



**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DO USO DE GEOSSINTÉTICO PARA O  
DESÁGÜE E GEOCONTENÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

**KARLA MARIA CYPRIANO PIEPER**

**PORTO ALEGRE -RS**

**2008**

KARLA MARIA CYPRIANO PIEPER

**AVALIAÇÃO DO USO DE GEOSSINTÉTICO PARA O  
DESÁGÜE E GEOCONTENÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

“DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE  
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL,  
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA. ORIENTADOR:  
PROF. FERNANDO SCHNAID

PORTO ALEGRE

2008

KARLA MARIA CYPRIANO PIEPER

**AVALIAÇÃO DO USO DE GEOSSINTÉTICO PARA O  
DESÁGÜE E GEOCONTENÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA - Área do Meio Ambiente, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 12 de Setembro de 2008.

---

**Prof. Dr. Fernando Schnaid**  
University of Oxford  
Orientador

---

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Fernando Schnaid**  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

---

**Prof. Fernando Schnaid**  
Dr. pela University of Oxford

---

**Prof. Nilo César Consoli**  
Dr. pela Concordia University, Canadá

---

**Prof. Leandro de Moura Costa Filho**  
Dr. pela University College of London

---

**Prof. Sandro Sandroni**  
Diretor GEOPROJETOS engenharia

Dedico à pessoa mais importante da minha vida,  
Luísa Cypriano Pieper, que assim espero, haverá de  
concordar que o melhor e maior tesouro que se pode  
acumular na vida é o conhecer.

## **AGRADECIMENTOS**

**À Universidade:**



**À Empresa:**



**Ao orientador:**

Fernando Schnaid, PhD., UFRGS

**Aos professores da UFRGS:**

Prof<sup>a</sup>. Karla Heineck

Prof. Nilo César Consoli

**Aos profissionais da CORSAN:**

Abrão de Farias, Anderson Bonin dos Santos, Áurea Teresinha Giordani, Erlise Loraine Dullius, Haidé Maria Caldeira Borges, Fernando Ritzel Franco, Gilson Schüsler, Marinho Emílio Graff, Gerson Molon, Mário Luiz Vieira, Paulo Sérgio Santos Vieira, Wilson Dewes, e todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

**Em especial aos superintendentes:**

Fernando Ritzel Franco e Marinho Emílio Graff.

**E aos técnicos:**

Gilson Schüsler e Paulo Sérgio Santos Vieira

**Aos colegas e bolsistas:**

Eliane Bridi, Ieda e Marcos.

**Aos profissionais:**

Paulo Abadd, Luis Paulo Cunha e Vera Lúcia Maróstica Calegare.

**Aos familiares e amigos:**

Ana Lucia Schling Cypriano, Carlos Henrique Cypriano, Fernanda Mostardeiro Cypriano, Izabel Cristina Silveira, Luísa Cypriano Pieper, Luis Carlos Cypriano, Luis Carlos Cypriano Junior, Kátia Maria Cypriano, Marcus Mateus Aranda, Maria Claudete Cypriano, Niro Afonso Pieper, Maria Bothona (em memória).

**Em especial, aos meus pais.**

## RESUMO

PIEPER, K.C. **Avaliação do uso de geossintético para o deságüe e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água.** Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS: Porto Alegre, 2008.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a técnica de desaguamento de resíduos sólidos gerados em estações de tratamento de água utilizando tubos geotêxteis - *Bags*, que representam uma alternativa tecnológica para a redução do teor de umidade dos resíduos. O trabalho foi dividido em duas etapas: ensaios com *Bags* suspensos e com *Bags* dispostos sobre o solo. Nos estudos são abordadas as características mais relevantes do processo de desaguamento face às solicitações mecânicas e hidráulicas a que qualquer sistema está submetido, bem como são apresentados resultados e discussões sobre as características físico-químicas dos resíduos gerados, geocondicionados nos *Bags* geotêxteis e da água drenada. A técnica de desaguamento por *Bags* mostrou-se uma alternativa viável para a redução do teor de umidade, apresentando um melhor desempenho em relação às técnicas convencionais. Pode-se também utilizá-la em paralelo com outras técnicas já existentes para a otimização do processo de desaguamento. Ressalta-se que a correta operação da tecnologia garante a eficiência da drenagem, sendo, então, necessária a adição de polímeros como agentes coagulantes, de forma a promover a separação da fase líquida da fase sólida. Observou-se que os resíduos geocondicionados ao reduzirem o teor de umidade passam a concentrar alguns componentes químicos tais como: sílica, nitrogênio e alumínio. As dificuldades relacionadas à disposição de resíduos sólidos em estações de tratamento de água justificam esse estudo. Apesar dos resultados satisfatórios desse estudo, é importante salientar a necessidade de mais projetos que avaliem os resultados obtidos nos ensaios e o comportamento dos *Bags* com o passar do tempo, já que a técnica mostrou-se viável ambiental, econômica e tecnicamente.

**Palavras-chave:** estação de tratamento de água; *Bag*; geossintético; resíduos sólidos

## ABSTRACT

PIEPER, K.C. **Evaluation of the use of geotextile tubes for dehydrating and retaining slurry from a water treatment plant.** MSc. Thesis (Masters in Engeneering), Post Graduation Program in Civil Engineering, UFGRS: Porto Alegre, 2008.

The present study aims at evaluating the disposal process of slurry from a water treatment plant. In replacement to the conventional technique of disposing slurry in pools, a geotextile tube has been used to dehydrate and retain the slurry inside the *Bag*. This is achieved because the geotextile is permeable, yet soil-tight, and any excess water pressure is expelled from the tube. The work has been divided in two sets of tests: suspended *Bags* to define a treatment methodology and a prototype *geoBag* laid on the ground over a drained layer to simulate the treatment process. The mechanical, hydraulic and chemical responses associated with this process considering both solid waste and drained water contents have been evaluated and discussed. As a whole, the use of *geoBags* has proved to be a viable option to reduce the water content in slurry, as well as an attractive alternative to replace or to be combined with other techniques currently in use in Brazil. A critical aspect controlling the efficiency of the operation is the addition of polymers for flocculation before introducing slurry into the *Bag* so that liquid and solid phases are dissociated. Upon monitoring the process, it has been observed that solids retained inside the *Bag* exhibit concentrated levels of chemical components such as silica, nitrogen and aluminum. This study has been considered relevant in face of the environmental needs and public policy control of the disposal of solid wastes. In spite of being a promising alternative technique to slurry treatment, further investigation is needed to evaluate the trials results of this research and bag behavior as time goes by. So far, the technique has proved to be environmentally, economically and technically feasible.

**Keywords:** Water Treatment Plant; *Bag*; geotextile; solid wastes

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – A PESQUISA .....	20
1. INTRODUÇÃO .....	20
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE O TRATAMENTO DA ÁGUA.....	5
2.1.1.Coagulante - Sulfato de alumínio .....	8
2.1.2.Alcalinizante - Cal .....	14
2.1.3.Coadjuvantes - Polímeros naturais e sintéticos.....	15
2.2. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ETA .....	18
2.2.1. Redução de volume de lodo de ETA. ....	24
2.2.1.1.Prensa desaguadora .....	27
2.2.1.2. Filtro prensa.....	27
2.2.1.3. Filtro a vácuo .....	28
2.2.1.4.Centrífugas .....	28
2.2.1.5. Sistemas naturais .....	29
2.2.2. Recirculação da água do processo de tratamento de lodo.....	32
2.3. ASPECTOS DA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL SOBRE RESÍDUOS DE ETA	33
2.4.GEOSSINTÉTICOS E O SEU USO NO DESÁGÜE DE RESÍDUOS SÓLIDOS.	
.....	39
2.5. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO GEOTÊXTIL.....	45
2.5.1.Condutividade hidráulica normal ao plano .....	46
2.5.2. Mecanismos de filtração .....	47
2.5.3. Processo de colmatação .....	53
2.5.4. Critérios de permeabilidade .....	55
2.5.5. Eficiência na filtração e no desaguamento.....	56
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	58
3.1. ENSAIO COM <i>BAG</i> SUSPENSO .....	58
3.2. TESTE COM <i>BAG</i> DISPOSTO SOBRE O SOLO .....	62
CAPÍTULO 4 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E BIOLÓGICAS .....	70
4.1. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS GERADOS E	
GEOCONDICIONADOS. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

	10
4.2. CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS...	70
4.3. CARACTERÍSTICAS DO MANANCIAL DO RIO GRAVATAÍ.....	79
4.4. RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA DRENADA E DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS E GEOCONDICIONADOS.....	82
4.4.1. Comparativo entre a água bruta e a água drenada do <i>Bag</i> .....	99
4.4.2. Resultados biológicos da água drenada .....	100
4.5. COMENTÁRIOS FINAIS .....	102
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OPERACIONAIS.....	104
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	104
5.2. FLOCULAÇÃO .....	104
5.3. RESULTADOS PARA O ENSAIO DO <i>BAG</i> SUSPENSO.....	108
5.4. RESULTADOS PARA DO ENSAIO DO <i>BAG</i> DISPOSTO SOBRE SOLO...	117
5.5. ANÁLISE ECONÔMICA.....	123
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES .....	127
6.1. <i>BAG</i> SUSPENSO .....	127
6.2 <i>BAG</i> DISPOSTO AO SOLO.....	127
6.3. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	129
6.4 LIÇÕES APRENDIDAS.....	132
6.5. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	133
REFERÊNCIAS .....	135

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Foto da planta – etapa de bombeamento do tanque de equalização para a bolsa geossintética. ....	4
Figura 2.1: Principais tecnologias de tratamento de água para o consumo humano (Di Bernardo, 2005). ....	6
Figura 2.2: Logaritmo da constante termodinâmica para a primeira etapa da hidrólise (K11) em função da razão entre a carga do metal e a distância do oxigênio, para quatro grupos de cátions. ....	10
Figura 2.3: Diagrama de solubilidade do alumínio relacionado com o sulfato de alumínio. ....	11
Figura 2.4: Modelo conceitual de caminhamento de transferência do alumínio no tratamento da água. ....	13
Figura 2.5: Fotos ilustrando bomba de engrenagem e elevador e transporte de tambor de polímero. ....	16
Figura 2.6: Equipamentos de preparação e dosagem contínua de solução de polímeros sintéticos. ....	17
Figura 2.7: Mortalidade crônica em comunidades bentônicas invertebradas pela adição de lodos de sulfato de alumínio. ....	19
Figura 2.8: Fase líquida dos resíduos, subdividida em diferentes frações: água livre, água intersticial, água vicinal e água de hidratação (Smollen & Kafaar, 1994; Vesilind & Hsu, 1997). ....	26
Figura 2.9: Interior de uma centrífuga – modelo Decanter CA 505. ....	29
Figura 2.10: Secção típica de um leito de secagem. (Richter, 1998) ....	31
Figura 2.11 : Esquema geral de enchimento e desaguamento (Mori et al, 2002). ....	42
Figura 2.12 : Tubo experimental preenchido até 1,5 m (Fowler et al, 2002). ....	43
Figura 2.13: Ensaio com o tubo suspenso. ....	44
Figura 2.14: Procedimentos para o ensaio de bolsa de geotêxtil: a) Preparação da bolsa; b) Preenchimento; c) Análise de amostras do percolado no decorrer do tempo; d) Análise do material retido (Gannett Fleming, 2003). ....	45

Figura 2.15: Formação de arco devido à direção do fluxo ser a mesma da força da gravidade (Vidal & Urashima, 1999). .....	48
Figura 2.16: Perda de partículas devido à direção do fluxo ser inversa à da força da gravidade (Vidal & Urashima, 1999) .....	48
Figura 2.17: Formação de pré-filtro na filtração de material bem graduado (Vidal & Urashima, 1999) .....	49
Figura 2.18: Perda de partículas ou sufusão na filtração de material mal graduado não uniforme (Vidal & Urashima, 1999) .....	49
Figura 2.19: Mecanismos de filtração — influência do meio a filtrar (Vidal & Urashima, 1999).....	50
Figura 2.20: Zonas de deposição do material durante o bombeamento .....	51
Figura 2.21: Distribuição da umidade e formação do “Filter cake” (Gaffney et al, 1999) .....	54
Figura 3.1: Teste do <i>Bag</i> suspenso .....	59
Figura 3.3: Deságüe no teste do <i>Bag</i> suspenso.....	61
Figura 3.5: Preparação da célula na ETA Gravataí-RS .....	63
Figura 3.6: Tanque de equalização do lodo .....	64
Figura 3.7: Câmara de manobra após a chicana (zigzague) .....	65
Figura 3.8: Croqui da planta do <i>BAG</i> disposto sobre o solo.....	66
Figura 3.9: Foto do <i>Bag</i> disposto sobre o solo .....	67
Figura 4.1: Perfil do lodo do fundo do decantador.....	71
Figura 4.2: Perfil do efluente da lavagem dos filtros. ....	71
Figura 4.3: Demonstra o processo de lavagem dos filtros.....	72
Figura 4.4: Segundo a NBR 7181/84, a granulométrica dos resíduos sólidos gerados em ETAs.....	73
Figura 4.5: Esquema de um decantador convencional com limpeza manual de lodo. ....	73
Figura 4.6: Foto da cortina difusora com concentração de lodo. ....	74
Figura 4.7: Volume de água distribuída em relação ao volume de água de processo (média anual).....	75
Figura 4.8: Percentuais de águas de processo geradas em diferentes partes do bloco hidráulico .....	75
Figura 4.9: Foto do Rio Gravataí.....	79
Figura 4.10: Laboratório da ETA de Gravataí.....	82

Figura 4.11: Resultado dos ensaios de dureza realizados nos resíduos gerados e geocondicionados e na água drenada.....	87
Figura 4.12: Teores de alumínio na fase sólida (geocondicionada) e na fase líquida (água drenada) .....	89
Figura 4.13: Teores de alumínio comparado com o pH, para a fase sólida .....	89
Figura 4.14: Teores de sílica da amostra de lodo da ETA de Gravataí. ....	91
Figura 4.15: Ciclo do nitrogênio na natureza. ....	92
Figura 4.16: Gráfico demonstrando os teores de nitrogênio nos resíduos gerados e geocondicionados. ....	93
Figura 4.17: Gráfico demonstrando a densidade dos resíduos sólidos gerados e geocondicionados. ....	94
Figura 4.18: Teores de ferro e manganês na água drenada, nas quatro campanhas analíticas. ....	95
Figura 4.19: Teores de ferro e manganês na água drenada durante todo o período de teste, análises realizadas na ETA Gravataí. ....	96
Figura 4.20: Teores de ferro e manganês nos resíduos gerados e geocondicionados. (A) e (B) demonstram a influência do pH nos teores de ferro e de manganês, respectivamente. ....	97
Figura 4.21: Comportamento dos parâmetros sólidos totais e pH nos resíduos gerados e geocondicionados. ....	98
Figura 4.22: Teores de umidade nos resíduos sólidos gerados e geocondicionados. ....	99
Figura 5.1: Bomba dosadora e tanques de preparação do polímero utilizada no teste na ETA de Gravataí - RS.....	105
Figura 5.2: Ensaios, em bancada, com polímeros sintéticos. ....	106
Figura 5.3: Reação do polímero com o lodo promovendo a separação da fase sólida da fase líquida.....	107
Figura 5.4: Preparação do polímero de forma manual e mecanizada.....	108
Figura 5.5: Ponto de aplicação do polímero – sistema ziguezague.....	108
Figura 5.6: Seqüência do procedimento de ensaio. (A) Verificação, em bancada, da eficiência da filtração; (B) Mistura, <i>in loco</i> , do polímero e do lodo; (C) Verificação, <i>in loco</i> , da eficiência da floculação; (D) <b>Suspensão do Bag e tanque para o deságüe.</b> ....	109
Figura 5.7: Detalhamento do processo de desaguamento.....	110

Figura 5.8: Curva de secagem – teste <i>Bag</i> suspenso com um bombamento de 200 litros (teste B1). .....	110
Figura 5.9: Comparação entre a eficiência ao desagramento e a redução do teor de umidade e a concentração de sólidos totais, para os resíduos retidos no <i>Bag</i> suspenso .....	112
Figura 5.10: Relação do volume de material (lodo + polímero) retida no <i>Bag</i> suspenso ao longo dos primeiros 5 dias. ....	112
Figura 5.11: Teores de umidade do material geocondicionado, em 4,17 e 30 dias após o início do bombeamento. ....	113
Figura 5.12: Curva de secagem – teste <i>Bag</i> suspenso com um bombamento de 200 litros (posição 1), 150 litros (posição 2) e 100 litros (posição 3). ....	114
Figura 5.13: Taxa deságüe e quantidade de lodo geocondicionados com as adições consecutivas.....	116
Figura 5.14: Curva de volume bombeado com o tempo de bombeamento para o <i>Bag</i> disposto sobre o solo. ....	117
Figura 5.15: Dimensões do tanque de equalização de lodo.....	119
Figura 5.16: Diferentes etapas de bombeamento do <i>Bag</i> . ....	120
Figura 5.17: Dimensões do tanque de equalização de lodo.....	121
Figura 5.18: Medida operacional para remoção da colmatação. ....	123
Figura 5.19: Gráfico que demonstra o momento da colmatação e do jateamento.....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Concentração de $Al_2O_3$ em função da massa específica do sulfato de alumínio líquido comercial isento de ferro.....	9
Tabela 2.2: Espécies complexas de alumínio sugeridas por diversos autores.....	12
Tabela 2.3: Os doze elementos químicos mais comuns na crosta terrestre (adaptado de Schulze, 1989) .....	20
Tabela 2.4: Íons de maior interesse na química do solo agrupados de acordo com suas principais características.....	21
Tabela 2.5: Características do lodo bruto no momento de sua disposição nos leitos de secagem. (Aboy, 1999).....	22
Tabela 2.6: Características dos lodos de tratamento de água (Elliott & Dempsey, 1991) .....	23
Tabela 2.7: Parâmetros restritivos de lançamento dos resíduos de ETAs brasileiras.....	36
Tabela 2.8: Atos governamentais norte-americanos que regulamentam a disposição de lodos de estações de tratamento de água. ....	38
Tabela 2.9: Limites de lançamento de alguns parâmetros de resíduos de ETAs segundo regulamentação alemã. ....	39
Tabela 2.10: Coeficientes para o critério de Urashima (1999).....	52
Tabela 3.1: Dimensões do <i>BAG</i> suspenso .....	59
Tabela 3.2: Programa de monitoramento de controle do teste do <i>Bag</i> suspenso .....	62
Tabela 3.3 : Programação de controle do teste do <i>BAG</i> disposto sobre o solo .....	68
Tabela 4.1: Relação de resultados analíticos realizados nos resíduos sólidos da ETA de Gravatai-RS .....	76
Tabela 4.2: Resultados dos ensaios de lixiviação (conforme a NBR 10.005:2004).....	77
Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de solubilização (conforme a NBR 10.006:2004) .	78
Tabela 4.4: Composição química dos resíduos sólidos .....	78
Tabela 4.5: Resultados analíticos realizados em três campanhas no ponto de captação no Rio Gravataí.....	81
Tabela 4.6: Resultados físico-químicos realizados pelo laboratório ALAC, amostras contendo lodo antes e após o bombeamento para o <i>Bag</i> . ....	84

