	572
Ferro total (mg/L)	550	1.000	3,3
PH	8,5	8,0	7,3
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	750	-	4
Sólidos suspensos totais (mg/L)	2.420	-	210
Sólidos totais (mg/L)	2.516	5.711	564
Sólidos voláteis totais (mg/L)	461	1.101	378
Turbidez (UT)	1.285	-	238

Tabela 8.7 Concentração de sólidos sedimentáveis nas colunas de sedimentação.

Coluna de Sedimentação	Sólidos Sedimentáveis (mL/L)
Coluna de controle (só esgoto sanitário)	4
Coluna que recebeu 5% de resíduo da ETA + esgoto sanitário	25
Coluna que recebeu 7% de resíduo da ETA + esgoto sanitário	37
Coluna que recebeu 9% de resíduo da ETA + esgoto sanitário	46

**Figura 8.9** Fração dos sólidos suspensos totais iniciais sedimentando com velocidade menor ou igual à considerada (SST_r = sólidos suspensos totais remanescentes e SST_0 = sólidos suspensos totais iniciais).

Os resultados dos testes de tratabilidade biológica anaeróbia dos lodos foram os seguintes:

- A produção de metano foi praticamente a mesma nos diferentes frascos-reatores, como mostrado na Figura 8.10.

- b) O tratamento estatístico dos valores de produção de metano dos diferentes frascos-reatores indicou uma leve tendência de aumento na taxa de produção de metano à medida que a proporção de resíduo da ETA no esgoto sanitário cresceu.

Tabela 8.8 Concentrações iniciais e finais de sólidos suspensos no sobrenadante das colunas de sedimentação.

Coluna de Sedimentação	Concentração de Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	
	Início do teste	Final do teste
Coluna controle (sem despejo da ETA-AP)	210	110
Coluna que recebeu 5% de despejo da ETA-AP	280	64
Coluna que recebeu 7% de despejo da ETA-AP	344	52
Coluna que recebeu 9% de despejo da ETA-AP	380	48

Tabela 8.9 Metais pesados encontrados no sobrenadante das colunas no final do teste de sedimentação.

Coluna de Sedimentação	Metal Pesado (mg/L)									
	Zn	Pb	Cd	Ni	Fe	Mn	Cu	Cr	Ca	Mg
Coluna controle (somente esgoto sanitário)	ND	ND	ND	ND	0,4	0,11	0,03	ND	5,46	0,75
Coluna que recebeu 5% de resíduo da ETA	0,25	ND	ND	ND	0,73	0,11	0,03	ND	4,3	0,7
Coluna que recebeu 7% de resíduo da ETA	ND	ND	ND	ND	0,51	0,12	0,03	ND	5,45	0,77
Coluna que recebeu 9% de despejo da ETA	ND	ND	ND	ND	0,48	0,09	0,03	ND	5,5	0,78

ND = não detectado.

Estudo de Caso 2

Características das ETAs

O sistema de tratamento de água da cidade objeto de estudo é composto por duas estações, ETA 1 e ETA 2, as quais funcionam independentemente, tratam água proveniente de manancial superficial e utilizam sulfato de alumínio como coagulante primário.

A ETA 1 possui 2 conjuntos de floculação em paralelo, cada um contendo 6 câmaras em série, 2 decantadores de alta taxa (com módulos tubulares) e 4 filtros.

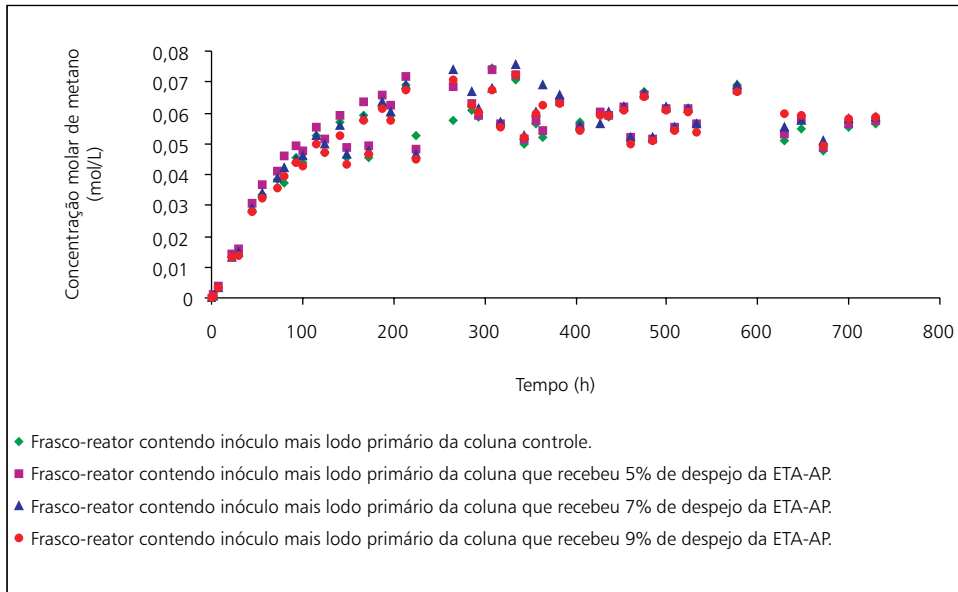


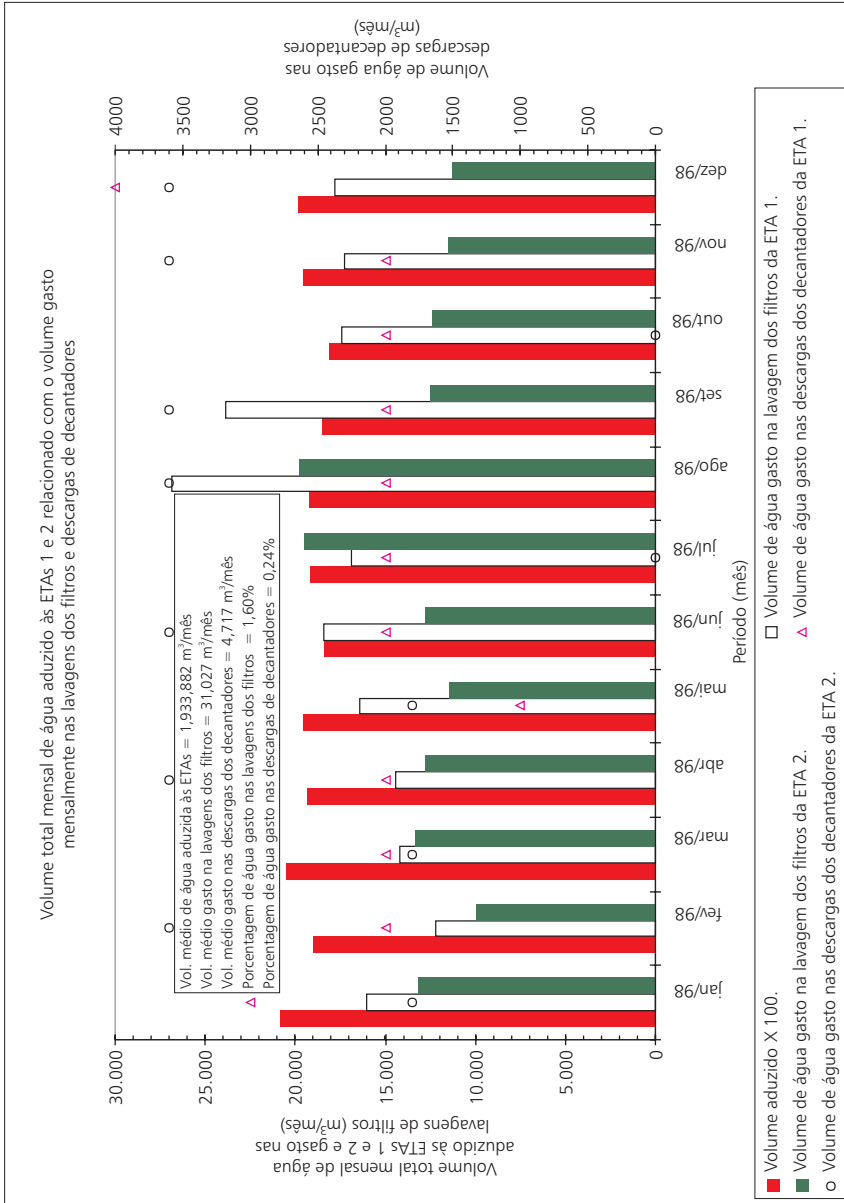
Figura 8.10 Curvas de produção de metano nos frascos-reatores.

A ETA 2 possui 2 conjuntos de floculação em paralelo, cada um contendo 4 câmaras em série, 2 decantadores de alta taxa (com módulos tubulares) e 6 filtros. Segundo os boletins mensais de operação das ETAs, a vazão média mensal de água tratada no ano de 1998 foi de 1.933.882 m³/mês, sendo de 17.647 m³/mês e 13.380 m³/mês, respectivamente, os volumes utilizados nas lavagens dos filtros na ETA 1 e na ETA 2, representando 1,6% do volume total aduzido às ETAs. Nas ETAs 1 e 2, os volumes médios das descargas dos decantadores foram de 2.167 m³/mês e 2.550 m³/mês, respectivamente, representando 0,24% do volume médio mensal de água tratada. O número médio mensal de filtros lavados nas ETAs 1 e 2 neste mesmo ano foi de 276,7 por mês, sendo 143,5 filtros/mês na ETA1 e 133,2 filtros/mês na ETA 2.

O número médio de filtros lavados nas ETAs 1 e 2 foram de 4,72 e 4,63 filtros/dia, respectivamente, resultando um número total de 9,35 filtros lavados por dia. O número máximo de filtros lavados no ano de 1998 foi igual a 13 dias na ETA 1 e 12 na ETA 2. Embora os decantadores sejam de alta taxa (veja as fotos da Figura 8.3), a descarga de lodo é periódica e a limpeza é realizada manualmente.

O volume médio de água usado na lavagem de cada filtro foi de 122,98 m³ na ETA 1 e de 100,45 m³ na ETA 2. Na Figura 8.11 são apresentados os volumes mensais de água usados nas lavagens dos filtros e os resultantes das descargas dos decantadores das ETAs 1 e 2, bem como o volume de água aduzido às ETAs.

Figura 8.11 Volumes de água tratada nas ETAs, utilizados nas lavagens dos filtros e nas limpezas de decantadores.



Características dos Resíduos Líquidos

Para obtenção das amostras compostas por resíduos oriundos das descargas dos decantadores e das lavagens dos filtros, foi instalada uma bomba em um poço de inspeção, a qual proporcionou a coleta contínua dos resíduos líquidos provenientes da lavagem de um filtro e, posteriormente, da descarga de um decantador da ETA 1. Note, na Figura 8.11, que em geral, os decantadores são limpos mensalmente. Foram coletadas amostras seriadas da água de lavagem de um filtro a cada 30 s, e da descarga do decantador a cada 10 min., sendo caracterizadas segundo parâmetros apresentados na Tabela 8.10.

Tabela 8.10 Caracterização das amostras compostas dos resíduos líquidos.

Parâmetro	Água de Lavagem de Filtro	Descarga de Decantador
Turbidez (uT)	180	32928
pH	7,8	7,9
Cor aparente (uC)	1500	–
Sólidos suspensos totais (mg/L)	224	22005
Sólidos suspensos totais Fixos (mg/L)	198	17980
Sólidos suspensos totais Voláteis (mg/L)	26	4025
Coliformes totais (NMP/100 mL)	19350	111985
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	200	16600
DQO (mg/L)	49	640
Ferro (mg/L)	10,0	940
Manganês (mg/L)	0,15	10,0
Alumínio (mg/L)	–	–
Zinco (mg/L)	0,11	1,70
Cobre (mg/L)	0,08	1,05
Cádmio (mg/L)	ND	0,05
Níquel (mg/L)	ND	1,06
Chumbo (mg/L)	ND	0,88
Cromo (mg/L)	ND	0,42

ND = não detectado.

Nas Figuras 8.11 e 8.12 são mostrados os valores correspondentes de sólidos suspensos totais das amostras dos dois resíduos líquidos.

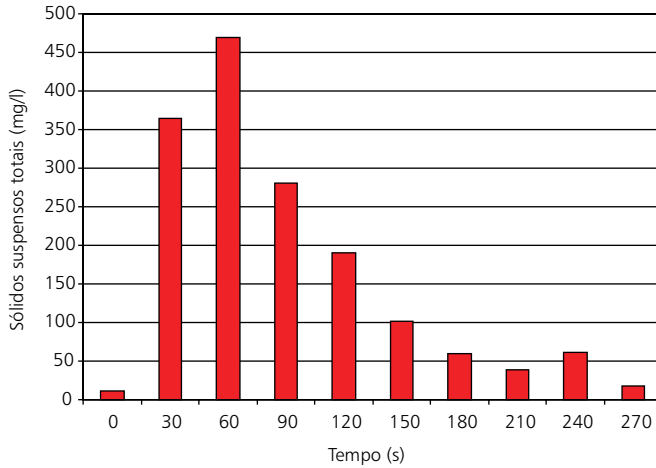


Figura 8.12 Concentração de sólidos suspensos totais das amostras da água de lavagem de um filtro da ETA 1 coletadas em intervalos de 30 s.