Tabela 4.7: Concentrações máximas permissíveis de interferentes para a seleção de inibidores com base num volume de 25ml de amostra diluído para 50ml. ....	86
Tabela 4.9: Ferro e manganês nos resíduos sólidos gerados e geocondicionados – ETA Gravataí. ....	95
Tabela 4.9: Parâmetros da água bruta, valores médios e da água drenada do <i>Bag</i> , também valores médios. ....	100
Tabela 4.10: Resultado do ensaio fitoplanctônico em águas. ....	101
Tabela 4.11: Resultado do ensaio fitoplanctônico em água bruta (Rio Gravataí). ....	101
Tabela 5.1: Resultados dos ensaios, em bancada, com polímeros sintéticos. ....	106
Tabela 5.2: Resultados de teor de umidade e ST (fixos e voláteis) para o lodo geocondicionado após adições consecutivas. ....	114
Tabela 5.3: Taxa deságüe e quantidade de lodo geocondicionado com as adições consecutivas. ....	116
Tabela 5.4: Custos de energia elétrica para o teste – ETA Gravataí – RS. ....	125
Tabela 5.5: Estimativa de custos do sistema de tratamento utilizando <i>Bag</i> disposto ao solo. ....	126

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{Al}_2\text{O}_3$  - Óxido de alumínio

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$  - Sulfato de alumínio

B - Boro

Co - Cobalto

Cr - Cromo

Cu - Cobre

$\text{Ca}^{+2}$  - Cálcio

$\text{Cl}^{-1}$  - Cloro

COOH e OH - Grupos funcionais

$\text{CaSO}_4$  - Sulfato de cálcio

DQO - Demanda química de oxigênio

Fe - Ferro

$\text{H}^+$  - Hidrogênio

Hg - Mercúrio

$\text{H}_2\text{CO}_4$  - Hidróxido de carbono

Kg - Quilograma (unidade de medida de peso)

$\text{K}^+$  - Potássio

Mn - Manganês

$\text{Mg}^{+2}$  - Magnésio

Mo - Molibdênio

Mg/L - Miligrama por litro (unidade de medida)

$\text{NH}_4^+$  - Amônio

$\text{NO}_3^-$  - Nitrato

$\text{Na}^+$  - Sódio

$\text{N}_2$  - Nitrogênio

Ni - Níquel

Pb - Chumbo

$\text{Si}(\text{OH})_4$  - Hidróxido de silício

$\text{SiO}_2$  - Óxido de silício

$\text{SO}_4^{-2}$  - Sulfato (íons)

Zn - Zinco

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AWWA - American Water Works Association
- ASTM WK 7555 - Norma técnica
- CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
- DBO - Demanda biológica de oxigênio
- DOS e ERA - Entidades que oficializaram o decreto estadual em São Paulo
- ED - Eficiência do desaguamento
- EDTA - Ácido etilenodiamina tetracético
- ETA - Estação de tratamento de água
- ETE - Estação de tratamento de esgoto
- EPA - Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental – EUA)
- OD - Oxigênio dissolvido
- PEAD - Polietileno de alta densidade
- PVC - Cloreto de polivinila
- ST - Sólidos totais
- THM - Trihalometano
- UV - Ultravioleta

## **CAPÍTULO 1 – A PESQUISA**

### **1. INTRODUÇÃO**

O processo de transformação da água bruta em água potável atendendo aos padrões de potabilidade, geralmente, utiliza o tratamento convencional – coagulação, floculação, decantação e filtração – com a aplicação de produtos químicos, gerando, como subproduto, resíduos. Esses têm origem principalmente nos decantadores e filtros.

Os resíduos acumulados nos decantadores, definidos como lodos das estações de tratamento de água (LETAs), são lançados nos mananciais. Entretanto, as regulamentações ambientais têm restringido o seu descarte, levando as companhias de saneamento de todo o mundo a procurar alternativas tecnológicas para a redução do volume a ser disposto, para a recuperação de componentes químicos, bem como o desenvolvimento de pesquisas para viabilizar técnicas de reuso desses resíduos sólidos em outros processos produtivos. No Brasil, é crescente a busca de alternativas tecnológicas que visem à sustentabilidade dos sistemas. Este estudo pretende trazer contribuições para a consecução desse fim.

Dentre as tecnologias mais utilizadas para melhorar as condições da disposição final de resíduos sólidos gerados nas ETAs podem ser citadas: o deságüe natural em lagoas e leitos de secagem, o adensamento mecânico em centrífugas e o uso de filtros prensa. Uma das técnicas mais amplamente utilizadas para a disposição de efluentes é o depósito em lagoas de sedimentação ou leitos de secagem. Esta alternativa, bastante utilizada pelas companhias de saneamento do país, apresenta alguns aspectos negativos (Vidal, 2005), tais como:

- necessidade de grandes áreas;
- altos custos de construção;
- possibilidade de rompimento das barragens de contenção, devido ao acúmulo de resíduos e conseqüente aumento das tensões;
- risco da ocorrência de transbordamentos em períodos de chuva;
- dificuldade na separação das partes líquida e sólida, devido à exposição ao ar.

Uma técnica mais recente, descoberta nos anos 80 e empregada em países como Holanda, Alemanha, França, Japão e Estados Unidos, é a técnica dos tubos ou bolsas geotêxteis. Essa técnica está sendo utilizada com sucesso na contenção de pequenos ou grandes volumes de material e de variadas naturezas (Pilarsczyk, 2000; Fowler et al, 2002; Moo-Young & Tucker, 2002; Bogossian et al, 1982) devido à boa capacidade de filtração do geotêxtil, que permite a passagem do fluido enquanto retém as partículas sólidas (Vidal & Urashima, 1999; Moo-Young et al, 2002).

Fowler et al (2002) apresenta um exemplo da aplicação de tubos de geotêxtil em estações de tratamento de esgoto da cidade de Vickburg (Mississippi, EUA). O estímulo para a aplicação da técnica decorre da limitação do uso de lagoas para a sedimentação de resíduos (em especial as utilizadas para a disposição de efluentes de esgotos) pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) e o Departamento de Qualidade do Meio Ambiente do Estado de Mississippi. Na ocasião, não há alternativa economicamente viável para a destinação dos futuros resíduos gerados.

Em 1995, são desenvolvidos ensaios de filtração e consolidação para demonstrar a eficiência dos tubos de geotêxtil no processo de desaguamento e na melhora da qualidade da água drenada. Os testes são direcionados para a análise dos resíduos de duas lagoas de sedimentação de esgoto da cidade em que estavam presentes, dentre outros componentes, a cal e o sulfato de alumínio (Vidal, 2005).

O objetivo de dispor efluentes em locais intermediários à fase de aterramento ou para o reuso do material explica-se pelo elevado teor de umidade, fator que impede ou

dificulta o transporte. Os efluentes necessitam ser submetidos a processo de deságüe ou desidratação para que seja possível o seu reuso ou disposição final em aterros apropriados.

O presente trabalho propõe a análise da técnica utilizando bolsa de geotêxtil através de uma unidade teste projetada para bombear o lodo da lagoa para um tanque de equalização. O lodo equalizado é, então, bombeado através de chicana para o *Bag* (Figura 1.1).

O experimento utiliza os princípios das tecnologias limpas, recirculando toda a água drenada. Os testes são desenvolvidos na ETA de Gravataí no estado do Rio Grande do Sul (RS), cuja concessionária é a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) e iniciam em dezembro de 2006. Finalizam-se os estudos em julho de 2007.

Partindo-se de uma definição basilar, o objetivo final do projeto jaz em três pilares de sustentação: o estudo do potencial de redução de resíduos em ETAs através do uso de geossintéticos; a análise da viabilidade técnica e econômica desta solução considerando duas etapas de análise – (1) análise da eficiência nos processos de deságüe e avaliação das qualidades do material drenado e dos resíduos geocondicionados; e, (2) a indicação de alternativas para o reuso do fluído e os resíduos sólidos gerados.

Esta dissertação está composta de seis capítulos, referências e anexos. No capítulo 1, a pesquisa é apresentada brevemente na introdução.

O capítulo 2 consiste da revisão bibliográfica. São abordados cinco temas: os aspectos gerais sobre o tratamento da água, a produção de resíduos sólidos nas ETAs, os aspectos da legislação ambiental em relação aos resíduos produzidos nas ETAs, o uso de geossintéticos no deságüe de resíduos sólidos e, por fim, as propriedades hidráulicas do geotêxtil.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada no teste piloto. O teste piloto consiste de ensaios com bolsas suspensas de geotêxtil (*hanging bag test*) e ensaios *in loco*, com a utilização de bolsas de geotecido dispostos sobre o solo. A planta utilizada no teste é apresentada e os principais aspectos a serem considerados na operação da tecnologia são discutidos.



**Figura 1.1:** Foto da planta – etapa de bombeamento do tanque de equalização para a bolsa geossintética.

O capítulo 4 apresenta as características físicas e químicas dos resíduos gerados e geocondicionados e a qualidade química da água drenada. Também apresenta a metodologia utilizada no monitoramento físico-químico para a avaliação da composição química do fluido drenado e recirculado, assim como, dos resíduos sólidos gerados e geocondicionados. Por fim, apresenta um estudo comparativo da qualidade do efluente drenado em relação à qualidade da água bruta.

O capítulo 5 discorre sobre a influência da estrutura do geotêxtil; sua eficiência na filtração e no desaguamento; os resultados da retenção dos resíduos, apresentando os principais problemas verificados na operação desta tecnologia; e, por fim, mostra uma análise de viabilidade econômica considerando os custos de implantação, de manutenção e insumos.

As conclusões, comentários finais e lições aprendidas estão no Capítulo 6. Também integram esse trabalho as referências consultadas para esse estudo e os anexos.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE O TRATAMENTO DA ÁGUA

O tratamento convencional da água pela indústria de abastecimento de água consiste de coagulação, floculação, decantação e filtração. Ao empregá-lo, o objetivo é transformar a água inadequada para o consumo humano em um produto que esteja de acordo com os padrões de potabilidade.

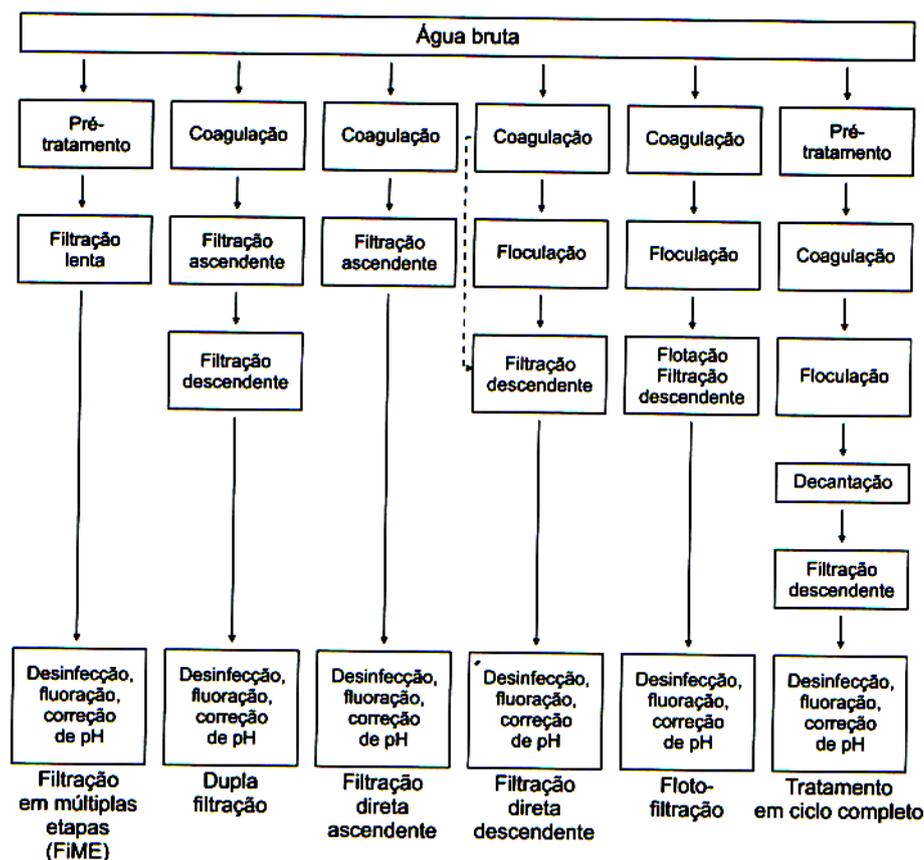
No Brasil, São Paulo é o pioneiro na fixação de normas de qualidade para água potável. O estado de São Paulo oficializa por decreto estadual critérios que vinham sendo adotados pela ERA e pelo DOS nos Estados Unidos (entidades que posteriormente foram substituídas por empresas).

Em âmbito nacional, a portaria 518/2004 do Ministério da Saúde estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Internacionalmente merecem menção as normas elaboradas pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e os recentes Guias para a Qualidade da Água Potável, também da OMS.

Di Bernardo (2005) observa que muitos elementos e substâncias químicas podem ser encontrados naturalmente na água, no entanto, as atividades agrícolas e industriais podem elevar a concentração de alguns produtos a níveis impróprios para o consumo humano. Portanto, no projeto de uma estação, o manancial de captação deve ser cuidadosamente escolhido e um levantamento detalhado das atividades humanas na região deve ser realizado.

A definição da tecnologia a ser utilizada para o tratamento da água pode exigir uma caracterização química, física, bacteriológica e radiológica detalhada da água. Do ponto de vista tecnológico, água de qualquer qualidade pode, teoricamente, ser transformada em água potável, porém, os custos envolvidos e a confiabilidade na operação e na sua manutenção podem inviabilizar totalmente o uso de determinado curso d'água como fonte de abastecimento.

As tecnologias de tratamento de água podem ser resumidas em dois grandes grupos, sem coagulação química e com a coagulação química. Na Figura 2.1 são apresentadas, na forma de diagrama de blocos, as principais alternativas de tratamento com e sem coagulação química. A água quimicamente coagulada pode seguir vários caminhos até chegar aos filtros, uma vez que a qualidade da água bruta deve ser o fator decisivo na escolha da tecnologia de tratamento.



**Figura 2.1:** Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano (Di Bernardo, 2005).

Para garantir o cumprimento dos padrões exigidos pela legislação de potabilidade, utilizam-se processos físico-químicos, envolvendo a adição de insumos e gerando lodos como subprodutos. Os resíduos têm origem nos decantadores, na floculação, na lavagem dos filtros e dos tanques de preparação de soluções e nas suspensões de produtos químicos.

Os produtos químicos comercializados para o uso nas estações de tratamento de água podem ser adquiridos em estado sólido, líquido ou gasoso e acondicionados em pequenas unidades, como tambores ou bombonas, sacos e cilindros, apropriados para cada ETA. Em alguns casos são usados equipamentos mais sofisticados para transferência, armazenamento e uso, ou ainda caminhões-tanque, para ETAs de maior capacidade.

A transferência de produtos comerciais líquidos – como o sulfato de alumínio, cloreto férrico, hipoclorito de sódio, hidróxido de sódio, ácido fluossilícico, entre outros – para os tanques de armazenamento é geralmente realizada por meio de bombas especiais, resistentes quimicamente ao produto. Para produtos granulados, como cal hidratada, cal virgem, carvão ativado, entre outros, é comum a utilização de compressores para o transporte pneumático do produto aos silos e tanques de armazenamento em ETAs de maior capacidade. A NBR 12216 estabelece as principais recomendações para o armazenamento de produtos químicos e de outras substâncias de forma apropriada, em função da forma em que são comercializadas.

Dentre os insumos utilizados no tratamento da água que estão relacionados à maior ou menor quantidade de resíduos sólidos gerados estão os coagulantes, (por exemplo, o sulfato de alumínio – largamente utilizado pelas companhias de saneamento no Brasil), os alcalinizantes (por exemplo, a cal), além de polímeros naturais e sintéticos, que auxiliam o processo de clarificação da água e influenciam na característica dos resíduos sólidos gerados.

O processo de tratamento da água inicia em câmara com agitação muito intensa da água, promovida por agitadores, ou pela própria hidrodinâmica em alguma parte da ETA. No caso da ETA Castelo Branco (Curado, Recife/PE) a câmara de mistura fica na

entrada da ETA, logo após o venturi, onde é injetado o coagulante. A alta velocidade da água e as chicanas localizadas na câmara promovem condições ótimas para a mistura.

Ao sair da câmara de mistura, a água segue para a câmara de floculação. Nesse local, os flocos – sementes de flocos gerados na coagulação – vão agregados, por adsorção, às partículas dissolvidas ou em estado coloidal. Há casos em que são utilizadas duas camadas de floculação, uma com velocidade mais baixa, onde os flocos começam a crescer e outra com velocidade um pouco maior (para evitar a decantação dos flocos maiores), já que eles continuam a aumentar de tamanho.

Ao sair da câmara de floculação, a água segue para os decantadores, onde a velocidade é bem reduzida. Isso leva à sedimentação dos flocos. Durante este caminho, eles arrastam (e ativam) partículas que encontram até atingir o fundo do decantador, constituindo o chamado lodo químico (formado pela adição de coagulantes, geralmente não naturais).

Os reagentes utilizados no processo de coagulação são agrupados em três categorias: os coagulantes, os alcalinizantes e os coadjuvantes. Os coagulantes são compostos, geralmente de ferro ou alumínio, capazes de produzir hidróxidos gelatinosos insolúveis e englobar as impurezas. Os alcalinizantes conferem a alcalinidade necessária à coagulação (cal viva: óxido de cálcio; hidróxido de cálcio; hidróxido de sódio: soda cáustica; carbonato de sódio: barrilha). Os coadjuvantes auxiliam na formação de partículas mais densas e tornam os flocos mais lastrados (argila, sílica ativa, polieletrólitos, etc.).

#### 2.1.1. Coagulante - Sulfato de Alumínio

O produto usado como coagulante é comercializado em pó, granulado ou líquido. Na forma líquida é geralmente fornecido por meio de caminhão-tanque e armazenado em tanques de resina. Em função da massa específica da solução comercial, têm-se os valores da porcentagem de sulfato de alumínio –  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$  – e de óxido de alumínio –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – (massa por massa) e a concentração de sulfato de alumínio disponível no produto, conforme a Tabela 2.1. A acidez ativa máxima da solução é de 0,5% (massa por massa).

massa específica do produto comercial (kg/L)	Concentração de sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3 \times 14,3 H_2O$ No produto comercial (% massa)	Concentração de $Al_2O_3$ no produto comercial (% massa)	Concentração de sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3 \times 14,3 H_2O$ no produto comercial (g/L)
1.3016	44.81	7,62	582,42
1.3028	44.92	7,64	582,42
1.3040	45.10	7,67	587,21
1.3051	45.22	7,69	589,61
1.3063	45.39	7,72	592,00
1.3075	45.57	7,75	595,60
1.3087	45.75	7,78	598,00
1.3098	45.86	7,80	600,39
1.3110	46.04	7,83	602,79
1.3122	46.22	7,86	606,39
1.3134	46.33	7,88	607,59
1.3146	46.51	7,91	611,18
1.3158	46.69	7,94	613,58
1.3170	46.80	7,96	615,98
1.3182	46.98	7,99	618,37
1.3194	47.17	8,02	621,97
1.3206	47.28	8,04	624,37
1.3218	47.45	8,07	626,76
1.3230	47.63	8,10	629,16
1.3242	47.75	8,12	631,56
1.3254	47.92	8,15	635,49
1.3266	48.10	8,18	637,55
1.3278	48.22	8,20	639,94
1.3290	48.39	8,23	642,34
1.3303	48.57	8,26	645,93

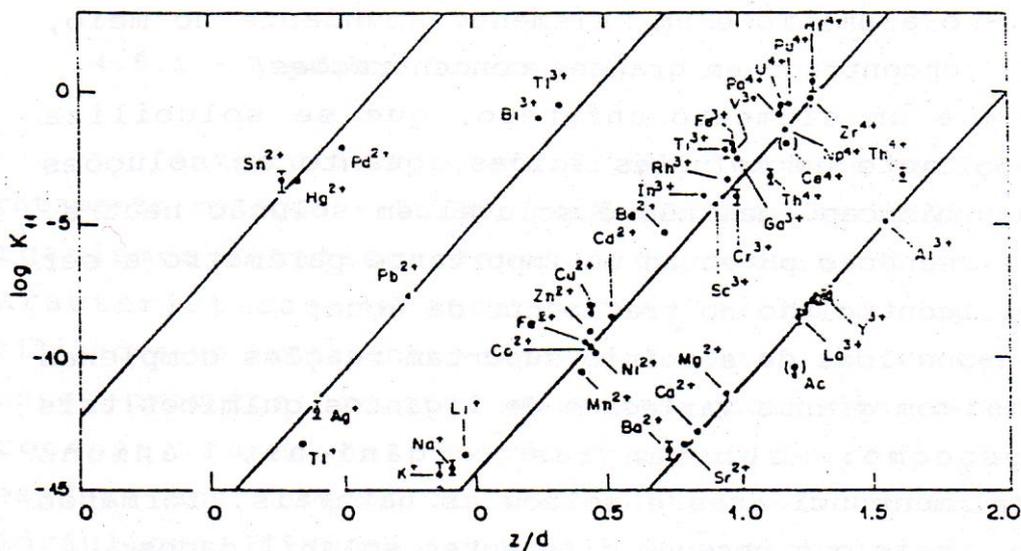
**Tabela 2.1:** Concentração de  $Al_2O_3$  em função da massa específica do sulfato de alumínio líquido comercial isento de ferro.

Observa-se pela Tabela 2.1 que ocorre variação da concentração de hidróxido de alumínio gerado de acordo com a concentração de sulfato de alumínio. Segundo Driscoll e colaboradores (1987, 1988), os caminhos da transferência do alumínio no tratamento da água são complexos e merecem estudos dirigidos para melhor esclarecimento de alguns pontos. Sabe-se que uma parte do alumínio adicionado é transportado através da água filtrada e distribuída à população. Grande parte, no entanto, retida nas partículas sedimentadas nos decantadores e nos filtros das ETAs.

Conforme George e colaboradores (1991), o estudo da química do alumínio na água deve considerar os seguintes fatores:

- O alumínio é um elemento abundante no meio e encontrado em grandes concentrações;
- É um elemento anfôtero, que se solubiliza tanto em soluções ácidas quanto em soluções básicas, mas não é solúvel em solução neutra, sendo o pH, então, um importante parâmetro a ser controlado no tratamento da água;
- Os íons de alumínio suportam reações complexas com grande variedade de ligantes químicos tais como: substâncias orgânicas, ânions mononucleares e moléculas naturais, formando sais que possuem diferentes solubilidades;
- O alumínio solubiliza-se em taxas variadas, formando complexos fracos rapidamente e vagorosamente na forma de complexos fortes.

Segundo Baes & Mesmer (1976), um traço marcante do alumínio é sua forte tendência a não resistir à primeira etapa de hidrólise, conforme indicado na Figura 2.2.

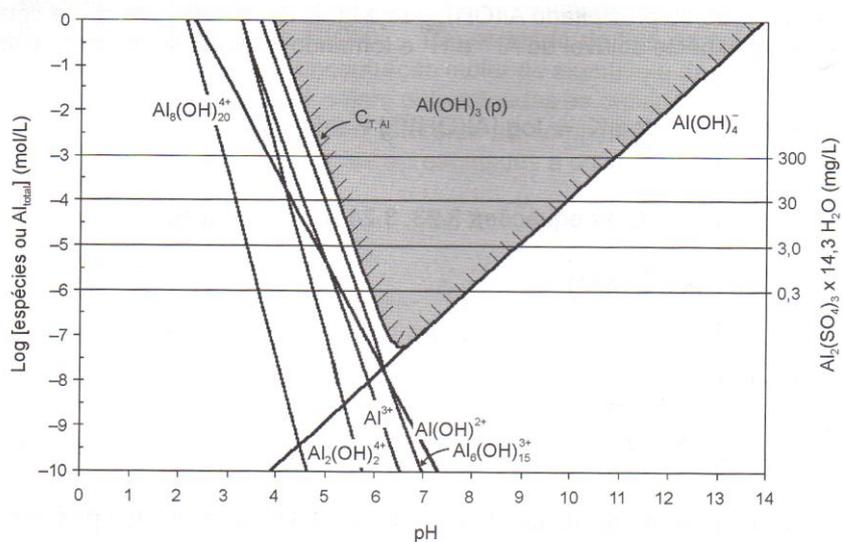


Fonte: Baes & Mesmer (1976)

**Figura 2.2:** Logaritmo da constante termodinâmica para a primeira etapa da hidrólise ( $K_{11}$ ) em função da razão entre a carga do metal e a distância do oxigênio, para quatro grupos de cátions.

A agregação das partículas resulta da ação de dois fenômenos: desestabilização das partículas e transporte das mesmas para permitir os contatos. Esse contato é essencialmente um fenômeno físico realizado, principalmente, por difusão, movimento do fluido e sedimentação. A desestabilização é um processo químico constituído por características físicas e químicas do meio.

Amirtharajah & Mills (1982) e Amirtharajah (1989) propuseram uma forma mais simples de estudar a coagulação, baseada nos diagramas de solubilidade do alumínio e do ferro. Este processo tem sido intensamente empregado no Brasil durante as duas últimas décadas por Di Bernardo (1983,1985), Di Bernardo & Mendes (1986), Di Bernardo et al. (1987), Mendes (1989), Marinelli (1999), Di Bernardo et al. (2000), dentre outros. Na Figura 2.3, é apresentado o diagrama típico de coagulação desenvolvido por Amirtharajah & Mills (1982), a partir do diagrama de solubilidade do alumínio e das condições da coagulação – dosagem de sulfato de alumínio versus pH de mistura – no tratamento de diferentes tipos de águas naturais e sintéticas, com turbidez relativamente alta se comparada à cor verdadeira.



**Figura 2.3:** Diagrama de solubilidade do alumínio relacionado com o sulfato de alumínio.

Evidentemente, o diagrama da Figura 2.3 corresponde a uma situação particular que ilustra o uso do diagrama de solubilidade do alumínio, pois as linhas que delimitam as diferentes regiões se alteram com as características da água. Os estudos de Yokosawa (2001) mostram que o valor do PIZ (ponto isoelétrico) para o hidróxido de alumínio ocorre para o pH próximo do 7,0. A carga resultante pode ser positiva ou negativa para os valores de pH inferiores ou superiores aos do pH do PIZ, respectivamente.

Conforme Di Bernardo e colaboradores (1987), a composição das espécies hidrolisadas na água não é conhecida seguramente embora tenham sido empregados diversos métodos com esse objetivo. Na Tabela 2.2, apresentam-se espécies prováveis formadas, descritas nos principais trabalhos realizados.

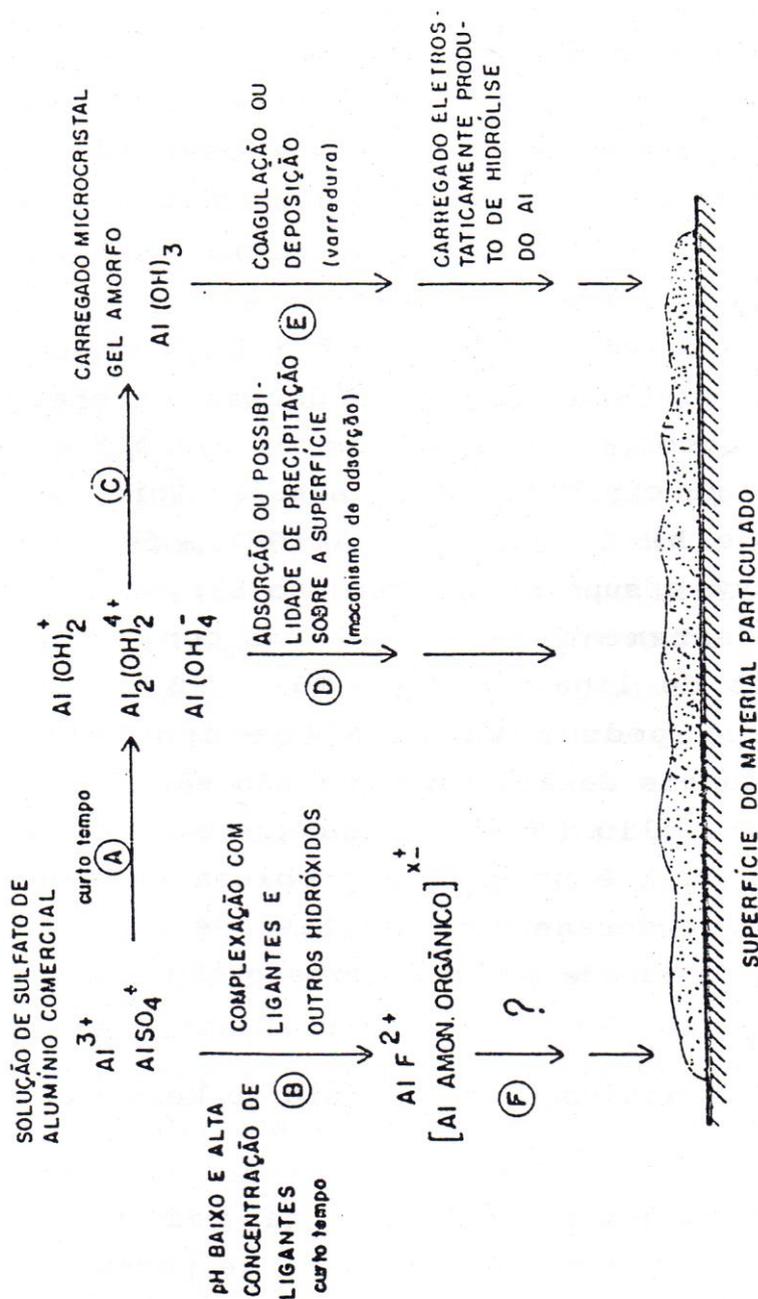
AUTORES	ESPÉCIES COMPLEXAS DE ALUMÍNIO
Brosset e Colaboradores	$[Al_6(OH)_{15}]^{3+}$
Matjevich e Colaboradores	$[Al_8(OH)_{20}]^{4+}$
Biedermann	$[Al_7(OH)_{17}]^{4+}$ $[Al_{13}(OH)_{34}]^{5+}$
Stum e Ómelia	$[Al(OH)_8]^{5-}$

Fonte: Di Bernardo e colaboradores (1987)

**Tabela 2.2:** Espécies complexas de alumínio sugeridas por diversos autores.

Segundo Driscoll (1987), quando o sulfato de alumínio é adicionado à água bruta para o tratamento, o alumínio pode tomar vários caminhos (Figura 2.4). Esses caminhos dependem das condições da solução, tais como: concentração de alumínio no sal adicionado, tipos e concentração de materiais dissolvidos, temperatura e tipo e área

superficial das partículas presentes. A descrição dos possíveis caminhos tomados pelo alumínio foi apresentada por Driscoll (1987):



Fonte: Driscoll (1987)

**Figura 2.4:** Modelo conceitual de caminhamento de transferência do alumínio no tratamento da água.

No caminho A, a adição do sulfato de alumínio pode ter formação imediata com a hidrólise simples, formando hidróxido de alumínio. No caminho B, a concentração de complexos ligantes e baixo pH podem levar à formação de complexos orgânicos de alumínio e substâncias alumino-fluoradas ainda pouco conhecidas, sendo que ambas as reações ocorrem em curto espaço de tempo. No caminho C, os produtos da hidrólise simples são predominantes na formação de espécies solúveis poliméricas ou precipitadas de hidróxido de alumínio. Quando essa hidrólise se processa – caminho A e C – as espécies de alumínio desenvolvem uma grande afinidade para as superfícies presentes no sistema. Quaisquer dessas interações irão resultar em: a) adsorção dos produtos da hidrólise adicional e formação de precipitados sobre a superfície da partícula (caminho D) e b) formação de hidróxido de Alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), fase sólida, e deposição sobre a superfície (caminho E). No caminho F também verifica-se a formação de substâncias alumino-fluoradas.

### 2.1.2. Alcalinizante – Cal

A cal utilizada nas estações de tratamento de água pode ser adquirida em estado virgem ou hidratado. A primeira é mais comum em estações de maior capacidade. Em algumas situações, especialmente quando é utilizada em maior quantidade e apresenta muitas impurezas, recomenda-se a dosagem com água de cal ou cal saturada, principalmente na correção final de pH, evitando o aumento excessivo da turbidez da água tratada.

O tanque ou cone saturador de cal deve ser projetado de forma a se obter concentração final entre 1,0 e 1,7 kg de cal por  $\text{m}^3$  de solução, apresentar formato e disposição de entrada de água e de saída da solução para conseguir uniformidade do escoamento ascensional, cuja velocidade recomendada fica entre 0,5 e 1,0 m/s. O uso da cal no tratamento da água é, na grande maioria das vezes, para ajuste do pH da água na coagulação. Pode ser também empregada no pré-tratamento, ou após o processo de clarificação, no pós-tratamento.

Tendo apresentado informações sobre o sulfato de alumínio, reagente coagulante importante no processo de coagulação, juntamente com a cal, reagente com função alcalinizante passo agora a abordar informações sobre a terceira categoria de reagentes utilizados no processo de coagulação: os coadjuvantes, os polímeros naturais e sintéticos.

### 2.1.3. Coadjuvantes – Polímeros Naturais e Sintéticos

Polímeros naturais e sintéticos são substâncias químicas orgânicas de cadeia longa e alto peso molecular disponíveis sob uma variedade de nomes comerciais. Os polieletrólitos são classificados de acordo com a carga elétrica na cadeia do polímero, sendo que os carregados positivamente são chamados de catiônicos e os que não possuem carga elétrica são os não-iônicos. Os aniônicos e os não-iônicos são geralmente utilizados com coagulantes metálicos para promoverem a ligação entre os colóides, a fim de desenvolver flocos maiores e mais resistentes. A dosagem requerida de um auxiliar de coagulação é da ordem de 0,1 a 1,0 mg/L para água. Na coagulação de algumas águas, os polímeros podem promover floculação satisfatória, com significativa redução das dosagens de sulfato de alumínio.

As vantagens potenciais são a reduções da quantidade de lodo e a maior amenidade da desidratação. Ao contrário do lodo gelatinoso e volumoso oriundo do sulfato de alumínio, o lodo formado pelo uso de polímeros é relativamente mais denso e fácil de ser desidratado, facilitando o manuseio e a disposição.

Há pouco tempo, é evidenciada a potencialidade do uso de amidos de milho e de mandioca derivatizados (cationizados) como auxiliares de coagulação, possibilitando a redução da dosagem em relação aos amidos não derivatizados em até 70%. A preparação é feita, em grande parte, a frio, utilizando hidróxido de sódio na proporção de 2 a 5 g de amido para 1 g do álcali. O hidróxido de sódio pode ser adquirido em escamas ou em solução. Quando a preparação é efetuada com hidróxido de sódio em escamas, ele é misturado com amido e a mistura resultante é gradualmente adicionada ao tanque de preparação que contém água cobrindo a hélice do agitador, que deverá estar em funcionamento. Caso a preparação da solução de polímero seja realizada com

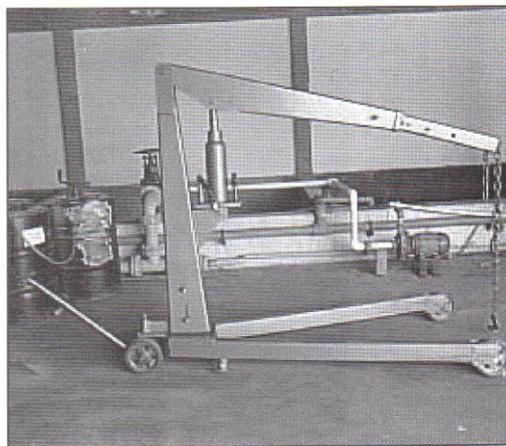
solução de hidróxido de sódio, o amido é inicialmente disposto no tanque contendo água, o que resulta em uma suspensão de cor branca. A seguir, a solução de hidróxido de sódio é lentamente adicionada, com o agitador ligado.

Os polímeros sintéticos são geralmente fornecidos em tambores, tanto em pó quanto em emulsão, podendo também serem adicionados em sacos de 50 kg. Quando no estado sólido, em pó, deve-se preencher o tanque de preparação com água e, em seguida, com o agitador funcionando, adicionar gradativamente o polímero. No caso de emulsão, devem ser tomados cuidados adicionais em sua retirada do tambor, no qual poderá ser previsto o uso de um agitador (ou insuflação de ar).

A solução de polímero a ser aplicada pode ser preparada a partir de equipamentos contínuos, sendo o produto comercial em emulsão e a água continuamente bombeada para o equipamento. Nas fotos da Figura 2.5, ilustra-se a bomba de engrenagem com o transportador e o elevador de tambor de polímero. Nas fotos da Figura 2.6 mostra-se dois tipos de equipamentos contínuos para a preparação e a dosagem da solução de polímero.