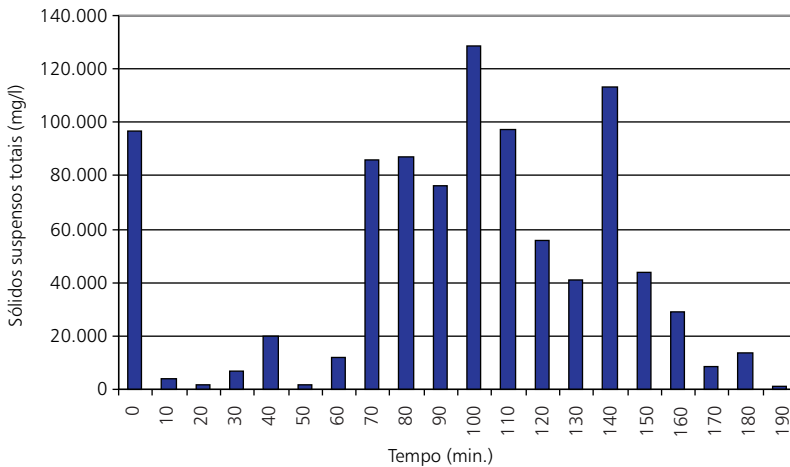


Figura 8.13 Concentração de sólidos suspensos totais das amostras coletadas em intervalos de 10 min. durante a descarga e limpeza de um decantador da ETA 1.

Clarificação do Resíduo Líquido da Lavagem do Filtro

Foram estudadas dosagens de polímero aniônico de 1, 2, 3, 4 e 5 mg polímero/g SST, cujos resultados são apresentados na Tabela 8.11 e Figura 8.13. Pode-se observar na Tabela 8.11 que a melhor dosagem resultou de 4 mg polímero/g SST. As condições do ensaio foram: 1 minuto de mistura rápida a 350 rpm e 3 minutos a 100 rpm, sendo o tempo de sedimentação de 24 minutos com coletas em intervalos de 4 minutos. Após ensaio em aparelho *Jar test*, outra amostra de água de lavagem de filtro foi colocada em coluna empregando-se 4 mg polímero/g SST, para verificar a interface de sedimentação, mas devido à baixa concentração de sólidos não foi possível essa determinação. Após 2 horas de sedimentação, o sobrenadante foi coletado e, visando sua possível recirculação, efetuou-se a caracterização conforme parâmetros de qualidade contidos na Tabela 8.12. Paralelamente ao ensaio na coluna, foram executados ensaios em cone Imhoff, tendo resultado os valores do teor de sólidos sedimentáveis mostrados na Tabela 8.13, com os quais foi construída a Figura 8.13.

Tabela 8.11 Valores de turbidez dos sobrenadantes obtidos no ensaio em aparelho *Jar test* – clarificação da água de lavagem do filtro sem e com uso de polímero.

		Ensaio					
		1	2	3	4	5	6
Dosagem do Polímero Aniônico (mg polímero/g SST da amostra)		0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Tempo de coleta (min.)		Turbidez do Sobrenadante (uT)					
	4	172	7,7	5,0	2,6	2,1	3,0
	8	152	3,3	2,1	1,7	1,5	1,6
	12	130	2,2	1,5	1,3	1,0	1,2
	16	114	1,4	1,3	1,2	0,95*	1,1
	20	102	1,4	1,1	1,2	0,95	1,1
	24	96,3	1,4	1,1	1,1	0,90	1,0

Preparação e Caracterização das Amostras dos Resíduos da ETA a serem Misturadas com o Afluente à ETE

Foram preparadas três amostras, posteriormente misturadas com o afluente à ETE, em proporções de forma a representar três situações distintas relativamente à proporção dos resíduos da ETA em relação aos da ETE.

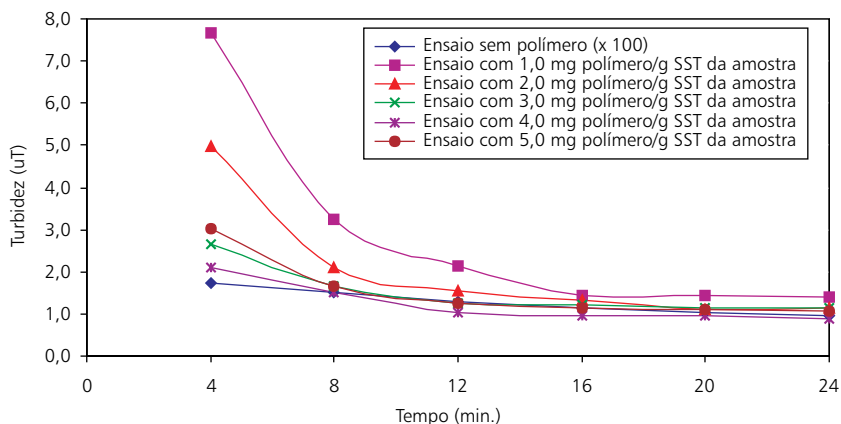


Figura 8.14 Turbidez dos sobrenadantes em função do tempo de sedimentação, amostras coletadas em intervalos de 4 minutos durante o ensaio em aparelho jar test utilizando água de lavagem de filtro sem e com polímero aniônico.

Tabela 8.12 Caracterização do sobrenadante obtido no ensaio de clarificação em coluna de sedimentação da água de lavagem do filtro utilizando 4,0 mg polímero aniônico/g SST da amostra.

Parâmetro	Sobrenadante
Turbidez (uT)	3,5
pH	7,7
Cor aparente (uC)	32
Sólidos suspensos totais (mg/L)	4
Sólidos suspensos totais fixos (mg/L)	3
Sólidos suspensos totais voláteis (mg/L)	1
Coliformes totais (NMP/100 mL)	>2419
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	1
DQO (mg/L)	4
Ferro (mg/L)	1,4
Manganês (mg/L)	0,01
Alumínio (mg/L)	
Zinco (mg/L)	0,10
Cobre (mg/L)	0,01
Cádmio (mg/L)	ND
Níquel (mg/L)	ND
Chumbo (mg/L)	ND
Cromo (mg/L)	ND

ND = não detectado.

Tabela 8.13 Volume de sólidos sedimentáveis em função do tempo no ensaio de sedimentação em cone Imhoff utilizando água de lavagem de filtro e empregando 4,0 mg polímero aniônico/g SST da amostra.

Tempo (min.)	0	5	10	20	25	30	35	40	60	90
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	0	8,0	7,5	7,3	7,0	6,9	6,8	6,5	6,5	6,5

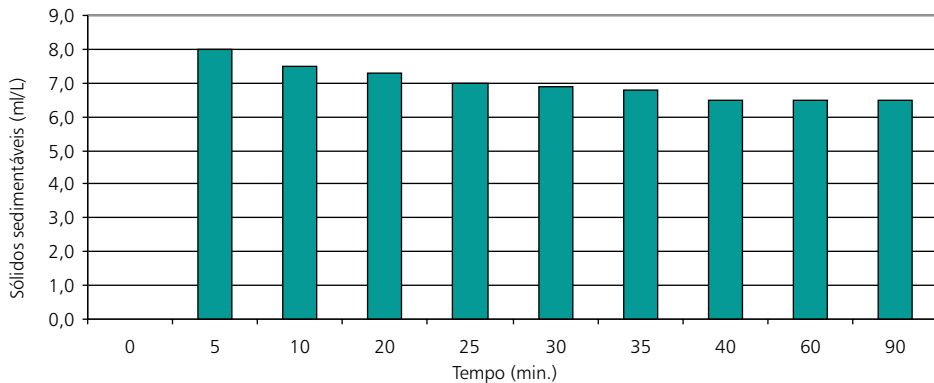


Figura 8.15 Volume de sólidos sedimentáveis em função do tempo no ensaio de sedimentação em cone Imhoff utilizando água de lavagem de filtro e empregando 4,0 mg polímero aniônico/g SST da amostra.

Assumiu-se que seria efetuada a recuperação da água de lavagem dos filtros, de modo que as amostras misturadas com o afluente à ETE foram preparadas com o resíduo da descarga do decantador e com o sedimento produzido na clarificação da água de lavagem do filtro.

- a) Situação 1: de acordo com levantamento de dados realizado nas ETAs 1 e 2, o número de filtros lavados diariamente na situação 1 foi igual a 13 na ETA 1 e a 12 na ETA 2, totalizando um volume de 2.804 m³/dia, ou seja, 1.599 m³/dia na ETA 1 e 1.205 m³/dia na ETA 2, além daquele de 1.800 m³/dia relativo à limpeza do decantador da ETA 2, que representa um maior volume comparado ao da ETA 1. Considerando que a água de lavagem de filtro será clarificada e que o volume descartado resultará igual a 10% do inicial, tem-se o volume de resíduo da ETA afluente à ETE, de 280 m³/dia proveniente do material sedimentado da água de lavagem dos adicionados aos 1.800 m³/dia (dos decantadores), resultando um valor total de 2.080 m³/dia (7,43% do volume de esgoto afluente à ETE).

- b) Situação 2: na situação 2, foi considerada a média entre a situação 1 e 3, na qual o volume médio da limpeza dos decantadores foi de 1.400 m³/dia, ao qual foram adicionados 10% do volume médio da lavagem dos filtros, ou seja 10% de 1.687 m³/dia (~169 m³/dia), totalizando 1.569 m³/dia, o que representa 5,7% do volume de esgoto afluente à ETE.
- c) Situação 3: na situação 3, o número de filtros lavados foi de 3 na ETA 1 e 2 na ETA 2, representando um volume de 369 m³/dia na ETA 1 e 201 m³/dia na ETA 2, totalizando 570 m³/dia. Considerando os mesmos 10% de resíduo após a clarificação, o volume de resíduo líquido afluente da ETA à ETE será de 57 m³/dia dos filtros adicionados aos 1.000 m³/dia provenientes da limpeza do decantador da ETA 1, em um total de 1.057 m³/dia, o que representa 3,9% do volume de esgoto afluente à ETE.

As características das três amostras são apresentadas na Tabela 8.14.

Tabela 8.14 Caracterização dos resíduos da ETA misturados ao afluente à ETE para as três situações idealizadas.

Parâmetro	Resultados		
	Situação 1	Situação 2	Situação 3
pH	6,0	6,0	6,0
Sólidos suspensos totais (g/L)	18,5	19,9	24,1
Sólidos suspensos totais fixos (g/L)	14,6	16,0	19,9
Sólidos suspensos totais voláteis (g/L)	3,8	3,9	4,8
DQO (mg/L)	6235	6225	6455
Nitrogênio (mg/L)	66	56	65
Fósforo (mg/L)	2,19	1,74	1,97
Ferro (mg/L)	570	815	880
Manganês (mg/L)	8,3	10	11,6
Alumínio (mg/L)			
Zinco (mg/L)	1,18	1,55	1,65
Cobre (mg/L)	0,65	0,78	0,82
Cádmio (mg/L)	ND	0,02	0,04
Níquel (mg/L)	0,60	0,86	0,87
Chumbo (mg/L)	0,52	0,70	0,83
Cromo (mg/L)	0,26	0,30	0,43

Caracterização do Esgoto Afluente à ETE

O afluente à ETE (esgoto sanitário e efluentes industriais) utilizado no trabalho foi coletado após o gradeamento. A caracterização do despejo encontra-se na Tabela 8.15. Adicionalmente, foi trazido um volume da ordem de 10 litros de lodo digerido na ETE, a ser utilizado como inóculo nos ensaios anaeróbios.

Tabela 8.15 Caracterização do afluente à ETE.

Parâmetro	Resultado
Turbidez (uT)	104
pH	7,1
Cor aparente (uC)	1545
Sólidos suspensos totais (mg/L)	98
Sólidos suspensos totais fixos (mg/L)	14
Sólidos suspensos totais voláteis (mg/L)	84
Coliformes totais (NMP/100 mL)	$19,35 \times 10^6$
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	$7,89 \times 10^6$
DQO (mg/L)	576
Nitrogênio	46
Fósforo	3,9

Ensaio com os Resíduos da ETA Misturados ao Esgoto Afluente à ETE

Foram utilizadas as colunas mostradas na foto da Figura 8.5. As colunas foram preenchidas inicialmente com esgoto, com os agitadores ligados a fim de evitar sedimentação indesejada de partículas. Após atingir o volume de 130 L, foram descartados 9,7 L, 7,41 L e 5,1 L de esgoto, exceto da coluna controle, e adicionada a mesma quantidade das três amostras dos resíduos líquidos da ETA, representativos das três situações descritas anteriormente.

Com a finalidade de reproduzir o tempo de contato entre o esgoto e o resíduo da ETA, promoveu-se agitação da mistura por um tempo de 30 min. com um gradiente de 300 s^{-1} . Após esse período, os agitadores foram desligados e esperou-se que a superfície do líquido nas colunas se estabilizasse. Em seguida, foi iniciada a coleta de amostras ao longo da coluna, em intervalos de 20 min., durante 2 horas, para determinação de sólidos suspensos totais e turbidez (veja a Tabela 8.16). Após o período de 2 horas, foram retiradas amostras dos sobrenadantes e dos sedimentos, as quais foram caracterizadas segundo os parâmetros da Tabela 8.17.

Tabela 8.16 Valores de turbidez e do teor de sólidos suspensos totais das amostras coletadas durante a sedimentação na coluna.

Tempo (min.)	Parâmetros	Controle	Situação 1	Situação 2	Situação 3
0	Turbidez (uT)	135	1.446	1.017	731
0	SST (mg/L)	1.114	1.592	1.260	932
20	Turbidez (uT)	128	156	159	194
20	SST (mg/L)	108	138	136	172
40	Turbidez (uT)	126	141	158	163
40	SST (mg/L)	116	124	132	146
60	Turbidez (uT)	117	141	143	152
60	SST (mg/L)	96	120	116	130
80	Turbidez (uT)	112	130	146	148
80	SST (mg/L)	102	116	120	124
100	Turbidez (uT)	113	143	144	151
100	SST (mg/L)	102	100	110	118
120	Turbidez (uT)	104	117	119	124
120	SST (mg/L)	96	104	106	108

Interferência dos Resíduos da ETA na Digestão Anaeróbia de Lodo

A seguir, são listados os passos correspondentes à metodologia utilizada no ensaio de digestão anaeróbia de lodo: a) réplica do ensaio: duplicata; b) temperatura do ensaio: 30°C; c) volume dos frascos-reatores: 100 mL; d) volume útil dos frascos-reatores: 66,6 mL; e) relação entre as concentrações de sólidos suspensos voláteis do lodo primário e do esgoto igual a 0,5; f) agitação dos frascos-reatores: contínua com 150 rpm; g) volume de inóculo adicionado em cada frasco-reator: 20,63 mL; h) concentração de sólidos suspensos voláteis presentes nos frascos-reatores: 10 g/L; i) redução do meio líquido: borbulhamento com nitrogênio puro (100%); j) leitura do volume de metano produzido nos frascos reatores: cromatografia gasosa; k) periodicidade das medidas de metano: 2 vezes ao dia (após estabilização, 1 vez ao dia); l) finalização dos testes após 360 horas de incubação dos frascos (não houve necessidade de maior tempo de incubação, pois após 240 horas observou-se estabilização da produção de metano).

Na Tabela 8.18 são apresentados os valores do volume de metano produzido nos frascos-reatores, realizados em cromatografia gasosa, com os quais foi construída a Figura 8.15. A velocidade máxima de produção de metano em cada frasco-reator foi calculada para a fase de produção de metano exponencial, utilizando-se regressão linear, conforme mostrado na Figura 8.16.

Tabela 8.17 Características dos sobrenadantes e sedimentos após ensaio nas colunas.

Parâmetro	Sobrenadante				Sedimento			
	Controle	1	2	3	Controle	1	2	3
Turbidez (uT)	104	117	119	124	*	*	*	*
Cor aparente (uC)	1525	1340	1465	1470	*	*	*	*
pH	7,2	7,3	7,2	7,2	7,0	7,0	7,0	7,0
Sólidos suspensos totais (g/L)	0,092	0,104	0,106	0,108	0,886	77,37	78,47	83,83
Sólidos suspensos totais fixos (g/L)	0,010	0,046	0,048	0,052	0,210	60,60	61,53	65,53
Sólidos suspensos totais voláteis (g/L)	0,082	0,058	0,058	0,056	0,677	16,77	16,93	18,30
Coliformes totais (x 10 ⁶ NMP/100 mL)	14,21	11,03	12,81	12,62	*	*	*	*
<i>Escherichia coli</i> (x 10 ⁶ NMP/100 mL)	3,31	1,04	1,52	2,12	*	*	*	*
DQO (g/L)	0,550	0,390	0,439	0,399	4,90	27,77	31,23	38,58
Nitrogênio	53	36	35	33	81	391	441	475
Fósforo	4,28	2,88	3,11	3,47	8,52	19,52	18,53	20,04
Ferro (mg/L)	1,76	2,70	2,10	2,40	*	2250	2020	2000
Manganês (mg/L)	0,30	0,60	0,50	0,52	*	39,0	28,7	29,0
Alumínio (mg/L)					*			
Zinco (mg/L)	0,25	0,15	0,16	0,16	*	13,20	11,60	16,00
Cobre (mg/L)	0,14	0,11	0,10	0,12	*	3,37	3,32	6,10
Cádmio (mg/L)	ND	ND	ND	ND	*	0,22	0,21	0,24
Níquel (mg/L)	ND	ND	ND	ND	*	2,20	2,18	235
Chumbo (mg/L)	ND	ND	ND	ND	*	2,30	2,20	2,50
Cromo (mg/L)	ND	ND	ND	ND	*	1,60	1,24	1,42

ND = não detectado.

* = não pesquisado

Foram calculadas as velocidades médias de produção de metano para cada frasco, dividindo-se a área descrita pela curva sigmóide pelo tempo total do ensaio (360 horas). Observa-se, na Figura 8.15, que a produção de metano foi praticamente a mesma para os diferentes frascos-reatores, sendo que, no frasco-reator controle, a produção foi maior no início, com uma velocidade máxima maior comparada aos outros frascos-reatores. Quando analisada a velocidade média de produção de gás metano, os valores nos diferentes frascos-reatores indicaram uma leve tendência de aumento na taxa de produção de metano com o decorrer do tempo.

Os valores das velocidades médias e máximas de produção de metano estão apresentados na Tabela 8.19, bem como o coeficiente de correlação.

Tabela 8.18 Concentração molar de metano em função do tempo nos diferentes frascos-reatores.

Tempo (hora)	Concentração Molar de Metano (mL/L)			
	Inóculo + lodo primário da coluna controle. CONTROLE	Inóculo + lodo primário da coluna, obtido do ensaio com 7,43% do resíduo da ETA, sendo 86,52% de descarga de decantador e 13,48% de água de lavagem de filtro, apresentando 18,45 g/L SST. Situação 1	Inóculo + lodo primário da coluna, obtido do ensaio com 5,70% do resíduo da ETA, sendo 89,25% de descarga de decantador e 10,75% de água de lavagem de filtro, apresentando 19,93 g/L SST. Situação 2	Inóculo + lodo primário da coluna, obtido do ensaio com 3,92% do resíduo da ETA, sendo 94,62% de descarga de decantador e 5,39% de água de lavagem de filtro, apresentando 24,08 g/L SST. Situação 3
0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4,5	4,16E-04	2,74E-04	2,74E-04	2,74E-04
21,5	2,67E-03	8,96E-04	8,27E-04	1,19E-03
27,5	3,39E-03	1,52E-03	1,61E-03	1,77E-03
45,5	6,09E-03	2,52E-03	2,87E-03	3,04E-03
52,5	5,98E-03	3,67E-03	3,93E-03	3,99E-03
69,5	9,30E-03	5,98E-03	6,48E-03	7,01E-03
76,5	1,10E-02	6,74E-03	7,10E-03	7,49E-03
94,5	1,27E-02	9,37E-03	9,47E-03	1,00E-02
101,5	1,34E-02	9,67E-03	1,04E-02	1,08E-02
118	1,69E-02	1,17E-02	1,17E-02	1,25E-02
124	1,52E-02	1,16E-02	1,17E-02	1,30E-02
142,5	1,88E-02	1,45E-02	1,50E-02	1,62E-02
148,5	1,72E-02	1,29E-02	1,37E-02	1,45E-02
166,5	1,90E-02	1,55E-02	1,60E-02	1,69E-02
172,5	1,85E-02	1,51E-02	1,55E-02	1,62E-02
190	1,88E-02	1,51E-02	1,54E-02	1,63E-02
196,5	1,80E-02	1,53E-02	1,49E-02	1,60E-02
213,5	2,02E-02	1,84E-02	1,86E-02	1,91E-02
220,5	2,15E-02	2,05E-02	2,00E-02	2,07E-02
238,5	1,80E-02	1,76E-02	1,70E-02	1,70E-02
261	1,95E-02	2,41E-02	2,26E-02	2,14E-02

Tabela 8.18 Concentração molar de metano em função do tempo nos diferentes frascos-reatores. (Continuação.)

Tempo (hora)	Concentração Molar de Metano (mL/L)			
	Inóculo + lodo primário da coluna controle.	Inóculo + lodo primário da coluna, obtido do ensaio com 7,43% do resíduo da ETA, sendo 86,52% de descarga de decantador e 13,48% de água de lavagem de filtro, apresentando 18,45 g/L SST. Situação 1	Inóculo + lodo primário da coluna, obtido do ensaio com 5,70% do resíduo da ETA, sendo 89,25% de descarga de decantador e 10,75% de água de lavagem de filtro, apresentando 19,93 g/L SST. Situação 2	Inóculo + lodo primário da coluna, obtido do ensaio com 3,92% do resíduo da ETA, sendo 94,62% de descarga de decantador e 5,39% de água de lavagem de filtro, apresentando 24,08 g/L SST. Situação 3
	CONTROLE			
269	1,80E-02	1,84E-02	1,79E-02	1,80E-02
286	2,04E-02	2,23E-02	2,16E-02	2,18E-02
293	1,86E-02	1,77E-02	1,65E-02	1,63E-02
310	2,00E-02	2,45E-02	2,33E-02	2,13E-02
336	1,82E-02	2,36E-02	2,24E-02	2,24E-02
360	1,80E-02	2,38E-02	2,36E-02	2,45E-02

Considerações Finais sobre o Estudo de Caso 2

Com base nos ensaios realizados, concluiu-se que:

- o resíduo líquido da lavagem dos filtros pode ser submetido à clarificação utilizando-se polímero aniônico com dosagem de 4 mg polímero/gSST da amostra, pois com esta dosagem obteve-se sobrenadante com menor valor de turbidez;
- o sobrenadante obtido após clarificação, por sedimentação, do resíduo líquido da lavagem dos filtros, utilizando polímero aniônico, poderá ser recirculado para a entrada das ETAs sem que ocorram interferências, pois, de acordo com a caracterização realizada, os valores dos parâmetros pesquisados resultaram inferiores aos apresentados pela água bruta. Essa recirculação poderá representar uma recuperação de no mínimo 90% da água de lavagem dos filtros, dependendo do mecanismo utilizado para remoção do sobrenadante ou do material sedimentado;
- nas três situações em que foram adicionados resíduos das ETAs ao esgoto afluente à ETE, quando comparadas à que continha apenas esgoto (controle), ocorreu diminuição substancial de coliformes totais, *Escherichia coli*, DQO,

nitrogênio, fósforo e cor nos sobrenadantes das três colunas, sendo o sobrenadante proveniente da coluna que recebeu maior volume de resíduo das ETAs, o que apresentou maior redução desses parâmetros;

- com base nos resultados obtidos, possivelmente não ocorrerá interferência significativa no desempenho dos digestores de lodo, de forma que os resíduos líquidos das ETAs de Americana poderão ser lançados direta ou indiretamente na ETE.

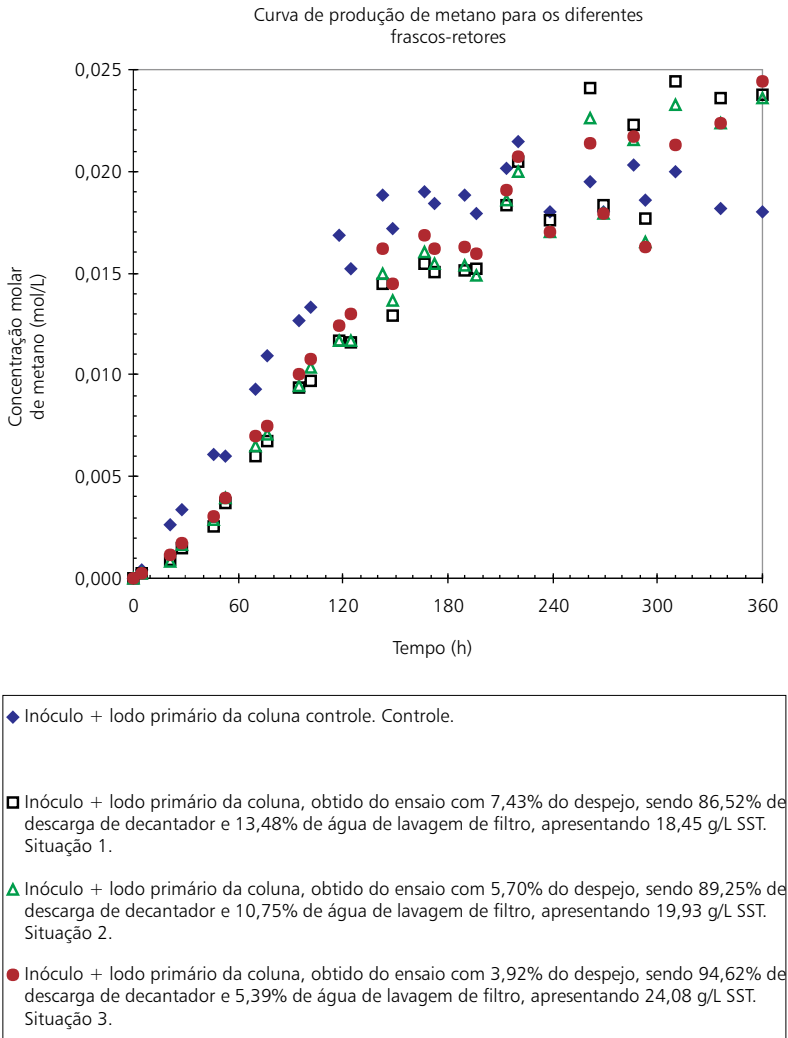


Figura 8.15 Produção de metano nos diferentes frascos-reatores.