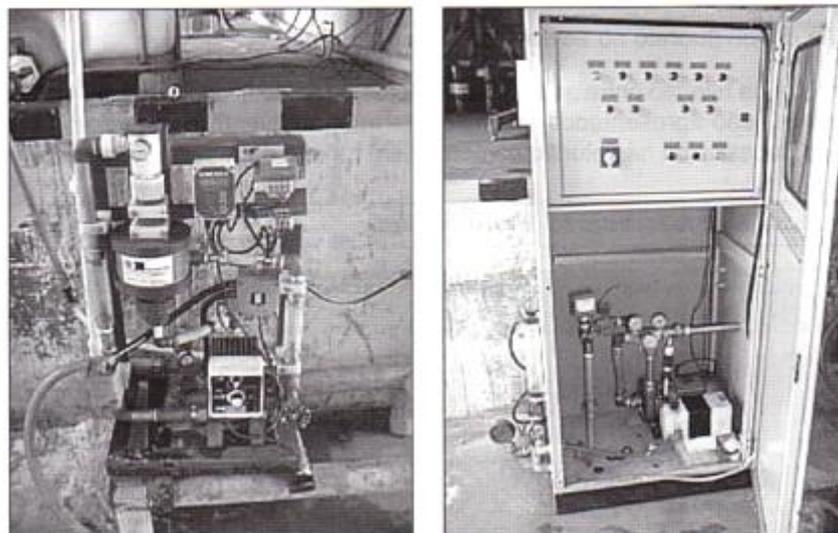
Bomba de engrenagem



Elevador e transportador de tambor

**Fonte:** Di Bernardo e colaboradores (2005)

**Figura 2.5:** Fotos ilustrando bomba de engrenagem e elevador e transporte de tambor de polímero.



**Fonte:** Di Bernardo e colaboradores (2005)

**Figura 2.6:** Equipamentos de preparação e dosagem contínua de solução de polímeros sintéticos.

O uso de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação tem sido objeto de muitos trabalhos de pesquisa, destacando-se sempre suas vantagens em relação ao uso somente do sulfato de alumínio ou do ferro, como apresentado no livro da *American Water Works Association* (AWWA,1990). Na década de setenta, já recomenda-se o emprego de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação (AWWA, USEPA,1972) e, mais recentemente, Campos & Di Bernardo (1991) relataram em livro suas experiências referentes ao uso de polímeros naturais como auxiliares de floculação e de filtração.

Amirtharajah e colaboradores (1982, 1985, 1986) propõem a aplicabilidade de diagramas de solubilidade do alumínio e do ferro para a construção de diagramas de coagulação. Os diagramas de solubilidade trazem representações das regiões dadas pelos pares de valores “dosagem de coagulante *versus* pH de coagulação” (Figura 2.3). Desde então, muitos estudos têm sido realizados com águas de qualidades diversas que apontam para diferentes regiões em que ocorre coagulação eficiente (Di Bernardo et al, 1987; Guimarães, 1987; Mendes, 1989; Pádua, 1985; dentre outros).

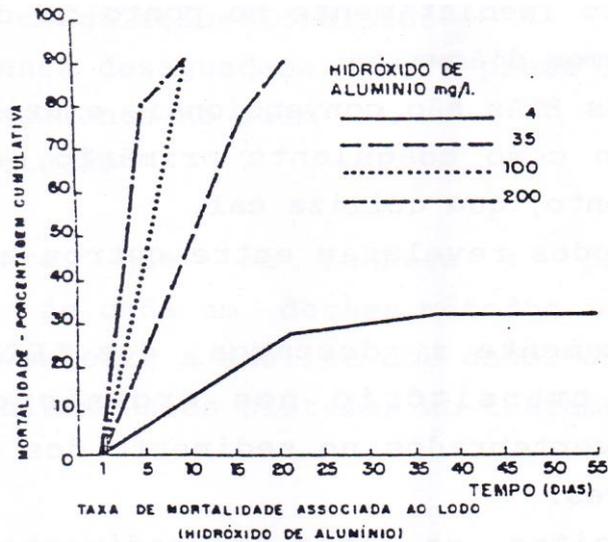
## 2.2. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ETA

A coagulação/floculação com sulfato de alumínio é um dos processos mais utilizados no Brasil para proceder a clarificação da água em ETAs, tendo como inconveniente a produção de dois tipos de resíduos principais (Viessman Jr. & Hammer, 1998): o lodo sedimentado no fundo dos decantadores, que contém materiais inertes, materiais orgânicos e precipitados químicos, incluindo hidróxidos de alumínio em grande quantidade; e a água de lavagem dos filtros, que contém pequenos flocos formados pela aglomeração de colóides e hidróxidos de alumínio. Esses lodos são constituídos por resíduos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, por hidróxidos de alumínio resultantes da adição de produtos coagulantes e, eventualmente, por polímeros condicionantes do processo. Possuem baixa concentração de sólidos – uma vez que para sua descarga é utilizada grande quantidade de água e alta concentração de alumínio. A NBR 10004 (ABNT, 2005) inclui na definição de resíduos sólidos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água.

Sengupta & Shi (1992) citam pesquisas em que se verifica a toxicidade de espécies livres e complexadas de alumínio em peixes e outros organismos. Eles mostram que estes elementos têm a capacidade de se acumular em certos órgãos de animais, inclusive de humanos, com a comprovação de o elemento ser um precursor do mal de Alzheimer. Reiber et al (1995) questionam a biodisponibilidade e a probabilidade de o alumínio presente na água potável ser mais facilmente assimilado do que outras formas do elemento, baseando-se em conceitos de solubilidade e de prováveis transformações químicas que ocorrem no interior do corpo humano. Cordeiro (1999) também aborda as questões dos prováveis impactos gerados pelos lodos de ETAs citando estudos de impactos físicos, químicos e biológicos em rios; a toxicidade do alumínio em peixes; e, sua influência no corpo humano, ressaltando, porém, que a abundância do elemento no mundo dificulta a determinação precisa dos efeitos prejudiciais decorrentes da prática de descarte.

Roberts & Diaz (1985) pesquisando a produtividade de fitoplâncton em locais de despejo de lodos em Newport News (cidade americana no estado da Virgínia) mostram que a produtividade desse material cessa próximo ao local de lançamento de lodos de

ETAs em cursos d'água com baixa velocidade. A luminosidade do meio pode cair praticamente para zero, do fundo até poucos centímetros da superfície.



**Fonte:** Lamb & Balley (1981)

**Figura 2.7:** Mortalidade crônica em comunidades bentônicas invertebradas pela adição de lodos de sulfato de alumínio.

No solo também são encontrados elementos presentes na composição dos lodos de ETA, como sílica, alumínio, ferro, cálcio, potássio, sódio e magnésio. Os minerais são, primeiramente, divididos em classes, dependendo do ânion ou do grupo aniônico dominante. As classes são: elementos nativos, sulfitos, sulfosais, óxidos e hidróxidos, haletos, carbonatos, nitratos, bopratos, fosfatos, sulfatos, tungstatos e silicatos. Essas classes subdividem-se com base na estrutura química e nas semelhanças na estrutura (Schulze, 1989). Os minerais dos solos também podem ser divididos em minerais primários e minerais secundários, com tamanhos variando de  $< 0,002$  mm à dimensão de um matacão ou rocha (Tabela 2.3)

Elemento	Teor médio	Raio iônico	Volume
	g kg <sup>-1</sup>	nm	%
O <sup>2-</sup>	466,0	0,140	89,84
Si <sup>4+</sup>	277,2	0,039	2,37
Al <sup>3+</sup>	81,3	0,051	1,24
Fe <sup>2+</sup>	50,0	0,074	0,79
Mg <sup>2+</sup>	20,9	0,066	0,60
Ca <sup>2+</sup>	36,3	0,099	1,39
Na <sup>+</sup>	28,3	0,097	1,84
K <sup>+</sup>	25,9	0,133	1,84
Ti <sup>4+</sup>	4,4	0,068	0,08
H <sup>+</sup> *	1,4	-	-
Mn <sup>4+</sup>	0,9	0,060	0,01
P <sup>5+</sup>	1,0	0,035	0,01

\* O raio iônico e o volume do H<sup>+</sup> é desprezível comparado com o O<sup>2-</sup>.

**Tabela 2.3:** Os doze elementos químicos mais comuns na crosta terrestre (adaptado de Schulze, 1989)

A composição da solução do solo varia muito com o material de origem do solo, com o pH, com as condições de oxiredução, com o teor de matéria orgânica, com a adição de produtos químicos (fertilizantes, inseticidas, fungicidas, herbicidas) e com seu manejo. Os principais íons presentes na solução de solos, com pH próximo à neutralidade, oxidados, com teores médios de matéria orgânica são: Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Si(OH)<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. Em solos ácidos, ocorrem ainda Al<sup>+3</sup> e H<sup>+</sup>. Outros elementos que ocorrem em menores concentrações na solução do solo são: B, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb e Zn. A composição ainda pode variar com o clima. Na Tabela 2.4, apresenta-se o quadro resumo dos íons de maior interesse, encontrados na solução de solos e agrupados de acordo com algumas de suas características.

Íons	Comentários
PRINCIPAIS CÁTIONS	
Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> H <sup>+</sup> , Al <sup>3+</sup>	Ocorrem, predominantemente, como cátions trocáveis no solo. Seus teores no solo são facilmente alterados pela calagem, irrigação, acidificação. O Al em solos ácidos é fitotóxico; em solos corrigidos com calcário, os teores de Ca e Mg são altos.
PRINCIPAIS ÂNIONS	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Cl <sup>-</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Geralmente seus teores na solução do solo são inferiores aos dos cátions trocáveis. O NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> pode aparecer em maiores concentrações em solos com maiores teores de matéria orgânica.
ÂNIONS POUCO SOLÚVEIS	
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Si(OH) <sub>4</sub> MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	São fortemente retidos pelos óxidos do solo; os boratos são os mais solúveis do grupo. Molibdato e sílica são mais solúveis em pH mais altos; fosfato é mais solúvel em pH ligeiramente ácido
ALUMÍNIO E METAIS DE TRANSIÇÃO	
Al <sup>3+</sup> , Al(OH) <sup>2+</sup> , Al(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> Fe(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup>	Hidróxidos insolúveis tendem a se acumular em solos. Ferro e manganês são mais solúveis em solos reduzidos ou inundados.  São fortemente complexados pela matéria orgânica
ÍONS TÓXICOS	
Cd <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup> Pb <sup>2+</sup> Hg <sup>2+</sup> , Hg Be <sup>2+</sup> , AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Comportamento no solo semelhante ao dos metais de transição. Al <sup>3+</sup> é tóxico às plantas; os demais são geralmente tóxicos aos animais; Cd <sup>2+</sup> é relativamente solúvel e disponível às plantas, e sua retenção no solo é relativamente independente do pH; os demais íons são menos disponíveis às plantas com o aumento do pH, exceto, talvez, para o As. Os últimos três íons ainda são pouco estudados em solos.
ELEMENTOS ATIVOS EM REAÇÕES DE OXIRREDUÇÃO	
C, N, O, S Fe, Mn, Se, Hg	Participam e são modificados por reações de oxirredução resultantes da atividade de microrganismos em solos; o O <sub>2</sub> é o principal receptor de elétrons; Fe <sup>3+</sup> , Mn <sup>3+</sup> , nitrato e sulfato são receptores de elétrons quando o suprimento de oxigênio é baixo.

**Fonte:** adaptado de Wolt, 1994.

**Tabela 2.4:** Íons de maior interesse na química do solo agrupados de acordo com suas principais características

Não há atualmente leis ambientais estabelecendo parâmetros de controle para o tratamento e disposição final dos lodos de ETAs no Brasil. Apesar da existência de métodos de tratamento e disposição final em outros países, esses não são adotados no Brasil devido ao alto custo de implementação e operação. Assim, a prática mais recorrente é o descarte dos resíduos nos corpos d'água. Nos Estados Unidos, dentre as práticas de disposição de lodos, o aterro municipal é adotado em 20,7% das cidades com 100 mil habitantes (Murray & Dillon apud Cordeiro, 1999).

Conforme Albrecht (1972), o lodo de ETAs é uma substância não-newtoniana, extremamente gelatinosa e tão comprimido que resiste à passagem de água através dele devido à estrutura de formação dos flocos durante o processo de coagulação-floculação. O lodo é resistente ao adensamento, principalmente quando a água bruta possui baixa turbidez. É composto por hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas como argilas e areia; colóides de cor e microrganismos, incluindo plâncton e outros materiais orgânicos e inorgânicos, removidos da água que está sendo tratada e composto por sedimentos dos decantadores e floculadores, lavagem dos filtros, lodo da recuperação da água de lavagem ou uma combinação desses elementos. Geralmente, apresenta um baixo conteúdo de sólidos, da ordem de 2.000 a 15.000 mg/L. Os sólidos voláteis totais representam de 75% a 90% dos sólidos totais, enquanto os sólidos voláteis totais representam de 20% a 35% destes.

Em um estudo local, Aboy (1999) apresenta os resultados da análise do lodo bruto retirado de um decantador com manta de lodos, na ETA São João/Navegantes, em Porto Alegre. O conteúdo de sólidos voláteis totais da amostra indica a presença de matéria orgânica biodegradável no lodo bruto (Tabela 2.5).

Parâmetros	Valores observados
Umidade (%)	96,50
Sólidos totais (%)	3,50
Sólidos fixos totais (%)	2,48
Sólidos voláteis totais (%)	1,02
Al (III) (%)	5,90
Al (III) (mg/L)*	1.500

**Tabela 2.5:** Características do lodo bruto no momento de sua disposição nos leitos de secagem. (Aboy, 1999)

Elliott & Dempsey (1991) compilam valores de algumas características do lodo de ETA. Novamente, há a presença de uma fração biodegradável nos lodos, indicada pelo carbono orgânico total e pela demanda biológica de oxigênio (DBO), conforme a Tabela 2.6.

	Média	Varição
Alumínio (porcentagem em peso seco)	21,2	2,8-30
Cálcio (porcentagem em peso seco)	2,7	0,3-5
Ferro (porcentagem em peso seco)	3,2	1,2-6,6
Potássio (porcentagem em peso seco)	1,7	0,04-5
Magnésio (porcentagem em peso seco)	0,45	0,24-8
Silício (porcentagem em peso seco)	20	-
Fósforo (porcentagem em peso seco)	0,35	-
pH	7	5,1-8
Carbono orgânico total (porcentagem em peso seco)	3,1	0,85-6,5
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	45	2-104
DQO (mg/L)	500	100-10.000
Nitrogênio total Kjeldahl (porcentagem em peso seco)	0,68	0,44-1
Equivalência em carbonato de cálcio (porcentagem)	15	10-20
Coliformes (número/g)	< 20	-

**Tabela 2.6:** Características dos lodos de tratamento de água (Elliott & Dempsey, 1991)

O lançamento de resíduos de estações de tratamento de água em águas superficiais provoca um desequilíbrio no ecossistema do corpo d'água receptor. As altas concentrações de sólidos (turbidez) provocam uma sensível redução da luminosidade no meio aquático e conseqüente queda da produção de fitoplâncton. Co-ocorre ainda o aumento da concentração de metais tóxicos na camada bentônica próxima ao ponto de descarga (Roberts & Diaz, 1985, apud Cornwell, 1987).

Ao passar por processos de espessamento, os lodos decantadores, normalmente com concentração de sólidos entre 30.000 mg/L e 60.000 mg/L, podem ser caracterizados como resíduos sólidos, contudo, na comunidade científica, há consenso de que as águas de lavagem de filtros podem ser caracterizadas como resíduo líquido, com concentração de sólidos variando, geralmente de 50 a 500 mg/L (Di Bernardo, 1999 e Barroso, 2002).

"Na sua forma mais comum, o lodo das estações de tratamento de água é basicamente o produto da coagulação da água bruta e, assim, tem uma coagulação aproximada daquela, acrescido dos produtos resultantes do coagulante utilizado, principalmente hidróxidos de alumínio ou de ferro. Outra origem importante de lodo é a precipitação de carbonatos no processo de abrandamento nas estações para remoção de dureza. Deste modo, as características do lodo variam com a natureza da água bruta, dos processos unitários e produtos químicos aplicados. Entretanto, pode-se delinear algumas generalizações de modo a antecipar informações para o dimensionamento e projeto de sistemas de desidratação". (Richter, 1998)

As características dos lodos de uma ETA dependem primordialmente da cadeia de processos. Essa pode incluir troca iônica e/ou separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração, osmose reversa, etc.). Richter (1995) apresenta as duas categorias básicas do processo de tratamento de água onde ocorre a formação de lodo de ETA.

- Coagulação/filtração: o tipo tradicional inclui como processos unitários mais utilizados na cadeia de tratamento com a finalidade básica de remoção de cor/turbidez: pré-sedimentação, oxidação, coagulação/floculação, clarificação por decantação ou por flotação, filtração e desinfecção. Alguns processos são, às vezes, suprimidos, como na filtração direta ou por contato, onde não há a separação de sólidos intermediários por decantação ou por flotação.
- Abrandamento (ou remoção de dureza) por precipitação: a estrutura física das unidades de processo é igual ou semelhante ao tipo tradicional por coagulação/filtração, porém a finalidade básica é a remoção de dureza, através da precipitação de carbonato de cálcio e/ou de magnésio.

### 2.2.1. Redução do volume de lodo de ETA

A busca por soluções para minimizar os impactos e viabilizar a disposição adequada dos resíduos de ETAs levou ao desenvolvimento de técnicas diversas. Como esses resíduos apresentam grandes quantidades de água, a escolha do tipo de unidade ou equipamento depende das características qualitativas e quantitativas dos lodos. Essas características podem variar entre as estações de tratamento. Recomenda-se que a escolha do método ou unidade baseie-se em resultados de análises realizadas em

laboratórios, ou escala-piloto com amostras representativas do resíduo. Devem também ser avaliados as necessidades, as dosagens e os tipos de condicionadores químicos para cada processo em função da resistência que as partículas apresentam na remoção da água.

Outro aspecto importante a ser considerado na escolha do método de deságüe e tratamento dos resíduos de ETA é a condição climática. O desaguamento dos resíduos de ETA, de acordo com Grandin (1992), é uma operação física, mecânica ou natural, executada para reduzir o teor de umidade com conseqüente redução de volume refletindo na redução de custo de transporte para a destinação final e, principalmente, quando disposto em aterro, na redução da quantidade do percolado (chorume).

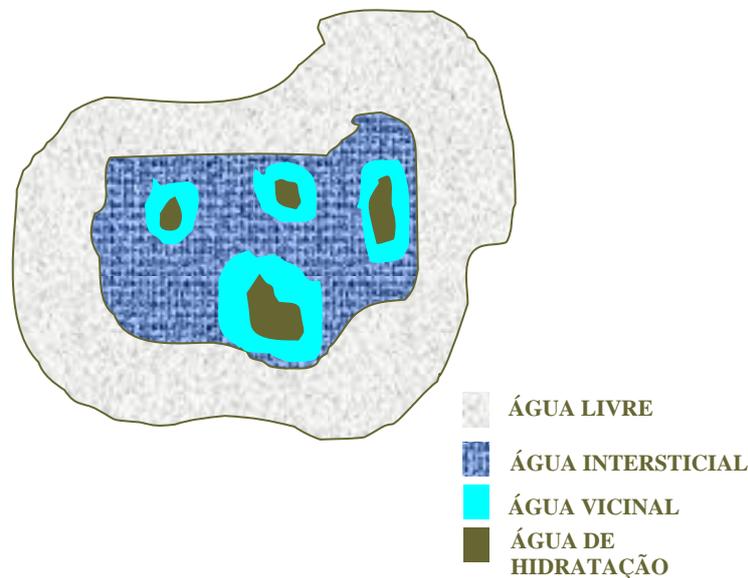
Segundo Kawaiviura (2000), para permitir um manuseio adequado e tratamento dos resíduos para disposição final, os métodos de deságüe devem, ainda, considerar os controles ambientais exigidos por normas e regulamentos. Os métodos utilizados para a redução de volume de resíduos mais conhecidos podem ser classificados como (Patrizzi, 1998):

- Naturais: leitos de secagem e lagoas de lodo;
- Mecânicos: filtros a vácuo, filtros prensa de placas, centrífugas, filtros prensa de esteira e
- Outros métodos pouco usuais: congelamento e incineração.

Mais recentemente, está sendo utilizada a tecnologia de uso de geossintéticos para promover o deságüe e o geocondicionamento dos resíduos gerados. Os primeiros ensaios foram propostos por Fowler et al. (1994), existindo atualmente a proposição da norma ASTM WK 7555 associada a essa técnica. Segundo Patrizzi (1998) para que se realize a desidratação é fundamental o espessamento dos resíduos, que pode ser realizado por flotação ou por gravidade.

Os lodos são constituídos de fase sólida e fase líquida. Ressalta-se que a maior parcela destes resíduos corresponde à fase líquida, subdividida em diferentes frações: água livre, água intersticial, água vicinal e água de hidratação (Smollen & Kafaar, 1994;

Vesilind & Hsu, 1997). As quantidades relativas das diferentes frações de água determinam as características de retenção de água dos resíduos e, conseqüentemente, do desempenho dos sistemas de remoção de água (Reali, 1999).



**Figura 2.8:** Fase líquida dos resíduos, subdividida em diferentes frações: água livre, água intersticial, água vicinal e água de hidratação (Smollen & Kafaar, 1994; Vesilind & Hsu, 1997).

A estrutura dos sólidos presentes nos lodos de ETAs é muito complexa e composta por partículas muito pequenas. Fornece, portanto, um arranjo que pode dificultar a remoção de água. Além disso, a sedimentação das partículas, que passam a ocupar os vazios da massa sólida, dificulta a passagem da água livre. Nesse sentido, um dos problemas mais sérios constitui a redução do volume de lodo gerado nas ETAs. Esta redução pode ser realizada com a remoção da água livre e nos interstícios dos sólidos através de sistemas naturais ou mecânicos. A definição do tipo de sistema a ser utilizado no manejo dos lodos de ETAs depende de inúmeros fatores como área necessária para implantação, custo da área, condições climáticas, custo dos equipamentos, operação, preparo de recursos humanos para operação, necessidade de condicionamento, entre outros.

A remoção natural de água livre dos resíduos de ETAs pode ser realizada por sistemas naturais de redução de volume, que são as lagoas de lodo e os leitos de secagem. Vale salientar que, no Brasil, o uso de sistemas naturais de tratamento de resíduos de ETAs possui grande potencial de aplicação, principalmente devido à disponibilidade de área, condições climáticas favoráveis e por ser um sistema de baixo custo, que não requer produtos químicos e energia elétrica. Algumas alternativas de tecnologias existentes no mercado para o deságüe de lodo de estações de tratamento de água são a prensa desaguadora, o filtro prensa, filtros a vácuo, as centrífugas e os geotêxteis sintéticos (*Bags*).

#### 2.2.1.1. Prensa Desaguadora

A prensa desaguadora apresenta resultados da ordem de 90% de recuperação da água presente nos resíduos. A qualidade do líquido presente nos resíduos permite a recirculação no processo com baixo custo operacional. A remoção de água através de filtro prensa de placas é um processo semicontínuo alimentado por batelada. O lodo, na maioria das vezes, é pré-condicionado e encaminhado para as câmaras, onde as mantas ou telas filtrantes ficam acondicionadas até seu preenchimento. Por meio de aplicação de pressões diferenciais, o lodo é forçado sobre o meio filtrante fazendo com que a água seja removida. Os sólidos no interior das câmaras formam uma torta de lodo desaguado. A espessura da torta depende da filtrabilidade do lodo (Cordeiro, 1999).

#### 2.2.1.2. Filtro Prensa

A utilização de filtro prensa de placas produz uma torta com teor de sólidos maiores do que os filtros de esteira e centrífugas. Geralmente, com o uso de condicionantes, é possível atingir uma concentração de sólidos de 30 a 40% (Asce, 1996, apud Iviendes, 2001). Esta técnica tem, contudo, se restringido a situações em que o transporte e disposição final do lodo requerem resultados com teor de sólidos mais elevados.

Os estudos realizados por Doe & Malmrose (1985) – citados por Cornwell (1990) – em estação-piloto na cidade de Norfolk (Virgínia, EUA), comparam a capacidade operacional dos filtros prensa de diafragma com os filtros prensa de placas convencionais e concluem que os primeiros poderiam obter 30% de sólidos na torta, sem nenhum condicionamento químico. A diminuição do ciclo de prensagem passa de 145 minutos para 55 minutos utilizando diafragma simples e para 26 minutos utilizando o duplo diafragma.

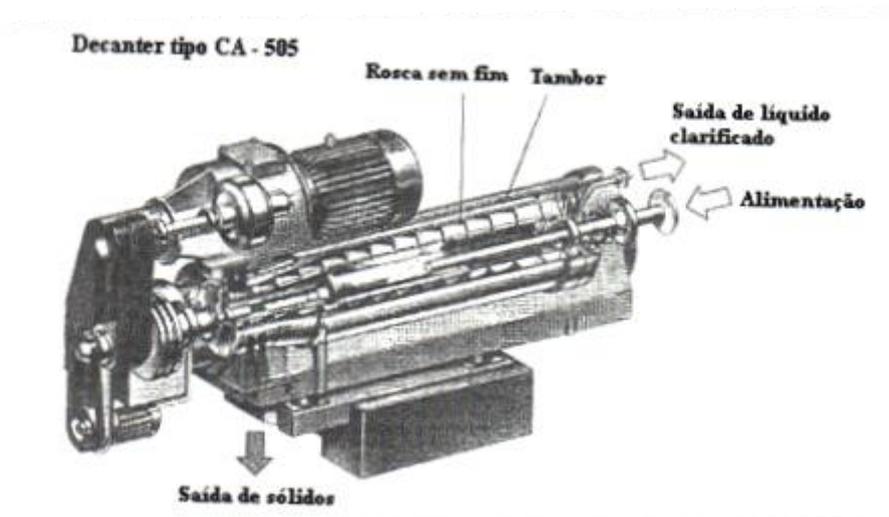
#### 2.2.1.3. Filtro a Vácuo

Os filtros a vácuo operam nos EUA desde 1872 e são utilizados para o deságüe de lodos industriais. O equipamento é um tambor em posição horizontal, suspenso e imerso em um recipiente contendo o lodo. O tambor é subdividido em setores que servem de suporte para o meio filtrante. A operação se dá pelo lento movimento do tambor, variando de 1/8 a 1 rotação por minuto. A submersão é de cerca de 1/4 das superfícies externas. Pressões negativas e positivas são aplicadas alternadamente, durante cada volta. Esta operação permite que os sólidos depositem-se sobre a superfície e a água drenada através do lodo e da superfície filtrante seja recolhida. Cordeiro (1999), em pesquisa bibliográfica, cita estudos com o sistema de filtração a vácuo onde foram encontrados resultados de concentração de sólidos após o desaguamento com variação de 20 a 40% de sólidos. Relata, ainda, que vários autores apresentam restrições quanto à utilização destes equipamentos para a remoção de água de lodos com alumínio, ressaltando a necessidade do condicionamento do lodo com altas dosagens de polímeros e maior custo operacional desse sistema em relação a outros.

#### 2.2.1.4. Centrífugas

As centrífugas separam os sólidos da água por diferença de força centrífuga. Para que a operação da centrífuga produza água com baixo teor de sólidos, é necessário conservar uma porcentagem de teor de umidade de 2 a 4% no lodo. O lodo molhado é introduzido axialmente e sob a influência da força centrífuga, os sólidos em suspensão se depositam na parede interna do tambor. Em seguida, são empurrados pela rosca

girando a uma velocidade um pouco maior para a extremidade de menor diâmetro. Assim, os sólidos saem da camada líquida e são descarregados. O líquido intersticial sai do tambor pelo lado do diâmetro maior através de um vertedor em forma de disco (Chagas, 2000). A Figura 2.9 ilustra uma centrífuga decantadora do modelo Decanter tipo CA 505 indicando o caminho de entrada do material e saída do fluido filtrado (Reali et al., 1999).



**Figura 2.9:** Interior de uma centrífuga – modelo Decanter CA 505.

#### 2.2.1.5. Sistemas Naturais

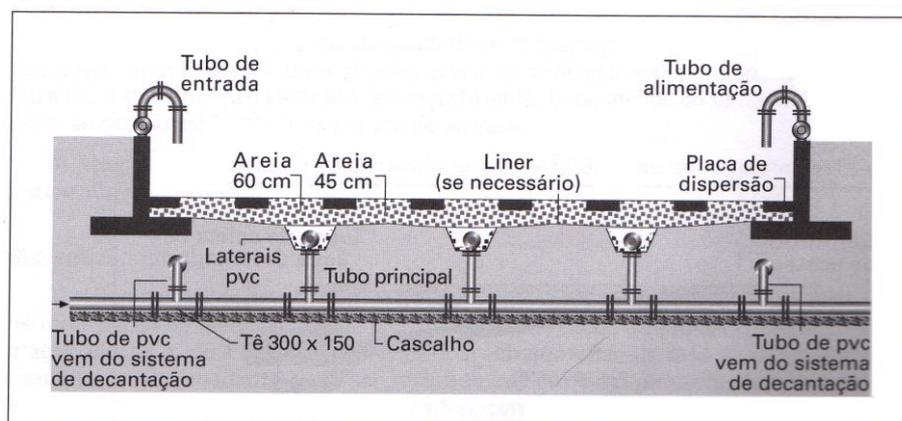
Os sistemas naturais de remoção de água livre de lodo de ETAs compreendem as lagoas de lodo ou de secagem e os leitos de secagem. Esses sistemas têm como fator principal a condição climática, no entanto, a disponibilidade de área pode ser fator decisivo na definição do método. O clima é o principal responsável pelo desaguamento do lodo pelo método de lagoas de lodo ou de secagem. Em climas quentes e áridos, a secagem é realizada pela radiação solar. E, em climas frios, o congelamento é o responsável pelo processo (Cornwell, 1987). O processo de desaguamento e secagem em lagoas de lodo é baseado em dois princípios: drenagem da água livre e evaporação.

A posição de fundo da lagoa deve obedecer ao mínimo de 0,50 m acima do nível do lençol freático, ou de acordo com as normas locais; e a permeabilidade do solo deve

estar entre 4,2 a 1,4 cm/s. As lagoas de lodo possuem profundidades que variam de 0,7 a 1,4 m, porém, como relata Cordeiro (1999), há sistemas com até 3,0 m de profundidade. A profundidade, bem como a área de superfície, depende das condições de precipitação, evaporação, concentração e volume de lodo. Segundo Kawaiwiura (2000), a taxa de aplicação (base peso seco) por área em lagoas de secagem varia de 40 kg/m<sup>2</sup>, para regiões úmidas, a 80 kg/m<sup>2</sup>, para regiões áridas. A operação e a manutenção das lagoas de secagem envolvem: aplicação do lodo, remoção do decantado, remoção dos sólidos no final de cada ciclo e eventuais reparos em taludes.

Cordeiro (1999) apresenta o leito de secagem como um dos métodos utilizados há anos para a remoção natural da água livre dos lodos gerados em ETAs e ETEs (estações de tratamento de esgotos). A aplicação deste método pode minimizar os impactos ambientais por reduzir os volumes de despejos e possibilitar o reuso da água livre. Segundo pesquisas, este método é aplicado desde 1900 para os lodos de ETEs nos EUA, onde praticamente 2/3 das estações utilizam leitos para tratamento dos lodos. Algumas evoluções ocorrem na tecnologia dos leitos fazendo surgir os leitos de secagem a vácuo, leitos de secagem de tela em cunha, leitos tradicionais e leitos pavimentados (Reali, 1999).

Os leitos tradicionais são constituídos de tanques rasos apresentando como meio filtrante uma camada de brita com 0,15 a 0,30 m de espessura recoberta com duas ou três camadas de areia de granulometrias diferentes – 0,15 a 0,25 m de altura. O sistema completo, com ilustrado na Figura 2.10, inclui também o sistema drenante composto por canaletas e tubulações de captação do drenado. Esta estrutura e a forma de funcionamento mantêm-se as mesmas, não sendo avaliadas de forma mais efetiva as mudanças em suas características.



**Figura 2.10:** Seção típica de um leito de secagem. (Richter, 1998)

O tempo de remoção da água dos lodos nos leitos de secagem é a somatória do tempo de drenagem e de evaporação da água. Esta última sofre influência das condições climáticas da região, portanto, deve ser observada como fator importante nos projetos. Considerando o tempo de drenagem como fator fundamental na remoção da água livre dos lodos, Cordeiro (1993, 2000) realizou estudos com diversos arranjos, em escala piloto, modificando os leitos de secagem tradicionais.

Conforme Richter (1998) o meio filtrante é constituído de uma camada de areia com 30 a 45 cm de profundidade sobre uma camada de pedregulho com uma profundidade de 35 cm. A areia deve apresentar tamanho efetivo entre 0,3 a 0,75 mm e coeficiente de uniformidade inferior a 4, preferencialmente menor que 3,5.

A camada suporte de pedregulho é, usualmente, estratificada em três camadas: superior (1/8 a 3/8"), intermediária (3/8 a 1/2") e inferior (1/2 a 1 1/2"). Para as lagoas, a constituição do leito filtrante é a mesma, contudo Kawamura considera este item operacional, bem como as tubulações de drenagem. Cordeiro (2001) identificou aspectos importantes que devem ser levados em consideração em um projeto de leito de drenagem em suas pesquisas, a saber:

- Definição da área de implantação (distância da ETA até os leitos, cotas relativas das áreas da ETA e leito, acessos e disponibilidade de energia);

- Transporte do lodo dos decantadores aos leitos (dimensionamento da tubulação para evitar sedimentação);
- Custos de projeto, construção, operação e manutenção devem levar em consideração a disponibilidade de materiais e mão de obra para as várias etapas;
- Operacionalidade do sistema, pois, após a secagem do lodo, as mantas são retiradas com os sólidos, sendo estes transportados para destinação final e as mantas encaminhadas até baias constituídas de um lastro de concreto magro onde são lavadas com hidrojateamento e depois reposicionadas no leito de drenagem.

O reuso e recirculação do drenado resultante deste método pode representar uma alternativa sustentável do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Em escala real, propõe-se que o leito de drenagem seja constituído de uma laje de fundo em concreto magro com inclinação de 2 a 3%, para os pontos de coleta, com paredes laterais em alvenaria de 60 cm de altura. Sobre a laje aplica-se a camada suporte de brita e sobre essa a manta geotêxtil. A coleta do drenado pode ser feita através de canaletas e tubulação de PVC, que promovem o encaminhando para caixas coletoras.

#### 2.2.2. Recirculação da água do processo de tratamento de lodo

A operação de descarga dos decantadores varia de acordo com o tempo de limpeza. Tal reflete diretamente nas condições de escoamento. Normalmente, os decantadores são dotados de comportas ou registros para a realização de limpeza. No início da operação, a carga hidráulica é dada pela diferença entre o nível d'água remanescente no decantador e o ponto de lançamento, fazendo com que o sistema funcione como conduto forçado. Com o passar do tempo de descarga, a carga diminui e as condições de escoamento se modificam (Cordeiro, 2001). Ainda, a concentração de sólidos, devido ao adensamento, pode dificultar a condição de escoamento.

Para a movimentação do lodo é importante observar suas características físicas. Através de testes de limite de Atterberg para classificar o estado físico do lodo, Cornwell (1999), citado por Oliveira et al. (2002), concluiu que os limites que se mostraram mais adequados ao lodo foram o limite líquido e o limite de plasticidade. Os lodos testados têm limite líquido entre 15 e 20% de concentração de sólidos, no entanto, valores abaixo desta faixa, mas próximos, resultariam em um material ainda com água livre associada, mas que poderia não fluir. Anderson (1998) recomenda a concentração de 8 a 10% de sólidos no lodo para bombeamento.

O retorno das águas de lavagem ao início do tratamento melhoram o desempenho das unidades de floculação e decantação, principalmente em instalações que tratam água com baixa turbidez, pois os lodos recirculados servem como núcleos para o crescimento dos flocos (Yuzhu, 1996 apud Fernandes, 2002). Na operação de retrolavagem, os flocos coagulados contidos na água de lavagem podem ser quebrados pela turbulência do fluido. É difícil resedimentá-los num decantador ou recoagulá-los com a mesma dosagem de coagulante utilizado para a água bruta, podendo levar a uma perda de qualidade da água. Deste modo, uma sedimentação prévia da água de lavagem antes de ser retornada deve ser considerada.

### 2.3. ASPECTOS DA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL SOBRE RESÍDUOS DE ETA

A crescente necessidade de proteção ao meio ambiente, regulamentos e legislação contribui para a restrição e o controle da poluição ao estabelecer padrões para o lançamento de resíduos e a conduta dos agentes responsáveis pelos sistemas de produção. No entanto, em geral, decreta-se a legislação ambiental apenas depois que as ações do homem sobre o meio ambiente provocam catástrofes e relevantes impactos ambientais. Nesse tópico, analisam-se as legislações brasileira, norte-americana e alemã, em reação aos lodos de ETAs; os aspectos relativos às características físicas, químicas e biológicas desses materiais; as condições de operação dos sistemas de tratamento que geram esses resíduos; as condições e periodicidade de limpeza de filtros e decantadores nas estações convencionais; a forma e periodicidade da disposição

desses resíduos e as condições de lançamentos (solo ou águas superficiais). Tais condições, entre outros aspectos, representam um fator importante para que se possa estabelecer: qual o provável impacto ambiental causado; quais as leis, decretos, normas e resoluções que porventura estejam sendo transgredidos; as ações dos órgãos responsáveis pelas aplicações das leis vigentes, e quais as possíveis ações que possibilitam a solução mais adequada para o problema.