Curva de produção de metano para os diferentes frascos-retores – ajuste linear para cálculo da velocidade máxima.

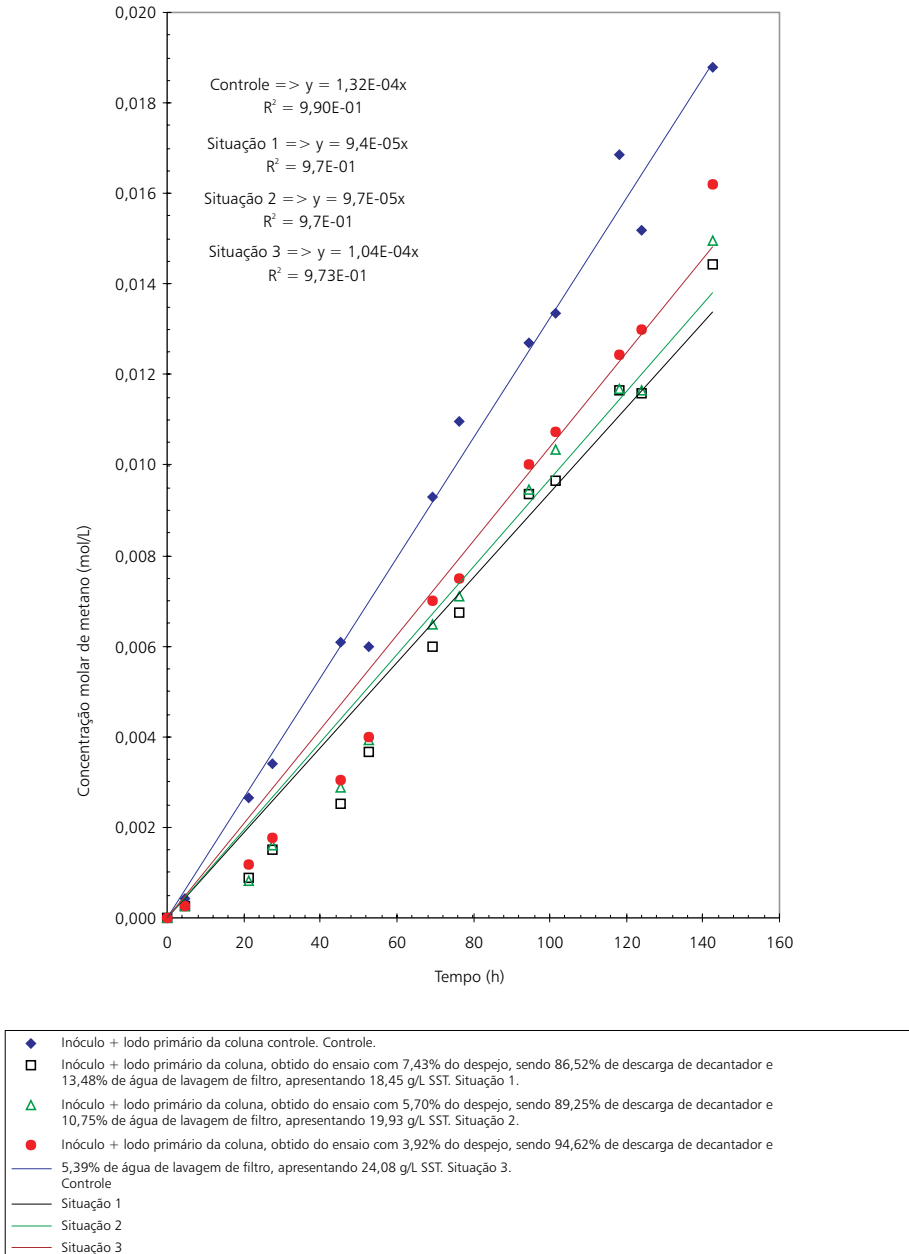


Figura 8.16 Produção de metano nos frascos-retores – ajuste linear para o cálculo da velocidade média para o controle e as três situações.

Tabela 8.19 Valores máximos e médios da taxa de produção de metano e coeficientes de correlação das curvas de produção de metano nos frascos-reatores.

Frasco-reator	Taxa de Produção de Metano (mol CH ₄ /L.h) x 10 ⁻⁴		Coeficiente de Correlação (r ²)
	Valor máximo ajuste à função linear ^(a)	Valor médio ajuste à função sigmóidal ^(b)	
Inóculo + lodo primário da coluna controle. Controle	1,32	0,53	0,99 ^(a) 0,98 ^(b)
Inóculo + lodo primário da coluna, obtido do ensaio com 7,43% do resíduo da ETA, sendo 86,52% de descarga de decantador e 13,5% de água de lavagem de filtro, apresentando 18,45 g/L SST. Situação 1	0,94	0,68	0,97 ^(a) 0,96 ^(b)
Inóculo + lodo primário da coluna, obtido do ensaio com 5,70% do resíduo da ETA, sendo 89,25% de descarga de decantador e 10,8% de água de lavagem de filtro, apresentando 19,93 g/L SST. Situação 2	0,97	0,65	0,97 ^(a) 0,96 ^(b)
Inóculo + lodo primário da coluna, obtido do ensaio com 3,92% do resíduo da ETA, sendo 94,62% de descarga de decantador e 5,4% de água de lavagem de filtro, apresentando 24,08 g/L SST. Situação 3	1,04	0,60	0,97 ^(a) 0,98 ^(b)

8.9 Referências Bibliográficas

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION (1995). *Standard methods for the examination of water and wasterwater*. 19.ed. Washington, D.C, USA.
2. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION RESEARCH FOUNDATION (AWWARF); KEURINGSINSTITUT VOOR WATERLEIDINGARTIKELEN (KIWA) (1990). *Slib, schlaamm, sludge*. CORNWELL & KOPPERS (ed.), Denver, American Water Works Association Research Foundation.
3. CARVALHO, E.H. (1999). *Simulação da disposição de resíduos líquidos de ETAs em ETEs*. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
4. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1987). *Operação e controle de estações de tratamento de água*. Relatório, Cetesb, São Paulo.

5. CORDEIRO, J.S. (1993). *Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de estações de tratamento de água*. São Carlos. 324p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
6. CORNWELL et al. (1987). *Handbook of practice water treatment plant waste management*. 1.ed., Virginia, American Water Works Association Research Foundation.
7. GRANDIN, S.R. (1992). *Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água*. São Paulo. 2v. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
8. SCALIZE, P.S. (1997). *Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água que utilizam sulfato de alumínio como coagulante primário*. São Carlos. 220p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
9. SOUZA FILHO, A.G. (1998). *Caracterização e clarificação por sedimentação da água de lavagem de filtros rápidos de uma estação de tratamento de água que utiliza cloreto férrico como coagulante primário*. São Carlos. 247p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Capítulo 9

Recuperação de Coagulantes de Lodos de Estações de Tratamento de Águas

Ricardo Franci Gonçalves, Elsa Barreto, Janete Brandão e Zeila Piotto

9.1 Introdução

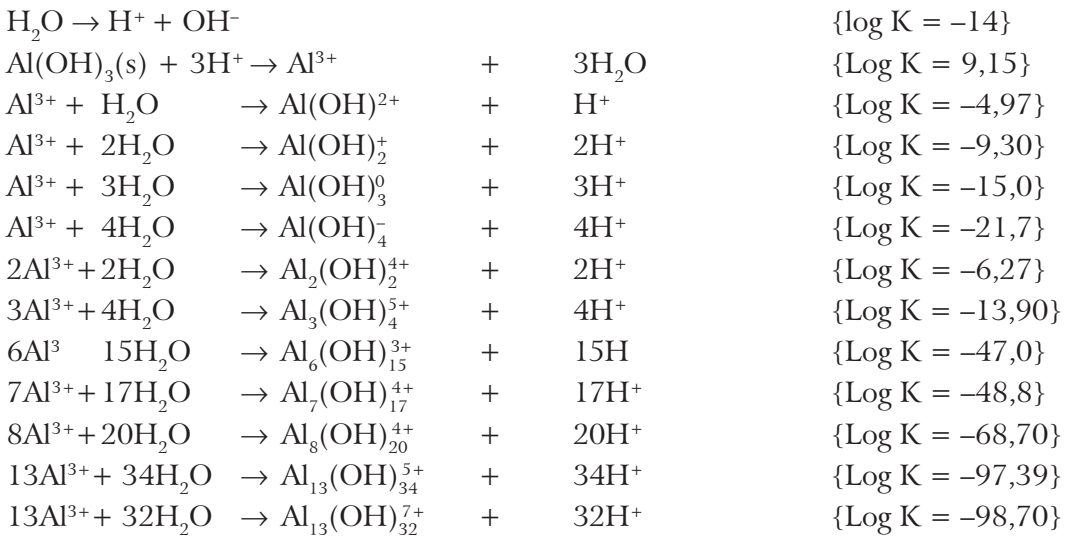
Dentre as práticas racionais para descarte de lodo de ETAs está a recuperação de coagulantes a partir dos lodos produzidos, seguida da reciclagem do coagulante regenerado na estação de tratamento e disposição do lodo remanescente em aterro.⁽¹⁵⁾ A solubilização dos coagulantes e sua reciclagem permitem minimizar os custos e os problemas associados à disposição final dos lodos gerados em ETAs. Uma vez que cerca de 35% a 50% dos sólidos presentes no lodo são hidróxidos, a recuperação dos coagulantes, além de diminuir o volume de lodo a ser descartado, promove o reciclo dos produtos químicos dosados no tratamento. Estudos feitos na Finlândia mostraram uma redução de 40% nos custos de disposição dos lodos previamente submetidos à recuperação de coagulantes pela via ácida.⁽¹⁾ O volume de lodo excedente após a recuperação pela via ácida pode ser reduzido em cerca de 45%.⁽³⁾ As principais vantagens e desvantagens da recuperação estão resumidas na Tabela 9.1.

Qualquer que seja o tipo de regeneração, a etapa inicial será a solubilização dos hidróxidos precipitados. Os processos se diferenciam na forma pela qual os compostos solúveis serão separados dos materiais inertes. A solubilização envolve as equações de equilíbrio entre o precipitado e as espécies solúveis. Através delas são construídos os diagramas de equilíbrio $\text{Al}(\text{OH})_3$ /espécies solúveis, no caso de utilização de coagulantes à base de alumínio, e o diagrama de equilíbrio $\text{Fe}(\text{OH})_3$ /espécies solúveis, quando os coagulantes forem à base de ferro. Deste modo pode-se prever o comportamento dos precipitados para diferentes condições de pH.

Tabela 9.1 Vantagens e desvantagens da recuperação de coagulantes.

Vantagens	Desvantagens
1. Diminuição do volume de lodo	1. Consumo de produtos químicos
2. Recuperação de coagulantes	2. Necessidade de unidades extras na ETA
3. Diminuição da concentração de metais pesados no lodo	3. Aumento dos serviços de operação
4. Maior facilidade de desidratação dos lodos	

As principais reações de equilíbrio para o alumínio estão relacionadas a seguir:



A partir das equações de equilíbrio, obtêm-se as equações que relacionam a concentração da espécie com o pH. As expressões entre colchetes [] representam a concentração da espécie em moles/litro.

$$\text{Log} \left[\text{Al}(\text{OH})_2^{2+} \right] = 4,64 - 2\text{pH}$$

$$\text{Log} \left[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+} \right] = 8,58 - 4\text{pH}$$

$$\text{Log} \left[\text{Al}^{3+} \right] = 9,66 - 3\text{pH}$$

$$\text{Log} \left[\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+} \right] = 10,56 - 3\text{pH}$$

$$\text{Log} \left[\text{Al}(\text{OH})_4^{1-} \right] = \text{pH} - 13,91$$

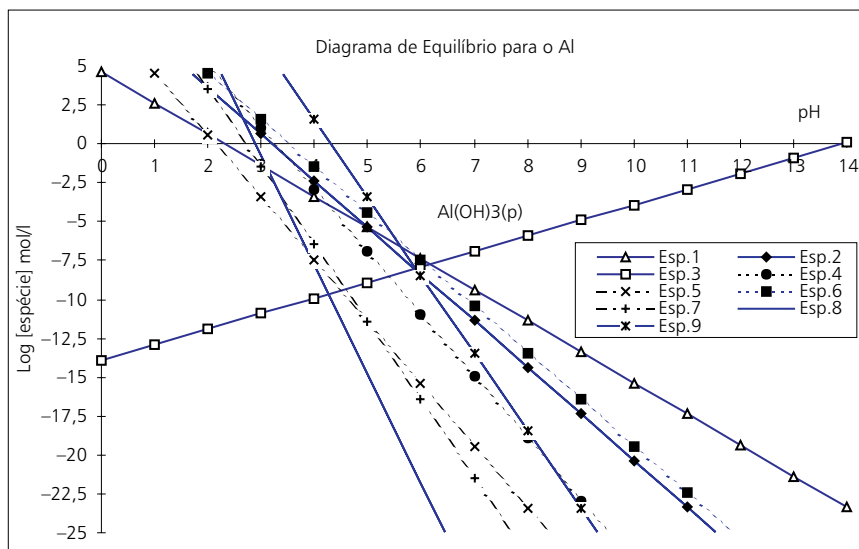
$$\text{Log} \left[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+} \right] = 21,56 - 5\text{pH}$$

$$\text{Log} \left[\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+} \right] = 13,05 - 4\text{pH}$$

$$\text{Log} \left[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+} \right] = 20,25 - 7\text{pH}$$

$$\text{Log} \left[\text{Al}_3(\text{OH})_4^{5+} \right] = 13,55 - 5\text{pH}$$

Conforme pode ser visto no diagrama da Figura 9.1, a concentração de cada espécie química em equilíbrio com o precipitado $\text{Al}(\text{OH})_3$ é função do pH e da dosagem de coagulante $[\text{Al total}]$.



em que:

Esp.1 = $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$	Esp.5 = $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$
Esp.2 = Al^{3+}	Esp.6 = $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$
Esp.3 = $\text{Al}(\text{OH})_4^-$	Esp.7 = $\text{Al}_3(\text{OH})_4^{5+}$
Esp.4 = $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$	Esp.8 = $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+}$
	Esp.9 = $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$

Figura 9.1 Diagrama de equilíbrio para o alumínio.

Admitindo-se que o alumínio contido no lodo esteja sob a forma de hidróxido $[\text{Al}(\text{OH})_3]$, é de se esperar que, para valores de pH abaixo de 4 e acima de 10, ocorra um incremento na fração solúvel (hidroxocomplexos) de Al, em detrimento dos

hidróxidos (consumo). Para o ferro, a representação gráfica das reações de equilíbrio entre as espécies solúveis e o precipitado está indicada na Figura 9.2. Na prática, para que se realize a recuperação de coagulantes em qualquer ETA, o lodo retirado dos decantadores deve ser exposto a pH inferiores a 2,0 ou superiores a 10,0, a fim de que haja solubilização das espécies de alumínio ou ferro que possuem potencial de coagulação.

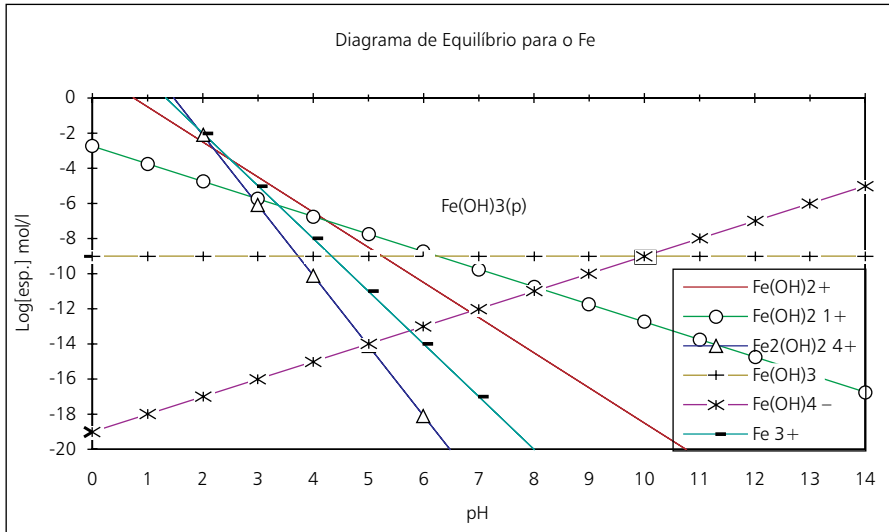


Figura 9.2 Diagrama de equilíbrio para o ferro.

9.2 Processos de Recuperação de Coagulantes

Quatro opções tecnológicas encontram-se disponíveis para que se realize a recuperação de coagulantes de lodos de ETAs: recuperação pela via ácida, recuperação pela via alcalina, extração com solventes orgânicos e extração com quelantes. Dentre elas, a que alcançou o maior desenvolvimento industrial foi a recuperação pela via ácida, contando com várias realizações em grande escala em países do hemisfério norte. Nos estudos com recuperação pelas vias ácida e alcalina realizados por Piotto,⁽¹¹⁾ na UFES, o coagulante recuperado alcalino não se mostrou eficiente devido à reprecipitação do alumínio. O coagulante recuperado pela via ácida apresentou bom desempenho quando testado como coagulante em águas residuárias, sendo que os demais processos de recuperação não foram estudados.

Recuperação de Coagulantes pela Via Ácida

A recuperação de coagulantes pela via ácida começou a ser estudada no final do século passado e desde então diferentes configurações foram testadas.⁽²⁾ Em 1974, surge o processo Fulton de recuperação de coagulantes de lodos contendo alumínio (Figura 9.3).⁽¹⁶⁾ Este processo consiste basicamente na adição de ácido sulfúrico ao lodo previamente desidratado, de maneira a transformar os hidróxidos de alumínio presentes em espécies químicas solúveis de alumínio.⁽²³⁾ O pH final é baixo (em torno de 2), com uma recuperação de coagulantes entre 50% e 75%.^(1,15,3) A solubilização pode ser representada pela reação:



Utilizando-se este processo, em 1975 foram instaladas no Japão estações de tratamento de água com sistemas de recuperação e reciclo dos coagulantes.⁽²⁾ Aparentemente, devido às impurezas metálicas contidas no ácido e ao baixo pH, o reciclo de coagulantes aumentou a concentração de metais pesados na água tratada; particularmente estanho, zinco e manganês.

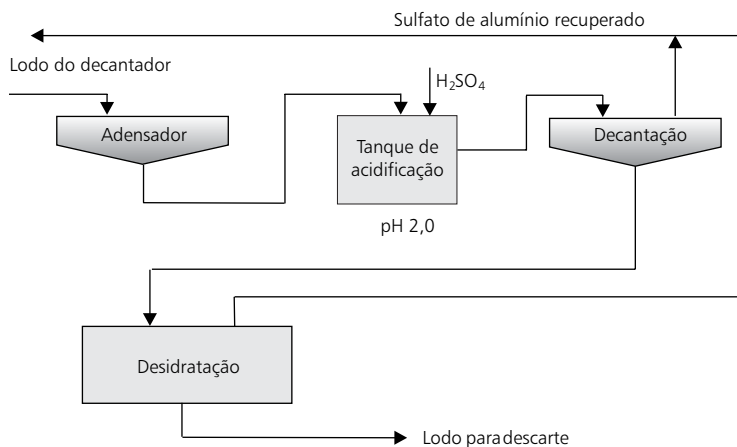


Figura 9.3 Processo Fulton.

Testes realizados na estação de tratamento de água de Williams, em Durham, EUA, realizando a recuperação de coagulantes pela via ácida mediante adição de H_2SO_4 (pH 2,0-2,1), resultaram em um consumo de 0,68 tonelada de ácido por tonelada de Al dissolvido, correspondendo a uma relação estequiométrica igual a 2. Como a relação estequiométrica teórica é igual a 1,5, a relação obtida na prática indica a existência de reações parasitas indesejadas. A percentagem de alumínio recuperada foi em média de

75%.⁽⁴⁾ Para alguns pesquisadores, o sulfato de alumínio recuperado é mais eficiente do que a solução de sulfato comercial, enquanto para outros este produto é menos eficiente do que uma solução de sulfato nova.⁽²⁾

A recuperação de coagulantes de lodos contendo hidróxido de ferro $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ via ácida parece ser mais complexa. Exige pH mais baixo, apresentando eficiências máximas de recuperação em torno de 50%. A redução do íon férrico (III) para íon ferroso (II) eleva o pH de solubilização, mas torna o processo bem mais oneroso devido ao consumo de produtos químicos redutores e oxidantes. O consumo de oxidantes é necessário, já que a forma final do ferro deve ser o Fe (III).⁽¹⁰⁾

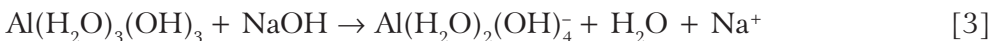
A separação dos compostos indesejáveis presentes no lodo submetido ao tratamento de recuperação, tais como os sólidos inertes e compostos orgânicos de cadeia molecular grande (responsáveis pela cor), pode ser realizada mediante filtração. Através da membrana só passam a água e as espécies inorgânicas solúveis. Apesar dos poucos dados obtidos, aparentemente os resultados obtidos através dessa técnica são favoráveis. Entretanto, a viabilidade econômica do processo ainda não foi comprovada, devido a alterações nas condições de fluxo através das membranas no tempo devido a sua colmatção.⁽²⁾

Recuperação de Coagulantes pela Via Alcalina

Este tipo de recuperação dos coagulantes presentes no lodo foi estudado por Masschelein et.al.⁽⁹⁾ e Piotto,⁽¹¹⁾ em ensaios de laboratório. Neste processo também há a solubilização dos hidróxidos, e os compostos solúveis de alumínio são os aluminatos. A reação de solubilização do Al para este tipo de recuperação é a seguinte:



Somando-se [1] e [2], obtém-se:



Masschelein et.al.⁽⁹⁾ testaram dois álcalis $[\text{NaOH}$ e $\text{Ca}(\text{OH})_2]$ com pH final oscilando entre 11,4 e 11,8. Os resultados obtidos indicaram que o uso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reduz em 10% a 15% o teor de metais pesados na solução. No entanto, os teores recuperados dos coagulantes formam em média 25%, enquanto os valores solubilizados com NaOH ficaram em torno de 80%. Testes realizados nos EUA mostraram que a matéria orgânica presente no lodo é mais solúvel em pH alcalino e que o coagulante recuperado não apresentou poder de coagulação satisfatório.⁽²⁾ Os resultados de Piotto⁽¹¹⁾ indicaram a perda paulatina do potencial de coagulação dos coagulantes recuperados em meio fortemente alcalino. Apesar de elevadas eficiências de

solubilização de alumínio nos testes de recuperação (> 70%), uma grande instabilidade dos aluminatos ao longo do tempo ficou evidenciada, através de sua precipitação na forma de sais insolúveis.

Recuperação de Coagulantes via Extração com Solventes Orgânicos

Neste processo, a técnica utilizada consiste na extração seletiva do alumínio previamente solubilizado através de processo líquido-líquido, com extrator orgânico (ácidos alquil-fosfóricos) e solventes. Estes últimos são os diluentes que promovem as condições ideais para atuação e efetividade do extrator. Os solventes mais utilizados são: querosene, tolueno, hexano etc. A retirada do alumínio solubilizado do meio é feita basicamente em duas etapas: extração e *stripping*.

Os estudos efetuados em laboratório para este tipo de recuperação mostraram que é possível obter produtos bem mais puros.⁽⁶⁾ Entretanto, as dificuldades operacionais encontradas para evitar o carreamento do solvente orgânico foram grandes. Como conseqüência, foi necessária a construção de unidades extras para evitar este arraste, o que dificulta, do ponto de vista econômico, sua utilização em grande escala.⁽¹⁷⁾

Recuperação por Complexação/Quelação

Outra opção para a retirada seletiva de alumínio (já solubilizado) consiste na formação de quelatos.⁽¹⁷⁾ Neste processo, membranas orgânicas compostas de esferas de polímeros quelantes, tendo por matriz (10%) politetrafluoretileno para sua fixação, são imersas no lodo acidificado até pH em torno de 3,5. Devido à seletividade deste tipo de polímero, o Al é prioritariamente adsorvido, em detrimento de outros cátions metálicos. A dessorção do Al⁺⁺⁺ retido na membrana é feita mergulhando-a em uma solução contendo de 2% a 10% de ácido sulfúrico. Este processo não foi testado em escala-piloto ou industrial e não se têm dados quanto aos custos envolvidos. Aparentemente, a contaminação com metais é eliminada.

9.3 Recuperação pela Via Ácida – Experimentos Realizados pela UFES

Características das ETAs e dos Lodos Estudados

Nos experimentos realizados pela equipe do Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFES foram estudadas ETAs que tratam águas com características distintas (rios e lagoa) e que produzem lodos com teores de alumínio variados. Buscou-se, dessa forma, relacionar suas características físico-químicas com o potencial de recuperação de coagulantes.

Na etapa inicial da pesquisa, conduzida por Piotto,⁽¹¹⁾ a influência de fatores como a concentração de sólidos no lodo, o pH, o gradiente de mistura e a via de recuperação (ácida ou alcalina) foi estudada. Na seqüência da pesquisa, aspectos relacionados com a qualidade da água sob tratamento e a qualidade do lodo foram estudados. Nesta última etapa, duas campanhas de amostragem do lodo foram realizadas: uma durante a estação chuvosa (novembro/dezembro) e outra durante o período de seca (agosto), devido as alterações das características da água bruta e da dosagem de coagulante. As principais características da água bruta na época da amostragem e a dosagem de sulfato estão apresentadas na Tabela 9.3.

Tabela 9.2 Características das ETAs estudadas.

ETAs	Manancial	Processo de Tratamento	Vazão
Aracruz	Rio	Coagulação/floculação, decantação, filtração, fluoretação, cloração	150 L/s
Linhares	Rio/Lagoa	Coagulação/floculação, decantação, filtração, fluoretação, cloração	180 L/s
Colatina	Rio	Coagulação/floculação, decantação, filtração, fluoretação, cloração	130 L/s
Itapemirim	Rio	Coagulação/floculação, decantação, filtração, fluoretação, cloração	120 L/s
Gomes	Lagoa	Coagulação/floculação, decantação, filtração, cloração	50 L/s

Tabela 9.3 Características da água bruta na época da coleta do lodo (médias diárias).