No Brasil, a regulamentação sobre a proteção do meio ambiente é de responsabilidade do Sistema Nacional do Meio Ambiente, que estabelece o compromisso de garantir o equilíbrio entre os impactos gerados pela industrialização e a capacidade de suporte da natureza. A Resolução CONAMA n° 357/86 estabelece padrões para o lançamento de efluentes nos corpos d'água e classifica esses corpos segundo seus usos preponderantes. Estabelece, ainda, limites para os parâmetros de demanda biológica de oxigênio (DBO); oxigênio dissolvido; turbidez; cor; pH e substâncias potencialmente prejudiciais como metais, organoclorados e organofosforados. Regulamentos específicos com padrões para o controle de poluição do meio ambiente são editados pelos estados, com base naqueles estabelecidos pelo Sistema Nacional do Meio Ambiente observando as características regionais. Leis também são elaboradas com o propósito de restringir ações antrópicas que possam degradar o meio ambiente.

A Lei 698/81, que dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, define como poluidora a pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, responsável, direta ou indiretamente, por atividade causadora de degradação ambiental. O estado de São Paulo edita a Lei 997/76, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente e proíbe o lançamento ou liberação de poluentes nas águas, no ar ou no solo. Esta lei foi regulamentada pelo Decreto 8468/76 que proíbe a disposição de lodo proveniente de sistemas de tratamento em galerias de águas pluviais ou em corpos de água. Quanto à necessidade de licenciamento de projetos de fontes poluidoras, o Decreto 47.397/02, que também regulamenta a Lei 997/76, considera que os serviços de coleta, armazenamento, transporte e disposição final de lodos ou materiais retidos em unidades de tratamento de água são fontes poluidoras.

A Lei 9605/98, também chamada lei de crimes ambientais, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio

ambiente e incrimina cível e penalmente, quem provocar, pela emissão de efluentes ou carregamento de materiais, o perecimento de espécimes da fauna aquática existentes em rios, lagos, açudes, lagoas, baías ou águas jurisdicionais brasileiras. Responsabiliza o gerente que, sabendo da conduta criminosa de outrem, deixar de impedir a sua prática, quando poderia agir para evitá-la. Ainda, a responsabilidade das pessoas jurídicas não exclui aquela das pessoas físicas, autoras, co-autoras ou partícipes do mesmo fato.

A Norma ABNT NBR 10.004/2004 classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública para que possam ser gerenciados adequadamente em estações de tratamento de água. A Norma NBR 10.004/87 inclui na definição de resíduos sólidos “os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água”. Também define, no subitem 2.1, o conceito de resíduos sólidos: “resíduos no estado sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nessa definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles oriundos de equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como, determinados líquidos cujas peculiaridades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face de melhor tecnologia disponíveis”. A norma define que o gerador de resíduos (listados nos anexos A e B da mesma) pode demonstrar que seu resíduo em particular não apresenta nenhuma das características de periculosidade especificadas na norma por meio de laudo de classificação.

Nesta norma, os resíduos são classificados em perigosos (classe I) e não perigosos (classe II) e tal resultado é obtido através do ensaio de lixiviação. A norma também classifica os resíduos em não inerte (classe II-A) e inerte (classe II-B). Para uma classificação final são realizados os ensaios de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Há outras normas da ABNT que estão relacionadas à NBR 10.004 e que constituem prescrição para esta norma, a saber:

- ABNT NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos;

- ABNT NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
- ABNT NBR 10007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos;
- Portaria 204/1997 do Ministério dos Transportes

A Tabela 2.7 apresenta os valores máximos de parâmetros de lançamento de efluentes estabelecidos na Resolução CONANA n° 357/05 e artigo 180 do Decreto 8468/76, que regulamenta a Lei 997/76 do Estado de São Paulo, comparados com dados de lodos de ETAs constantes na literatura brasileira.

**Tabela 2.7:** Parâmetros restritivos de lançamento dos resíduos de ETAs brasileiras.

Parâmetro	un	CONAMA N° 20/86 artigo 21°	SP 8468/76 artigo 18°	Di Bernardo et al. (1999) DAT <sup>(a)</sup>	Cordeiro (1993) DC <sup>(b)</sup>
pH	-	5 a 9	5 a 9	7,9	6,4
DBO <sub>(5,20)</sub>	mg/L	-	< 60	-	-
DQO	mg/L	-	-	640	5600
Sólidos Sedimentáveis	ml/L	1,0	1,0	-	710
Sólidos Suspensos	mg/L	-	-	22005	27891
Alumínio	mg/L	-	-	-	3965
Cádmio	mg/L	0,2	0,2	0,05	0,14
Chumbo	mg/L	0,5	0,5	0,88	2,32
Cobre	mg/L	1,0	1,0	1,05	1,47
Cromo <sup>VI</sup>	mg/L	0,5	0,1	-	-
Cromo total	mg/L	2,0	5	0,42	3,82
Ferro solúvel	mg/L	15	15	940 <sup>(1)</sup>	3382 <sup>(1)</sup>
Mercurio	mg/L	0,01	0,01	-	-
Níquel	mg/L	2,0	2,0	1,06	2,70
Zinco	mg/L	5,0	5	1,7	2,13

(-) Não determinado;

<sup>(a)</sup> – lodo de decantador convencional que utiliza sulfato de alumínio;

<sup>(b)</sup> – lodo de decantador de alta taxa adaptado de ETA que utiliza sulfato de alumínio (descarga mensal);

<sup>(1)</sup> Ferro total

No Brasil, é o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por intermédio da Resolução n° 1/86, que estabelece procedimentos para estudos de impactos ambientais para projetos que possam alterar as características físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, como é o caso dos lançamentos de resíduos das estações de tratamento de água.

Nos EUA, de acordo com o *National Environmental Protection Act* (Ato Nacional de Proteção Ambiental) de 1969, todo projeto de ETA requer um estudo de

impacto ambiental para sua implantação. As regulamentações norte-americanas a respeito dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água, dizem respeito a vários fatores que controlam não só o lançamento de poluentes nos corpos d'água, mas também a forma de disposição dos resíduos.

A tabela 2.8 apresenta um resumo das regulamentações americanas existentes a respeito dos lodos de estações de tratamento de água. Deve ainda ser lembrada a existência de leis estaduais específicas. Para o descarte em corpos d'água a permissão deverá ser obtida junto à *National Pollutant Discharge Elimination System* (NPDES – Sistema Nacional de Eliminação de Descargas Poluentes). As descargas são controladas para proteção da vida aquática e humana.

Em 1965, o PL-84.600, *Water Pollution Control Act* (Ato de Controle de Poluição de Águas), atribui aos estados o estabelecimento de padrões que controlem o lançamento desses resíduos no solo. Quando da promulgação do *Clean Water Act* (Ato da Água Limpa), Lei PL-92.500 e a formação da *Environmental Protection Agency* (EPA – Agência de Proteção Ambiental), classifica-se as estações de tratamento de águas para abastecimento formalmente como indústrias e, como tal, devem ter seus resíduos tratados e dispostos convenientemente.

Opção de Disposição	Regulamentações Aplicáveis
Cursos d'água	NPDES - (CWA) Critério de Qualidade de Águas Superficiais (CWA) Guia Documentado de descarga
Lançamento na Rede de Esgotos	Padrões de Pré-Tratamento (CWA)
Disposição no Solo	RCRA, CERCLA

Fonte: Cornwell, (1987)

Estabeleceram-se então três categorias de estações de tratamento de água para abastecimento:

- a) estações: convencionais; oxidação para remoção de ferro e manganês e filtração direta.
- b) estações de abrandamento.

**Tabela 2.8:** Atos governamentais norte-americanos que regulamentam a disposição de lodos de estações de tratamento de água.

Através da legislação são estabelecidos critérios para o lançamento dos lodos, principalmente levando-se em conta as características de pH e sólidos suspensos totais. Este intervalo fica entre 0,6 a 1,3 g de sólidos/m<sup>3</sup> de água tratada, dependendo da capacidade da estação de tratamento.

De acordo com estimativas do Dutch Ministry of Housing, Physical and Environmental – MHPPE (equivalente ao Ministério de Meio Ambiente) a quantidade anual desses resíduos produzidos em 1982, nos países bálticos é de 65 milhões de toneladas, e o problema continua crescendo. As agências de água da Alemanha deparam-se com um impasse: por um lado, são produtoras de resíduos; por outro, são interessadas na manutenção dos mananciais limpos (Cornwell & Koppers, 1990).

Na Tabela 2.9 apresentam-se algumas limitações definidas pelas regulamentações alemãs sobre a disposição de resíduos de estações de tratamento de água nas águas superficiais. Ressalta-se que estão incluídos nesta tabela os teores de ferro, uma vez que os serviços de água na Alemanha utilizam sais de ferro como coagulantes.

Parâmetro	Limitações
Ferro	usualmente $\leq 5$ mgFe/l
	ocasionalmente $\leq 2$ mgFe/l
Sólidos Suspensos (mg/l)	$\leq 30$ mg/l
Sólidos Sedimentáveis (ml/l)	$\leq 0,3$
pH	entre 6,5 e 8,5
DQO	$\leq 20$ mgO <sub>2</sub> /l
Nitrogênio (Kjeldahl)	$\leq 1$ mg/l

**Tabela 2.9:** Limites de lançamento de alguns parâmetros de resíduos de ETAs segundo regulamentação alemã.

## 2.4. GEOSSINTÉTICOS E O SEU USO NO DESÁGÜE DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O uso de geossintéticos amplia-se em diferentes projetos de engenharia em todo o mundo. Eles são utilizados em associação a outros materiais de construção na composição de projetos de engenharia. Para desempenhar adequadamente suas funções, estes produtos, como qualquer outro material de construção, devem ser projetados e especificados corretamente. Por serem produtos poliméricos, é essencial a existência de projeto detalhado especificando recomendações de instalação seguidas de planejamento

e supervisão adequados. Deve-se considerar que a versatilidade destes materiais permite combinações que dão origem a geocompostos, cujo uso, não só em termos de volume, como em variedade de combinação, é crescente. O geotêxtil é o elemento mais versátil da família dos geossintéticos.

Dentre as principais funções da ação dos geossintéticos, pode-se destacar: (1) a filtragem, pois permitem a passagem de fluídos com perda limitada de solo; (2) a drenagem, pois permitem a livre passagem de fluidos e separação de materiais dissimilares evitando que se misturem; (3) o reforço, porque promovem aumento de resistência do solo reforçado pela inclusão de elementos de elevada resistência à tração (barreira de fluídos), evitando a passagem de fluidos; (4) o encapsulamento, com uso de materiais como brita, concreto e areia; (5) a proteção, pois permitem a redistribuição de tensões/deformações transmitidas ao material a ser protegido (barreira de solo que retém parcial ou totalmente partículas de solo em suspensão, estabilização superficial, reforço de vegetação); e, de particular interesse nessa pesquisa, (6) o deságüe de lodo de estações de tratamento de água e esgoto.

As funções desempenhadas pelos geossintéticos estão associadas às propriedades de engenharia específicas de cada obra e de cada aplicação. Para cada função específica, é requerido geossintético com uma constituição específica. Além de atender aos coeficientes de segurança exigidos para as funções precípua definidas no projeto, o geossintético deve também apresentar coeficientes de segurança adequados contra os danos de instalação e ao ambiente, que são específicos de cada local.

A caracterização das propriedades de um geossintético envolve a definição de gramatura; espessura; parâmetros de resistência de interface; abertura de filtração; permeabilidades normal e longitudinal; resistência ao puncionamento; durabilidade; resistência à luz ultravioleta (se exposto); compatibilidade com o meio (se necessário); resistências química, biológica, térmica; características mecânicas e hidráulicas, etc.. As características mecânicas compreendem a resistência à tração, resistência de emendas, fluência e resistência de interface. Já as características hidráulicas dizem respeito à resistência ao *piping*, resistência à tração, resistência à tração em emendas, permeabilidade, módulo de rigidez axial ( $F/e$ ) e a curva de ruptura por fluência. Algumas propriedades, como as hidráulicas, por exemplo, podem variar de acordo com os métodos de ensaio e, exatamente, por isso, as normas são importantes, de modo a

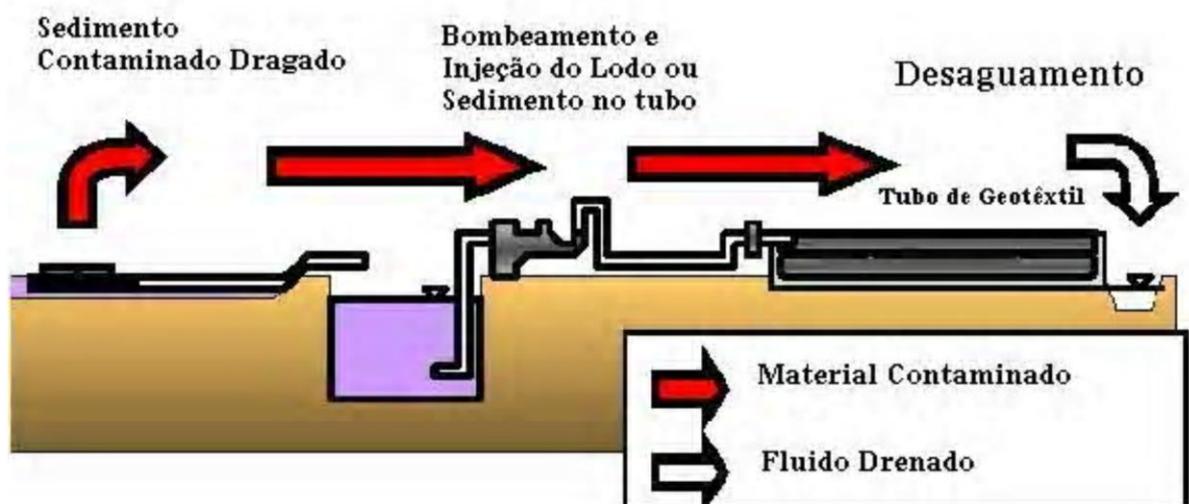
melhor adequar-se às condições de campo. A determinação das propriedades físicas dos geossintéticos é obtida de ensaios de execução simples e rápida através de procedimentos normatizados.

O uso desses produtos para a solução de problemas ambientais também recebem muita atenção da maioria das empresas, principalmente aquelas geradoras de resíduos, contaminados ou não. Estudos sobre estruturas de acondicionamento desses resíduos e garantia de sua estabilidade vêm adquirindo destaque. Os geossintéticos com mais aplicabilidade para este tipo de problema são os geotêxteis. Suas propriedades tornam possíveis a sua utilização em sistemas de drenagem, filtração, contenção e desaguamento de resíduos.

Um sistema tubular de geotêxtil destinado à contenção de material contaminado tem por objetivo reter a parte sólida deste material, permitindo a passagem do fluido. Paralelamente a isto, tem como compromisso resistir às elevadas tensões ao qual todo o sistema está submetido. Um tubo para esta finalidade pode ser confeccionado com duas camadas de geotêxtil, em função da solicitação. Em se tratando de um tubo com duas camadas, define-se a função da primeira camada, interna, como sendo a responsável pela filtração e a segunda, externa, como sendo a responsável pela resistência às tensões geradas. Tem-se, em geral, um geotêxtil não tecido na camada interna e um geotêxtil tecido na camada externa (Pilarczyk, 2000; Moo-Young & Tucker, 2002). As mantas de geotêxtil apresentam uma costura compatível com o meio onde serão expostas e, principalmente, com uma resistência suficiente aos esforços gerados durante o processo de preenchimento (instante crítico) e consolidação (quando as tensões vão sendo aliviadas).

O uso de tubos e bolsas de geotêxtil teve início nos anos 70. Primeiramente, foi empregado com o propósito estrutural, principalmente em obras costeiras e, a partir da década de 1980, para contenção de sedimentos dragados. Esses tubos podem ser de vários tamanhos, dependendo de alguns fatores, tais como, a quantidade de material a ser contido e a disponibilidade de espaço físico para acomodar os tubos durante o desaguamento.

O local para desaguamento deve ser definido em função dos propósitos do sistema, por exemplo, o reaproveitamento ou não do fluido drenado; e, deve ser escolhido e preparado de acordo com a natureza dos contaminantes presentes. Para um eficiente sistema de coleta da parte líquida, seja ela para descarte ou reutilização, deve ser providenciado um pátio impermeabilizado para a acomodação dos tubos. Um esquema geral de montagem de ensaio de enchimento e deságüe é usado no sentido de otimizar ao máximo a seqüência do processo, desde o bombeamento do resíduo até o direcionamento do líquido coletado, como ilustrado na Figura 2.11.



**Figura 2.11** : Esquema geral de enchimento e desaguamento (Mori et al 2002).

Fowler et al (2002) comentam que o ensaio em bolsas não deve ser usado para previsão de comportamento em adensamento, uma vez que este processo está diretamente ligado à influência do peso próprio do material e ao diâmetro do tubo. Cabe lembrar que o experimento realizado por estes autores para análise do adensamento aconteceu em “tubo” de pequeno comprimento, que não simula a condição de fluxo real de campo. Portanto, o tempo de adensamento pode ser subestimado.



**Figura 2.12** : Tubo experimental preenchido até 1,5 m (Fowler et al 2002).

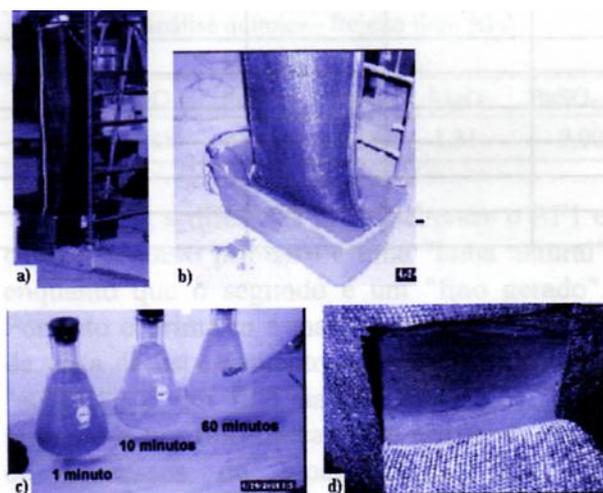
Em uma pré-análise da eficiência no processo de filtração e do desaguamento, são feitos ensaios de bolsa suspensa de geotêxtil (“*hanging Bag test*”). O ensaio consiste em medir, em um determinado intervalo de tempo, a quantidade de efluentes que passam através da bolsa de geotêxtil. Com esta quantidade de efluentes passante é possível estimar a quantidade total de sólidos suspensos e a razão de fluxo desse material (Martins 2006). Neste trabalho, são apresentados nos capítulos 4 e 5, os resultados e as discussões sobre os ensaios de bolsa suspensa de geotêxtil realizados com os resíduos sólidos gerados em ETAs.