Parâmetro	Data	Aracruz	Linhares	Colatina	Itapemirim	Gomes
Turbidez (NTU)	Nov/96	73	200	223	230	2
	Dez/96	22	72	228	37	2
	Ago/97	10	10	10	21	1
Cor aparente (UC)	Nov/96	315	329	-	400	115
	Dez/96	146	133	-	100	115
	Ago/97	60	24	12	34	95
Dose sulfato (mg/l)	Nov/96	18,4	18,2	32,7	29,6	31,4
	Dez/96	12,0	22,0	32,9	28,3	32,0
	Ago/97	9,0	15,0	17,0	11,0	25,0

Comparando os meses de novembro e agosto, as características da água bruta apresentaram alterações significativas de turbidez e cor, em decorrência de chuvas no período. A exceção foi a ETA de Gomes, onde as alterações nas características da água não foram significativas. Os lodos das ETAs apresentaram características distintas em função dos diferentes mananciais de águas utilizados pelas estações de tratamento. As

características físico-químicas dos lodos coletados no período de chuvas e no período seco estão mostrados nas Tabelas 9.4 e 9.5.

Tabela 9.4 Características dos lodos coletados no período de chuva (nov-dez/96).

	Aracruz	Linhares	Colatina	Itapemirim	Gomes
Sol. totais	13,6%	5,6%	8,2%	12,7%	1,2%
Sólidos fixos	80,0% ST	87,8% ST	85,7% ST	80,8% ST	29,3% ST
Sol. voláteis	22,0% ST	12,2% ST	14,2% ST	19,23% ST	70,7% ST
Al total	19,0% SF 20.674 mg/L	20,2% SF 9.930 mg/L	17,9% SF 12.611 mg/L	19,0% SF 19.483 mg/L	27,7% SF 982 mg/L
Ferro total	7,8% SF	9,9% SF	9,8% SF	8,1% SF	8,5% SF

Tabela 9.5 Características dos lodos coletados no período de seca (ago/97).

	Aracruz	Linhares	Colatina	Itapemirim	Gomes
Sol. totais	4,0%	1,0%	6,1%	12,0%	0,3%
Sólidos fixos	73,8% ST	77,3% ST	76,1% ST	82,4% ST	27,4% ST
Sol. voláteis	26,1% ST	22,7% ST	23,9% ST	17,6% ST	72,6% ST
COT	6,2% ST	7,3% ST	4,7% ST	3,8% ST	32,7% ST
Alumínio total	19,2% SF 5678 mg/L	20,3% SF 1616 mg/L	19,5% SF 8928 mg/L	17,7% SF 17042 mg/L	27,1% SF 192 mg/L
Ferro total	13,5% SF	8,4% SF	9,1% SF	7,3% SF	13,1% SF

Os valores determinados de alumínio e ferro são mais elevados no caso da campanha de nov-dez/96, provavelmente devido ao maior teor de sólidos totais nos lodos e pela utilização de dosagens maiores de coagulantes, em função do período chuvoso, quando as ETAs precisam adequar seu processo operacional às alterações das características da água bruta a ser tratada. O ferro é um dos constituintes do sulfato de alumínio comercial, cuja presença interfere significativamente na determinação da quantidade de alumínio através de balanço de massa.

Pode-se observar variações sazonais significativas em relação ao teor de sólidos totais e de sólidos voláteis na maioria dos lodos amostrados (Figura 9.4). No período de seca, a fração de sólidos voláteis é maior do que na época de chuvas, quando aumenta a turbidez da água bruta e, portanto, o teor de sólidos totais. O lodo da ETA de Gomes, cujo manancial é uma lagoa, apresenta valores de sólidos voláteis bem superiores aos demais em função da quantidade de matéria orgânica existente neste tipo de água. Os valores de COT encontrados confirmam estes dados e fornecem resultados bem mais precisos sobre a quantidade de matéria orgânica presente nas amostras.

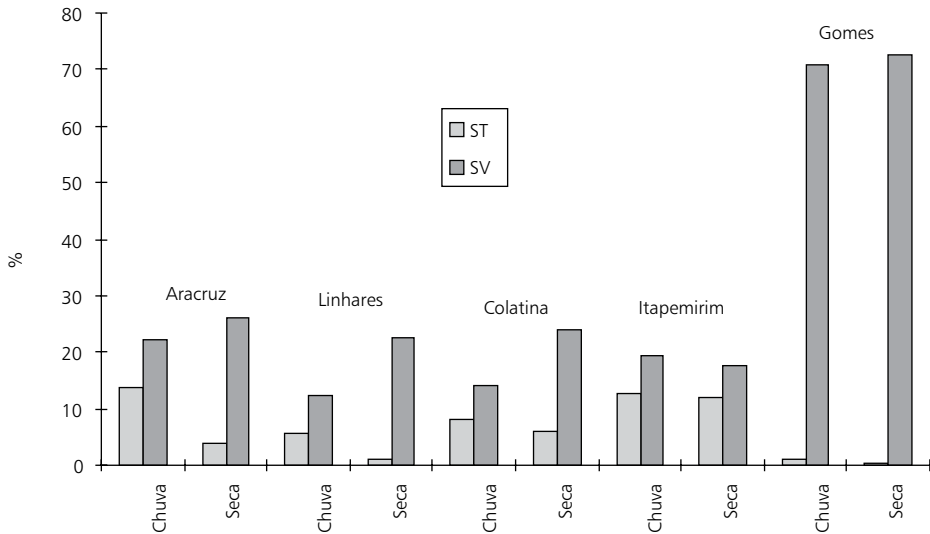


Figura 9.4 Influência da sazonalidade (período de chuvas/seca) nas características dos lodos (ST – sólidos totais, SV – percentagem de sólidos voláteis nos sólidos totais).

Influência das Características do Lodo e da Água Bruta na Recuperação de Coagulantes dos Lodos

Os ensaios foram executados em aparelho de *Jar-test* com 6 cubetas de 1.000 mL e velocidade variável de 0-250 rpm. A solubilização ácida foi realizada mediante adição de H_2SO_4 cc na relação molar de H_2SO_4/Al igual a 1,5 para os lodos coletados na primeira campanha de amostragem (nov.-dez./96). Para lodos coletados na segunda campanha, a solubilização foi feita através da adição controlada de ácido até que valores de pH em torno de 2 fossem atingidos. Volumes de 1.000 mL de amostra de lodo *in natura* foram homogeneizados por cerca de 2 horas, seguido da adição ácida. Após um período de agitação de 20 minutos, as amostras foram decantadas e os sobrenadantes foram filtrados para a determinação dos teores de alumínio.

Os resultados mostraram que as variações na qualidade da água bruta influenciam decisivamente nas características físico-químicas dos lodos (Tabelas 9.5 e 9.6) e, conseqüentemente, também na fração de alumínio solubilizada (Tabelas 9.6 e 9.7). A maior quantidade de alumínio solubilizada foi observada no lodo da ETA de Gomes (96,1%), que capta água em uma lagoa cujas águas possuem elevados teores de matéria orgânica. Os baixos valores de alumínio solubilizado nos lodos provenientes de água bruta com elevada turbidez sugerem que a maior parte do alumínio presente se encontra na forma complexada/adsorvida e a predominância durante a coagulação do mecanismo de adsorção de cargas/neutralização.⁽⁷⁾

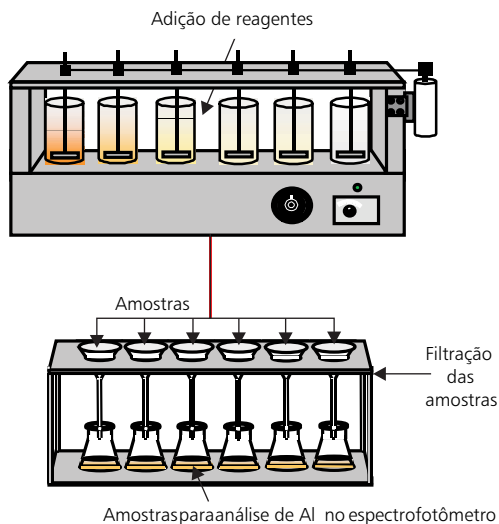


Figura 9.5 Aparato experimental para os testes de recuperação de coagulantes.

Tabela 9.6 Ensaio de solubilização com os lodos coletados no período de chuva

Lodo	Al Total (mg/L)	Alumínio Dissolvido (mg/L)	pH	% Al Solub.	H ₂ SO ₄ cc Adicionado (mL)
Aracruz	10.337	1.698	1,8	16,4	6,5
Linhares	9.930	505	1,5	5,1	5
Colatina	12.611	1.093	1,2	8,7	5
Itapemirim	9.742	1.738	1,8	17,8	7,5
Gomes	982	944	1,7	96,1	3,5

Os resultados mostram claramente que a capacidade de recuperação dos coagulantes contidos nos lodos está diretamente relacionada à presença de hidróxidos precipitados. Quanto maior o teor de hidróxidos de alumínio no lodo, maior será o potencial de recuperação dos coagulantes através do processo de recuperação ácida. Na Tabela 9.8 são apresentadas as relações turbidez/dosagem, os potenciais de regeneração (recuperação de coagulantes) e as porcentagens de solubilização de alumínio nos lodos estudados.

Tabela 9.7 Ensaio de solubilização com os lodos coletados no período de seca

Lodo	Al Total (mg/L)	Fe Total (mg/L)	Al Dissolv. (mg/L)	Fe Dissolv. (mg/L)	% Al Solub.	% Fe Solub.	pH	Ácido (mL)
Aracruz	5.678	3.996	2.180	2.360	38,4	59,1	1,6	3
Colatina	7.142	3.325	3.180	1.218	44,5	36,6	1,5	8
Itapemirim	6.135	2.538	1.460	1.360	23,8	53,6	1,0	10
Gomes	192	94	180	86	93,7	91,5	1,5	1
Linhares	1.616,4	671,7	260	118	16,1	17,6	1,1	3

Tabela 9.8 Relações turbidez/dosagem de Al, teores de sólidos no lodo, potencial de recuperação e quantidade de Al recuperado.

Origem do Lodo	Relação Turbidez/ Dosagem de Al	ST no Lodo Adensado	Potencial de Recuperação	% Al Recuperado
Aracruz (seca)	1,10	4,0%	médio	38,4
Aracruz (chuva)	6,00	13,6%	médio	16,4
Linhares (seca)	0,67	*1,0%	médio	16,1
Linhares (chuva)	10,00	5,6%	baixo	5,1
Colatina (seca)	0,62	6,1	médio	44,5
Colatina (chuva)	6,80	8,2%	baixo	8,67
Itapemirim (seca)	1,91	12,0%	médio	23,8
Itapemirim (chuva)	4,53	12,7%	médio	17,8
Gomes (seca)	0,04	0,26%	grande	93,8
Gomes (chuva)	0,06	1,2%	grande	96,1

*O decantador fôra limpo antes da coleta e houve dificuldade para coletar amostra de lodo mais concentrada.

As relações apresentadas mostram que, quanto menor a relação entre a turbidez e a dosagem de coagulante, maior serão a percentagem de Al recuperada e o potencial de recuperação de coagulantes. Correlacionando-se a fração turbidez/dosagem de coagulante e as frações de alumínio recuperadas nas diversas amostras de lodo, observa-se um comportamento bastante previsível dos lodos diante da recuperação do alumínio (Figura 9.6). A figura mostra que, com o valor do quociente entre a turbidez da água bruta e a dosagem de sulfato utilizada no tratamento, pode-se prever que fração de alumínio presente no lodo será passível de solubilização.

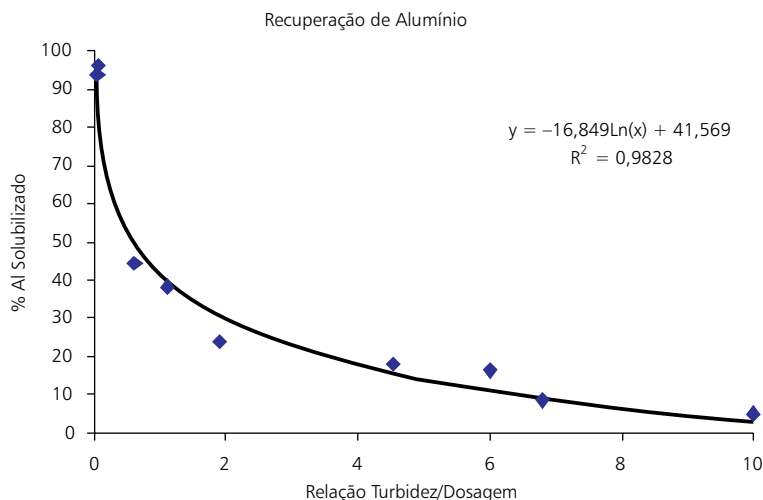


Figura 9.6 Relação turbidez/dosagem e o percentual de alumínio solubilizado.

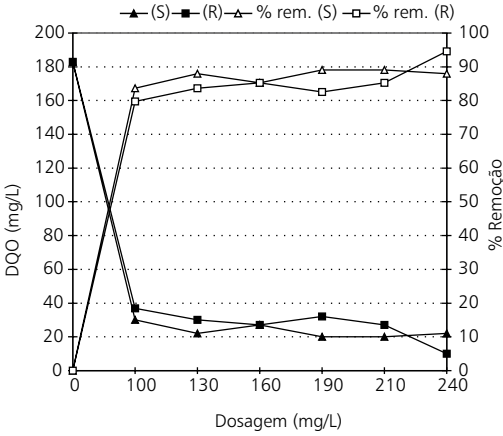
Utilização dos Coagulantes Recuperados

Os coagulantes regenerados foram testados no tratamento físico-químico dos seguintes efluentes e águas: esgoto bruto, efluente de lagoa facultativa, efluente de indústria têxtil, efluente de usina de beneficiamento de minério de ferro, efluente de oficina de manutenção de locomotivas, efluente de lavanderia industrial, água com cor elevada e água com turbidez elevada. Os resultados obtidos mostraram que a eficiência apresentada pelo coagulante regenerado nos testes de jarros foi similar a do sulfato de alumínio comercial. Alguns exemplos dos testes de utilização dos coagulantes recuperados são apresentados pelas Figuras 9.7, 9.8, 9.9 e 9.10, e encontram-se disponíveis com maiores detalhes em Gonçalves et al.⁽⁷⁾

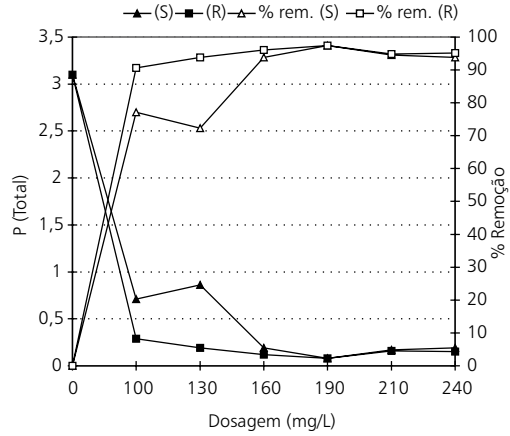
Pelos resultados obtidos com os ensaios para lagoa facultativa, valo de oxidação e esgoto bruto, verifica-se o atendimento a padrões de lançamentos de efluentes para sistemas de tratamento secundário, observados pelo Estado de Minas Gerais (Copam – Conselho de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais – Deliberação Normativa nº 10 de 1986), em termos dos parâmetros DQO e SS. Resultados de DQO inferiores a 90 mg/L e teores de SS menores que 30 mg/L foram obtidos. Valores menores que 1 mg/L de fósforo total foram verificados na totalidade dos ensaios, atendendo a padrões restritivos adotados, por exemplo, no DF.

Esgoto Bruto

(a) Redução de DQO



(b) Remoção de fósforo



(c) Remoção de sólidos suspensos

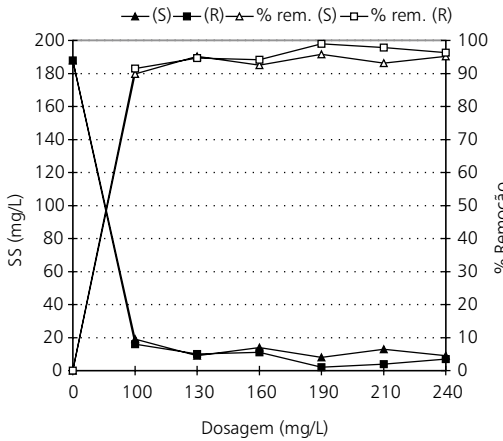


Figura 9.7 Resultados dos ensaios de jarros para esgoto bruto. (S) sulfato, (R) regenerado, %(S) remoção sulfato, %(R) remoção regenerado.

9.4 Noções de Custos

Com o propósito de estudar a viabilidade econômica da recuperação de sulfato de alumínio a partir de lodos de ETAs, foram consideradas Estações de Tratamento de Águas e Esgotos para populações de 5.000, 10.000, 20.000 e 50.000 habitantes, tendo a análise econômica levado em consideração tanto a redução na demanda de coagulantes quanto a redução no volume de lodo produzido.

Foram avaliadas as possibilidades de integração de um reator de solubilização no fluxograma de uma ETA completa e a reciclagem do coagulante, como possível insumo

na potabilização de águas e na depuração de esgoto doméstico tratado através de Lagoa de Estabilização. Foi concebido um reator tipo batelada, que integrou no mesmo volume reacional as três fases fundamentais do processo de recuperação: adensamento dos lodos provenientes dos decantadores, reação de solubilização dos cátions metálicos e clarificação quando integrado a uma ETA e apenas as etapas de adensamento e solubilização quando utilizado em uma ETE.

Efluente de Lagoa de Estabilização Tipo Facultativa

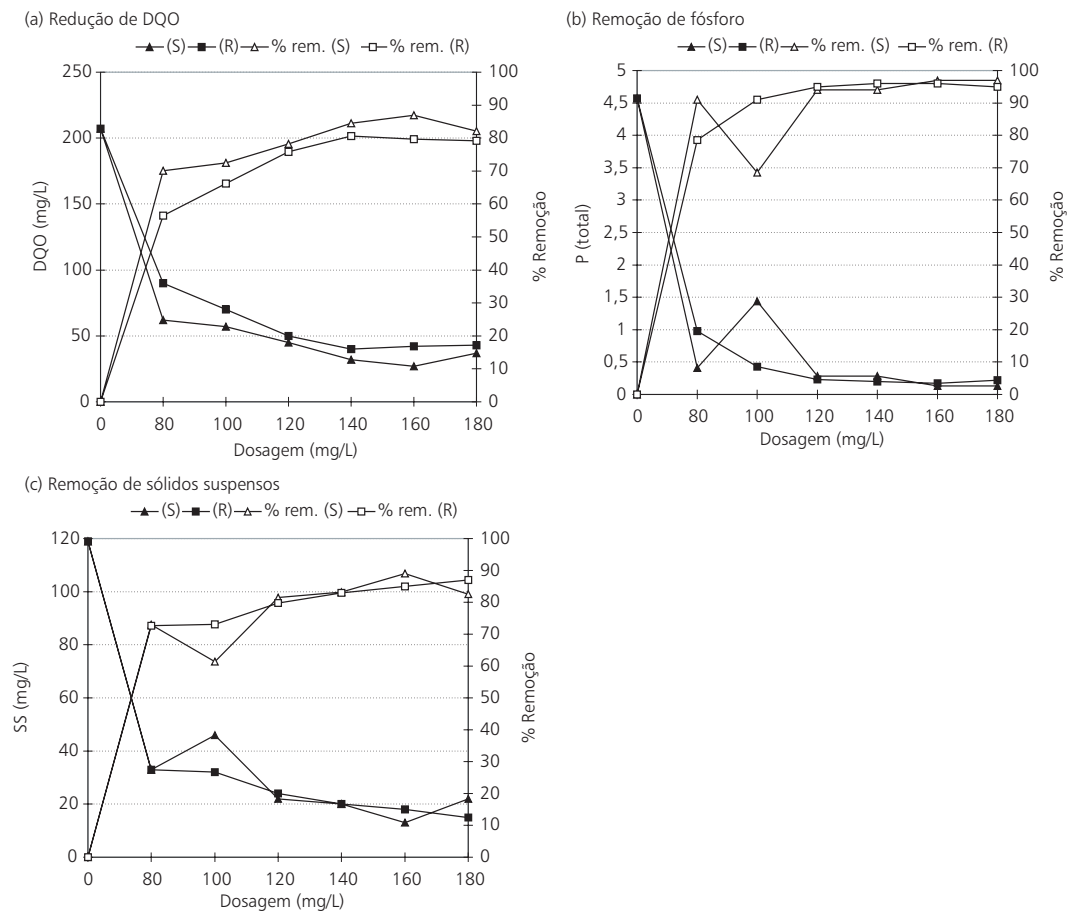


Figura 9.8 Resultados dos ensaios de jarros para lagoa facultativa. (S) sulfato, (R) regenerado, %(S) remoção/sulfato, %(R) remoção/regenerado.

Lavanderia Industrial

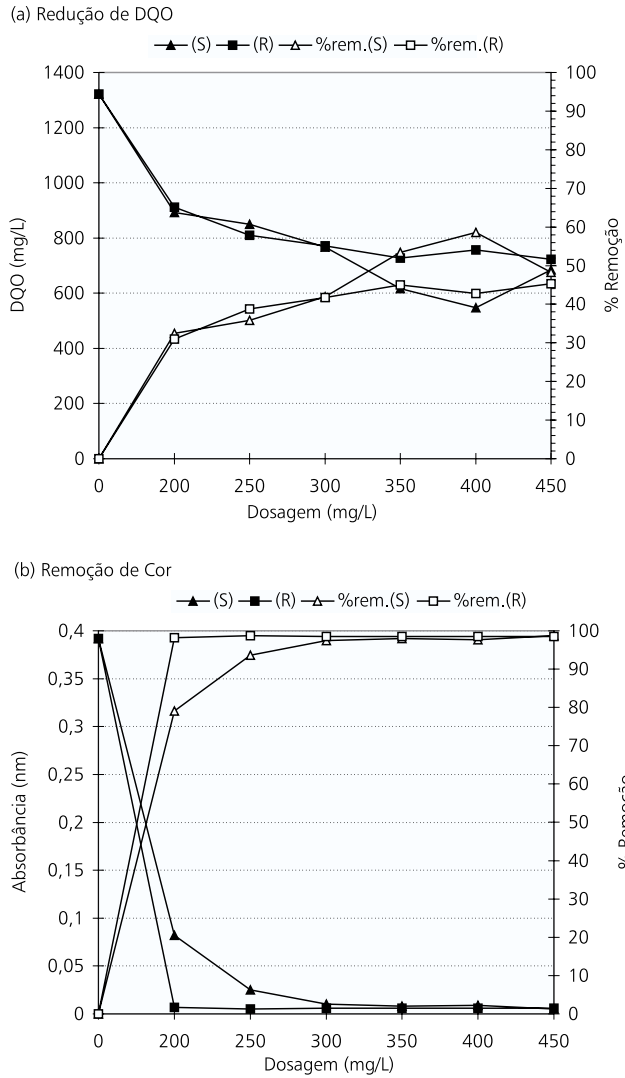
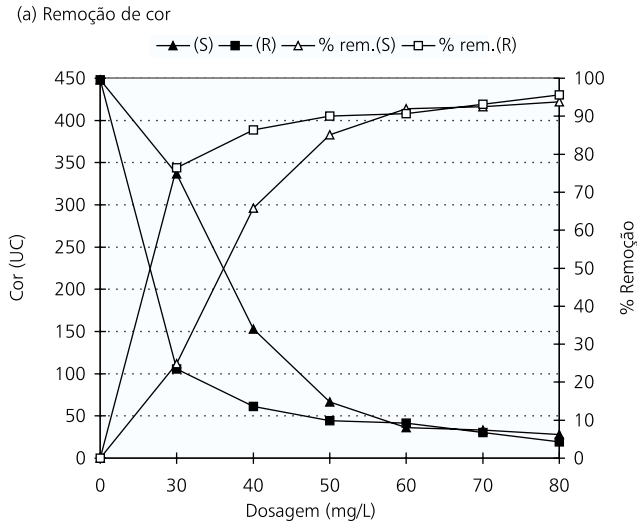


Figura 9.9 Resultados dos ensaios de jarros para lavanderia. (S) = sulfato, (R) = regenerado, %(S) = remoção/sulfato, %(R) = remoção/regenerado.

Água Com Cor Elevada



Água Com Turbidez Elevada

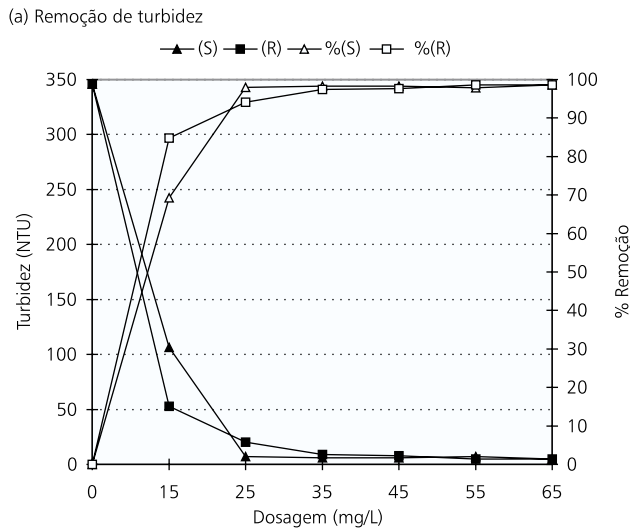


Figura 9.10 Resultados dos ensaios de jarros para água com cor e turbidez elevadas. (S) = sulfato, (R) = regenerado, %(S) = remoção/sulfato, %(R) = remoção/regenerado.