O ensaio de bolsa suspensa é proposto primeiramente por Fowler et al. (1994) e associado a esta solução há atualmente uma proposta de norma – ASTM WK 7555. Conforme apresentado na Figura 2.13, o equipamento é composto por uma bolsa de geotêxtil costurada na lateral e na base, capaz de suportar e conter uma quantidade de material de preenchimento saturado. O volume total da bolsa suspensa varia conforme a capacidade da mesma. A abertura é presa por uma costura contínua, formando alças que recebem barras para o apoio. O conjunto se apóia em um suporte de material competente para o peso da bolsa. Além dos tanques para conter o material desaguado pela bolsa, são utilizados galões, cronômetro e balança e potes para coleta.



**Figura 2.13:** Ensaio com tubo suspenso.

Considerando as informações existentes sobre o assunto e citadas por vários autores (Fowler et al 1994, 1997, 2002; Gannett Fleming, 2003; Dewatering & Containment Technologies Inc, 2003; Kutay & Aydilek, 2004; Newman et AL, 2004; proposta ASTM WK 7555 2005, Koerner & Koerner, 2006; Lawson, 2006), temos que o procedimento do ensaio, cujas etapas estão ilustradas na Figura 2.14, consiste basicamente em verter o material no interior da bolsa de geotêxtil e coletar amostras do material percolado em intervalos regulares de tempo.



**Figura 2.14:** Procedimentos para o ensaio de bolsa de geotêxtil: a) preparação da bolsa; b) preenchimento; c) análise de amostras do percolado no decorrer do tempo; d) análise do material retido (Gannett Fleming, 2003).

As porcentagens de sólidos do material coletado são determinadas, juntamente com a análise das unidades do material retido na bolsa, com a finalidade de estimar a eficiência do desaguamento e da filtração do sistema. O desaguamento de material do tipo lodo ou sedimentos dragados, utilizando tubos de geotêxtil, é possível devido à propriedade hidráulica de filtração deste geossintético. Esta propriedade é responsável pela retenção das partículas sólidas e, ao mesmo tempo, permite a livre passagem do fluido presente.

Alguns fatores controlam ou simplesmente exercem influência sobre os mecanismos de filtração do geotêxtil, seja ele de tecido ou não. Assim, fatores como a estrutura do próprio geotêxtil, a estrutura do meio a filtrar e as condições de solicitação podem alterar o processo de filtração (Vidal & Urashima, 1999).

## 2.5. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO GEOTÊXTEL

A abertura de filtração de um geotêxtil é definida como a abertura equivalente ao diâmetro da maior partícula que passa através de seus poros. Para determinar essa característica utiliza-se o peneiramento por via úmida, adotado pela ISO/EN em 1999 (ISO 12956). A condição de carregamento normal ao plano da manta, sem tração neste plano, leva geralmente a uma redução da abertura de filtração determinada sem carga normal. Ensaio realizado por Gourc & Faure (1990) mostram uma pequena redução nos valores com o aumento da tensão confinante. Palmeira & Fannin (1998) observam que, para geotêxteis não tecidos de filamentos contínuos de poliéster, a redução da abertura de filtração é sensível até cerca de 25 kPa de carga normal, estabilizando-se para tensões maiores. Realiza-se tal definição em geral a favor da segurança. Fourie & Addis (1999) discutem as variações na abertura de filtração de geotêxteis tecidos submetidos à tração, mostrando que a abertura de filtração pode ser reduzida para geotêxteis espessos ou aumentada para geotêxteis de baixa massa por unidade de área.

#### 2.5.1. Condutividade hidráulica normal ao plano

Segundo explicam Vidal & Urashima (1999), a condutividade hidráulica normal ao plano dos geotêxteis é geralmente muito elevada e o estudo de fluxo num corpo-de-prova isolado estaria quase sempre em situação de fluxo turbulento. A norma proposta pela ISO 11058 (1999) é consistente, pois contorna o problema do fluxo laminar ou turbulento, definindo parâmetros que permitem estabelecer o comportamento do geotêxtil em função do gradiente hidráulico.

O princípio do ensaio é bastante simples e as normas contemplam a possibilidade de realizar ensaio a carga constante e a carga variável. No caso de carga variável, o ensaio é muito rápido, exigindo grande precisão dos instrumentos e do sistema de aquisição de dados. O ensaio para a determinação das características do produto pode apresentar como resultado uma carga hidráulica *versus* velocidade de fluxo, obtendo-se a condutividade hidráulica para a situação que se desejar.

Esses ensaios determinam a condutividade hidráulica normal ao plano da manta, sem confinamento, sendo que os geotêxteis compressíveis apresentam redução de vazios quando submetidos à tensão normal. A condutividade hidráulica de geotêxteis não tecidos agulhados pode ser estimada a partir da equação similar à proposta por Koerner (1998) para areias, conhecendo-se o valor para a situação nominal e a variação da porosidade a cada nível de tensão confinante (Vidal & Urashima, 1999; Vidal & Righetti 1990).

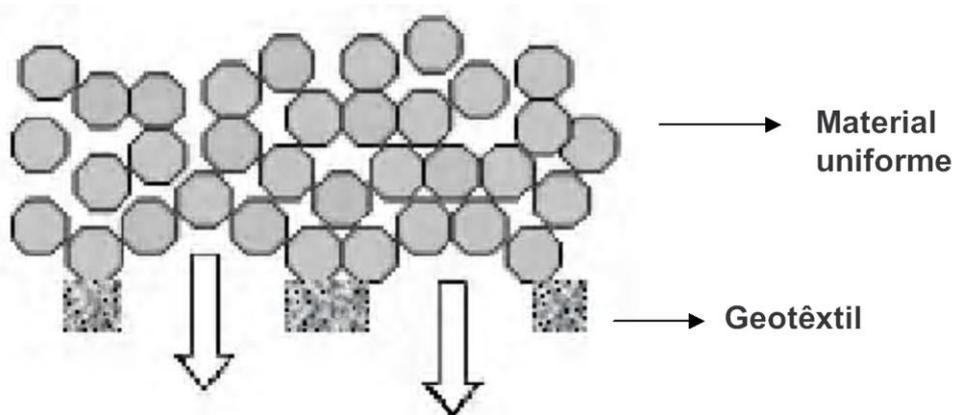
### 2.5.2. Mecanismos de filtração

Segundo Vidal & Urashima (1999), a estrutura do geotêxtil interfere no processo de filtração de acordo com sua espessura, tipo e dimensão de seus poros – o espaçamento entre as fibras ou filamentos. Em se tratando de um geotêxtil tecido constata-se um único confronto entre a partícula e o geossintético, o que já determina se a partícula passa ou fica retida. O que acontece num geotêxtil não tecido já é um pouco mais complexo, pois além do confronto de superfície, a partícula enfrentará outros confrontos durante sua trajetória ao longo da espessura do geotêxtil.

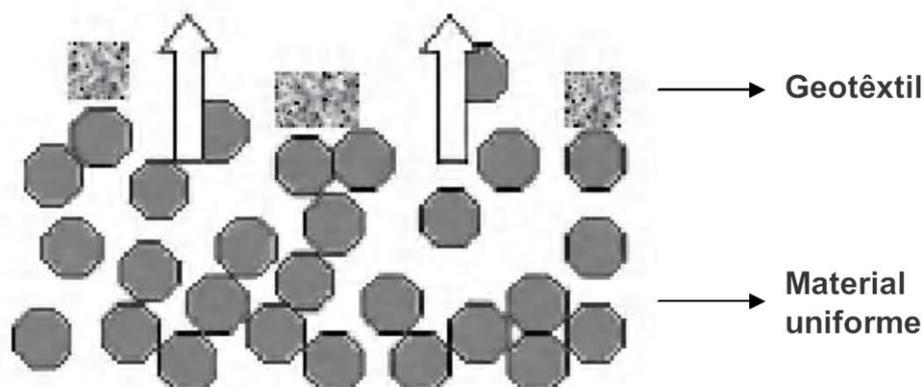
Em um geotêxtil não tecido termoligado, as fibras ou filamentos estão em contato direto, devido à fusão parcial que as une, reduzindo a espessura e formando poros de contorno fechado. Sendo assim, apesar dos poros serem de dimensão variável, obtém-se um resultado semelhante ao do tipo tecido.

Os geotêxteis não tecidos agulhados possuem estrutura tridimensional, ou seja, as fibras ou filamentos praticamente não se tocam (numa seção transversal), a não ser sob condições de confinamento significativas. Estas condições conferem a estes tipos de geotêxteis uma porosidade de cerca de 90% e a probabilidade do surgimento de novos confrontos para uma suposta partícula que esteja atravessando sua espessura (Vidal & Urashima, 1999).

Segundo Vidal e Urashima (1999), as condições de um meio poroso podem ser divididas em três situações: material a reter uniforme, material bem graduado e material mal graduado não uniforme. No caso de material uniforme, conforme ilustra as Figuras 2.15 e 2.16, o comportamento em filtração está diretamente ligado ao sentido do fluxo. Caso o fluxo atue no sentido da gravidade, mesmo que inicialmente ocorra perda de partículas, o movimento destas partículas em direção ao geotêxtil acaba fazendo com que elas tendam a formar um arco sobre o poro, estabilizando o sistema, desde que os poros não sejam muito maiores do que as partículas. Entretanto, é oportuno mencionar que o fluxo no sentido inverso pode provocar perda contínua de partículas.

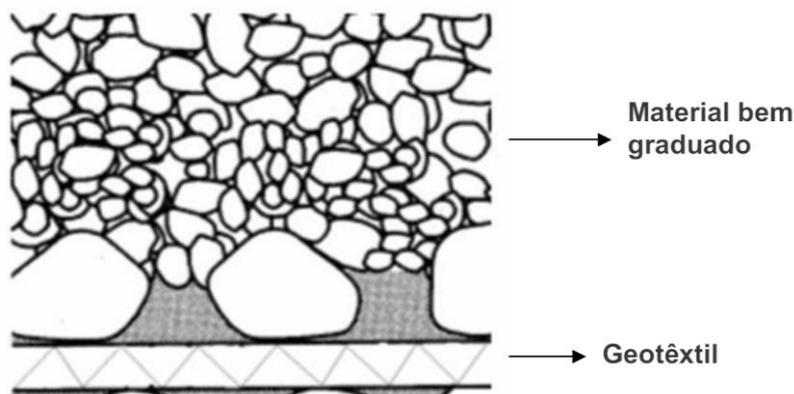


**Figura 2.15:** Formação de arco devido à direção do fluxo ser a mesma da força da gravidade (Vidal & Urashima, 1999).



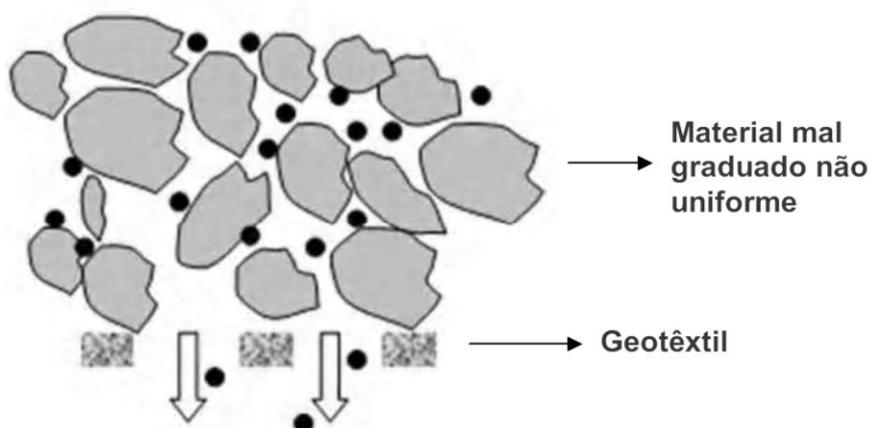
**Figura 2.16:** Perda de partículas devido à direção do fluxo ser inversa à da força da gravidade (Vidal & Urashima, 1999)

No caso de material bem graduado, a eventual movimentação de partículas causada pelo fluxo ocasiona um pré-filtro quando encontra o geotêxtil, pois, à medida que as partículas vão se aproximando dos poros, alguma partícula que seja maior que seu tamanho bloqueia a passagem, retendo as menores, conforme é mostrado na Figura 2.17.



**Figura 2.17:** Formação de pré-filtro na filtração de material bem graduado (Vidal & Urashima, 1999)

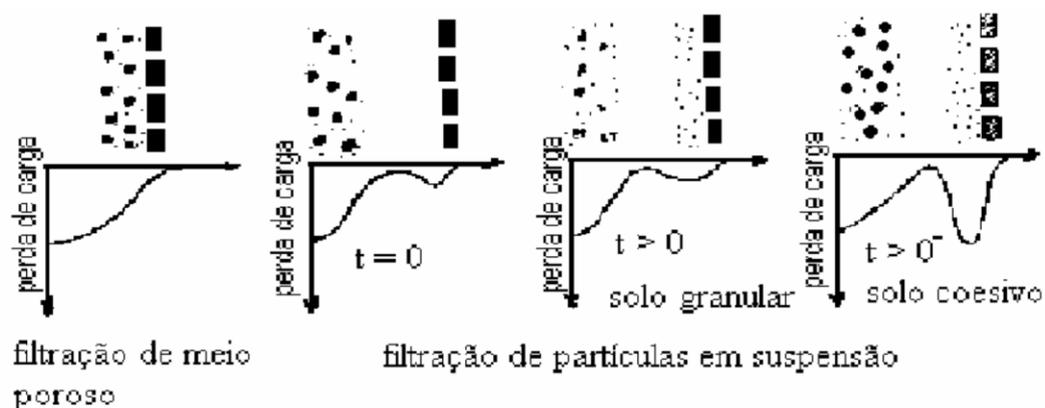
Os materiais mal graduados não uniformes (apresentando curva granulométrica com coeficiente de curvatura fora do intervalo entre 1 e 3) podem apresentar sufusão, ou seja, passagem livre das partículas mais finas através da estrutura do solo ou erosão interna, em função das condições do fluxo, conforme mostrado na Figura 2.18.



**Figura 2.18:** Perda de partículas ou sufusão na filtração de material mal graduado não uniforme (Vidal & Urashima 1999)

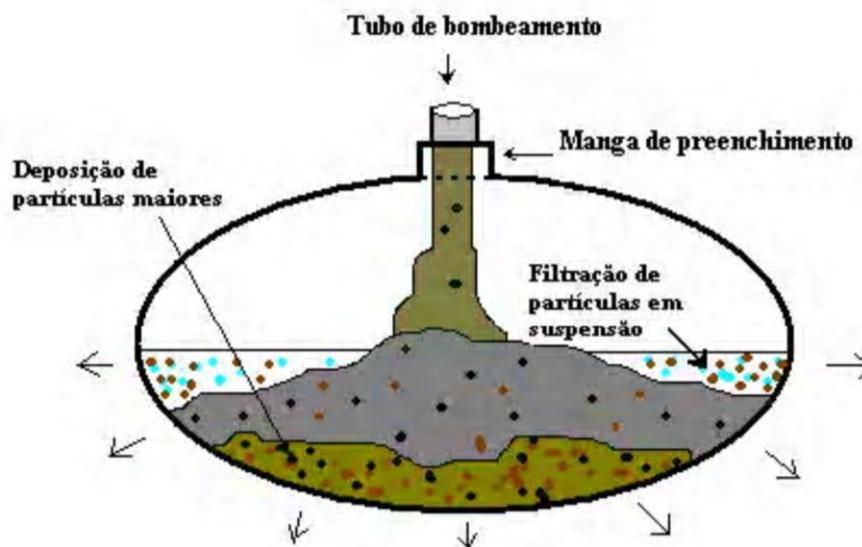
Em se tratando de um lodo ou sedimento contaminado submetido a um desaguamento, não é interessante que haja esta perda de partículas, mesmo aumentando a poro-pressão e reduzindo a velocidade de fluxo, ou seja, aumentando o tempo de desaguamento, pois a intenção deste procedimento é conter o material particulado.

Vidal & Urashima (1999) também comentam que a filtração em suspensão é um problema crítico, pois, conforme se pode observar na Figura 2.19, dada a perda de carga que ocorre quando a partícula carregada encontra o geotêxtil, ela tende a se depositar em sua superfície, mesmo sendo muito menor que a abertura de filtração da manta. Os casos de colmatção física observados referem-se quase sempre a situações deste tipo.



**Figura 2.19:** Mecanismos de filtração — influência do meio a filtrar (Vidal & Urashima, 1999).

Considerando o processo no interior do tubo de geotêxtil, conforme a Figura 2.20, observam-se zonas de filtração em suspensão nas laterais no momento do preenchimento do tubo enquanto que as partículas maiores se depositam mais na região inferior do tubo (Gaffney et al., 1999; Moo-Young & Tucker, 2002). Esta área das laterais do geotêxtil seria provavelmente colmatada mais rapidamente. Tal ocorre com os resíduos oriundos das estações de tratamento de esgotos.



**Figura 2.20:** Zonas de deposição do material durante o bombeamento

Ainda, segundo Vidal & Urashima (1999), propõe-se um grande número de critérios relacionados à retenção apresentando diferentes considerações. Christopher et al (1992) expõem a discussão a uma diversidade de critérios propostos baseados na equação 2.1 a seguir:

$$O_n < x \cdot d_m \quad (2.1)$$

sendo:

$O_n$  = Diâmetro equivalente do poro do geossintético

$n$  = Porcentagem de poros menor do que  $O$  (geralmente representada pela abertura de filtração do geotêxtil)

$x$  = Fator semi-empírico estabelecido pelo autor da proposta

$d_m$  = Diâmetro da partícula a reter tal que  $m\%$  das partículas sejam menores do que ela. Um dos critérios aplicado com maior frequência, baseados nesta consideração, é o do Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG, 1986), dado pela equação 2.2 a seguir:

$$O_{95} < C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot d_{85} \quad (2.2)$$

sendo:

$O_{95}$  = Abertura de filtração do geotêxtil obtida por peneiramento hidrodinâmico

$d_{85}$  = Diâmetro equivalente do solo, tal que 85% (em peso) de todas as partículas sejam inferiores a ele

$C_1, C_2, C_3, C_4$  = Coeficientes fornecidos na Tabela 2.10.