Situações Estudadas

- Situação 1 : Não há recuperação de coagulantes na ETA e o lodo após adensamento é enviado a um leito de secagem para desidratação e posterior disposição em aterro.
- Situação 2 : O lodo de ETA é enviado para um reator tipo batelada, onde as etapas de adensamento, solubilização e decantação irão se processar. Após a recuperação, o sobrenadante é encaminhado para um tanque de estocagem/dosagem de regenerado para reutilização. O lodo remanescente após desidratação em leito de secagem ou centrífuga é, em seguida, disposto em aterro.
- Situação 3 : O lodo de ETE após tratamento físico-químico com sulfato de alumínio é enviado para o leito de secagem onde será desidratado e encaminhado para aterro.
- Situação 4 : O lodo após ser regenerado na ETA é transportado para a ETE e utilizado sem a separação dos sólidos no efluente da lagoa de tratamento de esgoto. O lodo produzido após adensamento e desidratação em leito de secagem é disposto em aterro.

As principais considerações realizadas no estudo foram as listadas na Tabela 9.10.

Nas Tabelas 9.11 e 9.12 são mostradas as quantidades de lodo produzidos nas ETAs e ETEs, o consumo de produtos químicos e a produção de regenerado.

As Tabelas 9.11 e 9.12 mostram os dados de consumo dos produtos químicos, no caso da utilização apenas de sulfato e de sulfato mais regenerado, quando a quantidade de coagulante recuperado não é suficiente para suprir a demanda necessária para o tratamento de água e efluente. A quantidade de lodo após a recuperação foi reduzida em 37%, fazendo com que o tamanho das unidades de tratamento também fosse reduzido. O acréscimo na produção de lodo, no caso das ETEs, é compensado pelos benefícios do tratamento físico-químico e pelo fato de a estação de tratamento de esgoto normalmente já dispor de um sistema de tratamento de lodo. A Tabela 9.13 apresenta a análise do investimento para as situações consideradas.

Para as situações S1 e S3 não há retorno do investimento devido à consideração feita de que o custo para estes casos seria zero, já que não há recuperação de coagulantes e economia de sulfato, bem como instalação de unidades ligadas ao processo de recuperação. Embora o custo do investimento e o custo operacional sejam proporcionais ao tamanho das estações, para estações maiores o retorno do investimento é mais rápido e os custos operacionais deverão diminuir com a economia de coagulantes. Nas situações S1 e S3, não há retorno de investimento e o custo operacional não diminui, pois não há recuperação de coagulante e, portanto, não existe economia de sulfato, bem como redução no tamanho das unidades de tratamento de lodo. Para estações de

porte maior, o investimento inicial é maior para a situação S2* (centrífuga) do que para a S2 (leito de secagem), no entanto o retorno é mais rápido em função da redução dos custos com a centrífuga, o que não ocorre no caso do leito de secagem.

Tabela 9.10 Considerações realizadas no estudo de viabilidade econômica.

Consumo percapta	150 L/hab.dia
Características da água bruta	Turbidez – 10 UT / Dosagem de sulfato – 40 mg/L Relação turbidez/dosagem – 0,25
Dosagem de sulfato para a ETE	100 mg/L ⁽¹³⁾
Recuperação de coagulantes	65,6%
Redução do volume de lodo após recuperação	37% ⁽⁴⁾
Lodo produzido na ETA	1% do volume da água bruta (descarga diária)
Lodo produzido na ETE	35 mL/L com sulfato/56 mL/L com regenerado ⁽¹³⁾
Unidades de desidratação de lodos	Leito de secagem e centrífuga
Taxas de aplicação de lodo para os leitos de secagem	20 kg/m ² para ETEs/35 kg/m ² para ETAs
Taxa de aplicação de polieletrólito	5 kg/ton.
Concentrações de sólidos	2% para o lodo dos decantadores/6% para o lodo adensado/35% para o lodo disposto em aterro
Custo de produtos químicos	Sulfato – 0,55 R\$/kg/Ácido sulfúrico – 0,89 R\$/kg/Polieletrólito – 10,00 R\$/kg
Custo de transporte e disposição	Lodo de ETA – 4,25 R\$ m ³ /mês/Lodo seco – 55,00 R\$ ton./mês (já incluído custo de disposição em aterro classe 2)
Custo das estações de tratamento	O custo das ETAs e ETEs foi admitido como zero, sendo computado apenas os custos das instalações de tratamento transporte e disposição de lodos
Vida útil das instalações	20 anos

Os resultados da aplicação do modelo econômico mostraram que, no caso de cidades com populações de 20.000 e 50.000 habitantes, a recuperação do coagulante sulfato de alumínio de lodos de ETAs e sua posterior reutilização é economicamente viável, se considerarmos as premissas adotadas para o modelo estudado. O investimento deverá ser pago em poucos anos e a economia com coagulantes torna-se significativa, diminuindo os custos operacionais e viabilizando a recuperação de coagulantes como alternativa para o tratamento e disposição destes resíduos.

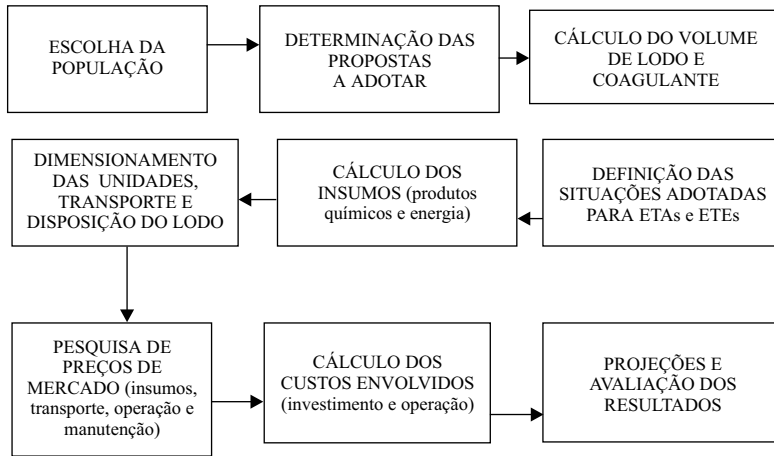


Figura 9.11 Fluxograma das etapas desenvolvidas no estudo econômico.

Tabela 9.11 Consumo de produtos químicos para as ETAs e produção de lodo.

População (hab.)	5.000	10.000	20.000	50.000
Lodo produzido com uso de sulfato (ton./dia)	0,18	0,36	0,72	1,80
Lodo após recuperação (ton./dia)	0,11	0,23	0,45	1,13
Consumo apenas de sulfato/total (kg/dia)	36,00	72,00	144,00	360,00
Produção de regenerado (kg/dia)	23,59	47,18	94,36	235,90
Consumo de sulfato com regenerado (kg/dia)	12,41	24,82	49,64	124,10

Tabela 9.12 Consumo de produtos químicos e produção de lodo para as ETEs.

População (hab.)	5.000	10.000	20.000	50.000
Lodo produzido com uso de sulfato (ton./dia)	0,38	0,77	1,51	3,78
Lodo prod. com uso de sulf. e reg. (ton./dia)	0,56	1,13	2,42	5,62
Consumo apenas de sulfato (kg/dia)	72,00	144,00	288,00	720,00
Consumo de regenerado (kg/dia) (37%)	23,59	47,18	94,36	235,90
Consumo de sulfato com reg. (kg/dia) (63%)	48,41	96,24	193,64	484,09

Tabela 9.13 Análise de investimento para as populações consideradas.

População (habitantes)		Custos (R\$/mês)				Retorno do investimento
		Investimento	Operacional	Sulfato	Regenerado	
5.000	S1	22.127,80	1.526,95	594,00	-	-
	S2	24.442,00	1.985,57	204,77	1.698,48	5 anos e 3 meses
	S2*	69.462,80	4.216,80	204,77	4.118,81	14 anos e 10 meses
	S3	19.008,00	2.755,40	1.188,00	-	-
	S4	49.713,40	5.377,47	798,77	5.194,52	10 anos e 8 meses
10.000	S1	38.092,80	2.727,50	1.188,00	-	-
	S2	39.761,20	3.506,46	409,53	2.887,42	4 anos e 3 meses
	S2*	74.802,80	5.167,71	409,53	4.699,13	8 anos
	S3	38.016,00	5.530,80	2.376,00	-	-
	S4	85.466,20	10.041,09	1.597,52	9.624,72	9 anos e 2 meses
20.000	S1	78.812,80	5.710,70	2.376,00	-	-
	S2	66.609,60	6.088,67	819,06	4.812,36	3 anos e 7 meses
	S2*	81.692,80	6.875,36	819,06	5.661,60	4 anos e 4 meses
	S3	76.032,00	11.045,10	4.752,00	-	-
	S4	153.181,80	12.823,93	3.195,06	11.917,67	8 anos e 2 meses
50.000	S1	180.907,80	13.441,76	5.940,00	-	-
	S2	140.894,80	13.909,58	2.047,49	10.615,95	3 anos
	S2*	96.102,80	11.689,25	2.047,49	8.209,67	2 anos e 1 mês
	S3	190.080,00	27.621,00	11.880,00	-	-
	S4	350.068,60	46.196,61	7.987,50	43.737,71	7 anos e 6 meses

(S1) – situação 1; (S2) – situação 2 com leito de secagem; (S2*) – situação 2 com centrífuga; (S3) – situação 3; (S4) – situação 4.

Acredita-se que reatores em batelada não seriam ideais para estações de grande porte devido aos custos com manuseio do lodo e dimensões das unidades. Neste caso, processos de recuperação em regime contínuo deveriam ser avaliados. O modelo adotado para a avaliação da viabilidade econômica de utilização de regenerado foi baseado em dados de literatura e em dados experimentais obtidos em pesquisas de laboratório. Nestas condições, estes resultados devem ser considerados como uma referência para outros estudos, em que as condições a serem estudadas deverão ser específicas para cada situação. Outro fator que deve ser levado em consideração são as legislações cada vez mais exigentes e restritivas, relativas ao gerenciamento deste tipo de resíduo, que fazem com que determinadas alternativas de tratamento e disposição sejam implementadas, independente dos custos a elas relacionados.

9.5 Referências Bibliográficas

1. AWWA RESEARCH FOUNDATION (1978). Water treatment plant sludges: an update of the state of the art. *Journal AWWA*, Denver, p.498-502, Sep.
2. AWWA RESEARCH FOUNDATION (1987). Water treatment plant waste management. *Journal AWWA*, Denver.
3. BISHOP, S.L. (1978). Alternative processes for treatment of water plant waster. *Journal AWWA*, Denver, p.503-506, Jun.
4. BISHOP, S.M. et al. (1987). Testing of alum recovery for solids reduction and reuse. *Journal AWWA*, Denver, p.76-83, Jun.
5. CORDEIRO, J.S. (1981). *Disposição, tratabilidade e reuso de lodos químicos de estações de tratamento de água*. 1981. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
6. DHAGE, S.S. et al. (1985). Recovery of Alum from Water Treatment Plant Sludge by Liquid ION Exchange (LIE) Technique. *Journal IWWA*, v.17, n.2, p.193-199, April-June.
7. GONÇALVES, R.F.; PIOTTO, Z.C.; RESENDE, M.B. (1997). Influência dos mecanismos de coagulação da água bruta na reciclagem de coagulantes em lodos de estações de tratamento de água. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., Foz do Iguaçu, 1997. *Anais*. Foz do Iguaçu, ABES. p.1353-1363.
8. GONÇALVES, R.F. (1998). Projeto de pesquisa realizado pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFES – Programa Nacional de Pesquisa em Saneamento Básico (Prosab) da Finep/CNPq (edital 01/96), núcleo temático nº 4: Subprojeto 2: Recuperação de coagulantes de lodos de ETAs para reutilização no tratamento de águas e efluentes.
9. MASSCHELEIN, W.J.; DEVLEMINCK, R.E.; GENOT, J. (1985). The feasibility of coagulant recycling by alkaline reaction of aluminium hydroxide sludges. *Water Resources*, v.19, n.11, p.1363-1366.
10. PIGEON, P.E. et al. (1978). Recovery and reuse of iron coagulants in water treatment. *Journal AWWA*, Denver, p.397-403, Jul.
11. PIOTTO, Z.C. (1995). *Regeneração do potencial de coagulação de lodos químicos de estações de tratamento de águas para reutilização no tratamento físico-químico de diferentes tipos de águas residuárias*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo.
12. PIOTTO, Z.C.; RESENDE M.B.; GONÇALVES R.F. (1997). Alternativas para tratamento e disposição final dos lodos químicos gerados na potabilização de águas. In: ASSEMBLÉIA NACIONAL DA ASSEMAE, Brasília, p.35-46.

13. ROCHA, M.L. de A.F. et al. (1998). Remoção de algas, DQO, fósforo e coliformes do efluente de lagoas facultativas através de coagulação, floculação e decantação. Vitória: UFES. /Resumo de trabalho técnico apresentado ao 20º CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1999.
14. SAUNDERS, M.F.; RANDALL, C.S. (1998). Aluminum Reclamation by Acidic Extraction Of Aluminum-anodizing Sludges. *Journal WPCF*, v.60, n.3, p.369-378, March.
15. WESTERHOFF, G.P.; DALY, M.P. (1974). Water treatment – plant waster disposal: part 2. *Journal AWWA*, Denver, p.379-385, jun.
16. FULTON, G.P. (1974). Recover Alum to Reduce Waste – Disposal Costs. *Journal AWWA*, p.312-318, May.
17. SENGUPTA, A.K.; SHI, B. (1992). Selective Recovery From Clarifier Sludge. *Journal AWWA*, p.96-103, Jan.