Coeficiente	Valor	Caso
C1	1,00	Solo bem graduado
	0,80	Solo mal graduado
C2	1,25	Solo denso e confinado
	0,80	Solo fofo desconfinado
C3	1,00	Gradiente hidráulico $i < 5$
	0,80	$5 < i < 20$
	0,60	$20 < i < 40$
C4	1,00	Somente para filtração
	0,30	Filtração e drenagem

**Tabela 2.10:** Coeficientes para o critério de Urashima (1999).

Vidal et al (1999) comentam que para solos não uniformes com risco de instabilidade interna, Lafleur (1999) propõe adotar abertura de filtração por peneiramento hidrodinâmico entre 1 e 5 vezes o  $d_{30}$  do solo a filtrar. Koerner (1998) sugere como parâmetro de análise da retenção em geotêxteis tecidos a percentagem de área aberta (PAA). O autor recomenda um PAA maior do que 4-6 % para satisfazer os critérios de colmatação. A limitação dos critérios convencionais leva os especialistas a procurarem avaliar a capacidade de retenção de um filtro por teoria probabilística.

Urashima (1996) propõe um método de dimensionamento para filtros têxteis baseado no estudo probabilístico desenvolvido por Silveira (1965), enfocando aspectos do problema relativo ao carregamento de partículas, em que a espessura requerida do filtro (IGT) é tal que seja nula a probabilidade de uma partícula atravessá-la em toda a sua extensão, dentro um nível de confiança ( $P'$ ) preestabelecido e calculado a partir da equação 2.3.

$$P' = 1 - P^n \quad (2.3)$$

onde:

P é a probabilidade de uma partícula de diâmetro  $d'$  encontrar (em um confronto) um poro de diâmetro  $d > d'$  e N é o número de confrontos. A análise do comportamento do filtro pela teoria proposta nos permite determinar o nível de confiança de retenção de uma dada partícula.

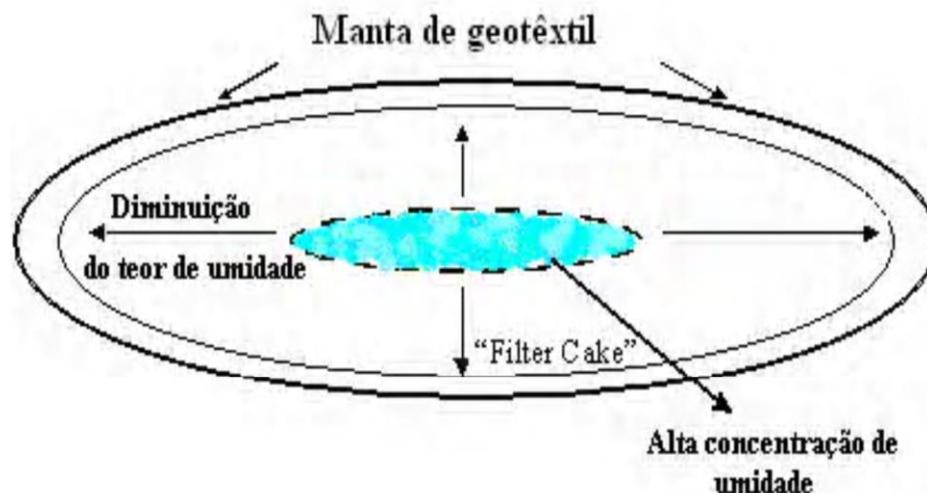
Vários métodos experimentais vêm sendo propostos para a obtenção da curva de distribuição de poros com resultados discutíveis (Urashima & Vidal 1995; Urashima et al, 1999; Urashima, 1996), devendo ser avaliada a aplicabilidade dos métodos utilizados. De acordo com a proposta apresentada por Urashima (1996), para dimensionar filtros, inicialmente deve-se estabelecer o diâmetro da partícula do material a ser retido. Com as curvas de distribuição de poros e as respectivas distâncias médias entre confrontos dos geotêxteis disponíveis para o projeto, calcula-se P (a probabilidade da partícula escolhida encontrar, em um confronto, um vazio de diâmetro maior que o seu) para o diâmetro definido.

No caso dos tubos de geotêxtil, pode-se fixar um nível de confiança para otimizar o projeto, entretanto, é necessário trabalhar com uma linha de produtos que mantenha as características (as mesmas distâncias médias entre confrontos), de modo a escolher o produto que melhor se adapte. Uma alternativa seria solicitar a fabricação de um produto situado no intervalo de espessuras de fabricação quando se tratar de grandes obras.

### 2.5.3. Processo de Colmatação

Quando um material do tipo lodo, seja ele um sedimento argiloso ou resíduo industrial, passa por um processo de filtração com geotêxtil, a experiência mostra que a perda de partículas através do geossintético pára rapidamente e a água drenada torna-se mais limpa. Provavelmente, isto se dá devido à colmatação física ou biológica do geotêxtil e este processo em um tubo de geotêxtil é chamado de *Filter Cake*, o qual aumenta a filtração, porém diminui a permeabilidade (Leshchinsky, 1992; Gaffney et al, 1999). O *Filter Cake* é uma película que se forma na interface do geotêxtil com o

material que está sendo desaguado. Esta película dificulta a passagem do fluido que está no interior do tubo através do geotêxtil. Este fenômeno pode ser observado na ilustração da Figura 2.21.



**Figura 2.21:** Distribuição da umidade e formação do *Filter Cake* (Gaffney et al, 1999)

Segundo estudos feitos por Moo-Young et al (2002), a quantidade de sólidos em suspensão durante a filtração ou TSS (*Total Suspended Solids*) é alta no início do processo, mas diminui sensivelmente assim que se forma o *Filter Cake*. Todos estes fenômenos que dificultam a saída do fluido costumam reter ainda um alto teor de umidade no interior dos tubos de geotêxtil, o que, em alguns casos, requer a realização de um dessecamento, ou seja, a abertura dos tubos para que a parte úmida no seu interior seja exposta ao ar e para que haja, por evaporação, uma diminuição ainda maior do teor de umidade (Gaffney et al, 1999; Fowier et al, 2002).

Como a técnica se propõe a desaguar materiais de diferentes origens – principalmente os que contêm contaminantes como, por exemplo, coliformes fecais e agentes patogênicos em geral –, o risco da colmatação biológica deve ser também estudado. Essa questão pode ser avaliada por ensaios, como o estabelecido pela ASTM (1991).

A adição de polímeros ao material que necessita ser desaguado é uma prática bastante comum. Essas substâncias químicas são chamadas de aditivos ou simplesmente floculantes e, por meio de reações químicas, combinam-se aos componentes do material a ser desaguado formando “flocos”, o que permite que a

retenção seja mais eficiente e também diminui o risco de colmatção do geotêxtil por partículas finas – comuns em material do tipo lodo (Vidal, 2003).

#### 2.5.4. Critérios de permeabilidade

Vidal et al (1999) propõem modelos matemáticos para os critérios de permeabilidade que se baseiam, em geral, na relação entre a condutividade hidráulica normal ao plano do geotêxtil e a condutividade hidráulica do solo a reter. Conforme expõem, o critério proposto por Christofer et al (1992) mostra que o valor de “ $y$ ”, fator proposto pelo autor do critério, pode variar entre 0,1 e 10. Já Lafleur (1999) propõe o valor de “ $y$ ” igual a 20 para solos não uniformes com risco de instabilidade interna. A proposta de Fannin et al (1998) estabelece que a evolução da permeabilidade seja avaliada através de ensaios de razão de gradiente, analisando-se o excesso de perda de carga.

Não foi encontrada na literatura uma proposta específica para o desaguamento em tubos de geotêxtil. No caso dos tubos para desaguamento, a condutividade hidráulica do material retido varia em função do modo de deposição das partículas, da posição no tubo e do tempo de desaguamento. No início do bombeamento e no topo do tubo ocorre filtração de partículas em suspensão – condição mais crítica. As maiores cargas hidráulicas acontecem na base, mas esta região tem rapidamente deposição de partículas e o fluxo passa a ser condicionado por este material.

É importante lembrar que o processo de retenção altera rapidamente a condição inicial em relação à permeabilidade. Nesta fase pode ser avaliada a condutividade hidráulica em função dos critérios propostos para a filtração de meios porosos, considerando como condutividade hidráulica do solo, a condutividade hidráulica do material obtida a partir de ensaio realizado em corpo-de-prova depositado no permeâmetro em forma de lama e adensado sob peso próprio, por exemplo.

### 2.5.5. Eficiência na filtração e no desaguamento

A eficiência da filtração, segundo Moo-Young et al. (2002), é determinada pela comparação da percentagem total de sólidos em suspensão final  $TSS_{final}$  ( $TSS$  — *Total Suspended Solids*), com a percentagem total de sólidos em suspensão inicial  $TS_{inicial}$  (mg/L) da amostra. Esta eficiência está na relação do tempo que um material leva para desaguar e atingir uma determinada percentagem de sólidos.

O valor percentual da eficiência do desaguamento (ED) pode ser determinado pela equação abaixo (Moo-Young et al., 2002). Essa equação compara as porcentagens de sólidos finais ( $PS_{final}$ ) e inicial ( $PS_{inicial}$ ) no material retido:

$$ED = \frac{PS_{final} - PS_{inicial}}{PS_{inicial}} * 100\%$$

Da análise da equação observa-se que a eficiência do desaguamento não está mais limitada a um valor máximo de 100% como no caso da eficiência de filtração. Na realidade, a proposta de Moo-Young et al. (2002) tem como valor limite máximo o valor do teor de umidade inicial (para uma análise simplificada, assumindo que não há perda de partículas pelo filtro).

A situação de tração e de carregamento normal ao plano da manta nos tubos de geotêxtil pode influenciar as propriedades hidráulicas. Geralmente, essas alterações implicam uma redução desta abertura. Mas, para geotêxteis tecidos de baixa massa por unidade de área, a solicitação em tração pode implicar um aumento da abertura de filtração. É importante ressaltar que os ensaios de bolsa devem acompanhar esta análise. Isto permite avaliar de maneira mais precisa o comportamento do geotêxtil escolhido quanto à retenção de partículas e de contaminantes e, por conseguinte, a qualidade do fluido drenado.

Não foram encontradas discussões sobre o critério de permeabilidade na literatura. Talvez isto se deva ao fato de que é comum que esta avaliação seja desprezada na análise de filtração de solos em virtude da permeabilidade do geotêxtil (geralmente bastante superior àquela do solo).

No que se refere à retenção de material em forma de lama, geralmente, observa-se materiais finos e com permeabilidade extremamente baixa. Nesse sentido, a permeabilidade do geotêxtil é sempre maior do que a do material em desaguamento – desde que haja material depositado na interface com o geotêxtil. O tipo de bombeamento tem também grande influência no processo de deposição. Deve também se considerar que, quando o material desaguado tem origem orgânica ou constata-se a presença de agentes patogênicos, há o risco de colmatção biológica.

Nesse capítulo foram abordados os temas relativos ao processo de tratamento da água, a produção de resíduos sólidos nas ETAs, os aspectos da legislação ambiental em relação aos resíduos produzidos nas ETAs, o uso de geossintéticos no deságüe de resíduos sólidos e as propriedades hidráulicas dos geotêxteis. No capítulo seguinte, passo a apresentar a metodologia empregada no projeto-piloto em escala experimental. O projeto-piloto contempla duas etapas: ensaio com *Bag* suspenso e teste com *Bag* disposto ao solo.

## CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados e conclusões da pesquisa. A abordagem desenvolvida visa permitir uma melhor caracterização do material, atendo-se à definição das etapas para a execução da pesquisa – com *bag* suspenso e *bag* disposto ao solo – e à caracterização química, física e biológica dos resíduos gerados e geocondicionados, isto é, conhecer aspectos relevantes em relação à composição química do material, distribuição de partículas, filtrabilidade, além da proposta de monitoramento e caracterização da água drenada. Esses parâmetros permitem avaliar a eficiência na remoção de água do material com o uso do *bag*, bem como identificar parâmetros analíticos que possam permitir o comportamento do material geocondicionado, de forma tal, que permita fazer avaliações quanto à sua disposição final e prováveis impactos ambientais.

Para facilitar o estudo opta-se pela realização de duas etapas: a primeira considerando o ensaio do *bag* suspenso, visando uma avaliação preliminar da eficiência da filtração, a resistência do geossintético e o comportamento químico e físico dos lodos de ETAs; a segunda, que representa o teste propriamente dito, que visa avaliar a tecnologia em escala real.

### 3.1. ENSAIO COM BAG SUSPENSO

O ensaio com *bag* suspenso foi proposto primeiramente por Fowler et al. (1994) e existe atualmente uma proposta de norma com base nessa aplicação – ASTM WK 7555. O ensaio consiste na suspensão de um tubo ou *bag*, com o uso de uma talha, e o bombeamento do lodo já floculado para o seu interior, conforme a Figura 3.1. As taxas de retenção de sólidos e o fluxo do líquido drenado são determinados.



**Figura 3.1:** Teste do *bag* suspenso

Com a avaliação da quantidade de sedimentos passantes, é possível estimar a quantidade total de sólidos suspensos e a razão de fluxo desse material (Martins, 2006). O ensaio permite ainda avaliar as propriedades do material desaguado ao se examinar a natureza do *case*. Apesar de apresentar resultados de bancada, é geralmente realizado em campo, principalmente quando uma das finalidades é a de avaliar o comportamento do material específico de enchimento e do geotêxtil escolhido.

O equipamento utilizado é composto por um *bag* de geotêxtil, costurado na lateral e na base, capaz de suportar e conter a quantidade de material de preenchimento saturado. O volume total do *bag* utilizado para o teste foi de aproximadamente 200 litros.

Descrição	Dimensão (m)	Altura máxima (m)
<i>Bag</i> geossintético suspenso	0,6 largura entre as costuras	1,75 altura

**Tabela 3.1:** Dimensões do *Bag* suspenso

As características do *bag* utilizado no teste estão descritas abaixo:

- O fio de polipropileno, componente do produto é de alta resistência à tração e elevada tenacidade, diferenciando-se completamente dos fios de polipropileno fabricados no Brasil;
- A sua tecelagem é trançada em rede, de forma trapezoidal permitindo a contenção de sólidos;
- A devolução do líquido armazenado para o ambiente é feita através de processo químico com adição do bombeamento de um polímero que reagindo com o material têxtil torna o material drenado passível de processo complementar;
- A costura dos recipientes é feita com alta resistência e é própria para as condições de operação;
- O fabricante garante que a filtração é univetorial, ou seja, somente de dentro para fora, impedindo que haja penetração por dentro dos poros do tecido de água, produtos químicos em geral, e de raios solares com radiação UV.

A especificação completa da malha dos *bags* utilizados consta na Figura 3.2. A abertura é presa por uma costura contínua, formando alças que receberão barras para apoio. Os materiais necessários para o teste são: *bag* com capacidade de 200 litros, tambor de 200 litros, balde de 20 litros, talha, polímero, agitador, corda e vidraria.

Considerando as informações disponíveis sobre o tema, citadas por vários fontes (Fowler et. al 1994, 1997, 2002; Dewatering Containment Technologies Inc., 2003; Kutay & Aydilek, 2004; Newman et al, 2004; Proposta ASTM WK 7555, 2005; Koerner & Koerner, 2006; Lawson, 2006), o procedimento de ensaio consiste em verter o lodo para o interior do *bag* de geotêxtil e coletar amostras do material percolado em intervalos de tempo.

Propriedades Mecânicas	Regulamentação	Unidade	Valor médio mínimo do rolo	
			Mínimo	Máximo
Resistência elástica (final)	ASTM D 4595	kN/m (lbs./ft.)	70,0 (4800)	96,3 (6600)
Resistência elástica (5% de tensão)	ASTM D 4595	kN/m (lbs./ft.)	17,5 (1200)	61,3 (4200)
Resistência elástica (10% de tensão)	ASTM D 4595	kN/m (lbs./ft.)	43,8 (3000)	96,4 (6600)
Fator de resistência da costura	ASTM D 4884	kN/m (lbs./ft.)	52,5 (3600)	
Taxa de Fluxo	ASTM D 4491	l/min/m <sup>3</sup> (gal/min/ft <sup>2</sup> )	813 (20)	
Permeabilidade	ASTM D 4491	cm/seg	0,040	
Constante dielétrica	ASTM D 4751	seg <sup>-1</sup>	0,26	
Tamanho da abertura aparente	ASTM D 4751	mm (peneira americana)	0,425 (40)	
Resistência UV (em 500 horas)	ASTM D 4355	% de energia retida	70	
Propriedades Físicas	Regulamentação	Unidade	Valor	
Massa/Área	ASTM D 5261	g/m <sup>2</sup> (oz/yd <sup>2</sup> )	585 (17,3)	
Dimensões do bag	--	m (ft)	4,5 (15) x 91 (300)	
Área do bag	--	m <sup>2</sup> (yd <sup>2</sup> )	418 (500)	
Peso estimado do bag	--	kg (lbs)	238 (525)	

**Fonte:** Esco Comercial Ltda. (informações do rótulo)

**Figura 3.2:** Especificações do bag utilizado no teste.



**Figura 3.3:** Deságüe no teste do bag suspenso

Alíquotas de amostra dos sólidos totais do lodo geocondicionado são coletadas durante o teste com a finalidade de estimar a eficiência do desaguamento e filtração do sistema, conforme demonstrado na Figura 3.3, para auxiliar na avaliação da taxa de deságüe. Durante o ensaio realiza-se um cuidadoso monitoramento seguindo o controle dos procedimentos propostos na Tabela 3.2.

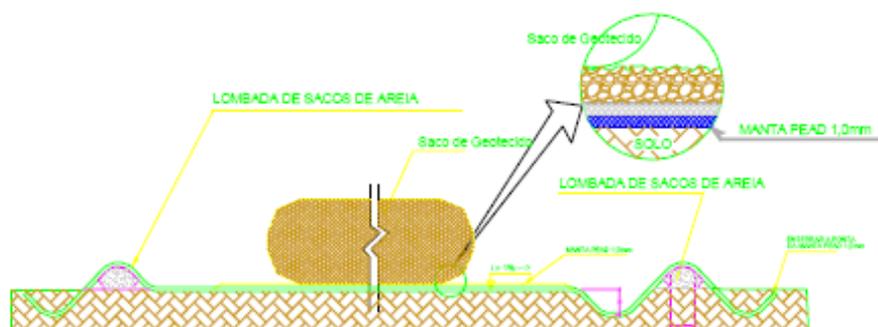
CONTROLE	FREQUÊNCIA DE REALIZAÇÃO	PARÂMETRO (s) MONITORADO (s)
Físico	Diário (de hora em hora)	Volume drenado
Químico	Semanal	% Sólidos totais*
Floculação	por Batelada	Eficiência floculação
* previsto análise parâmetros físico-químicos conforme parâmetros NBR 10004 e CONAMA 357/04.		

**Tabela 3.2:** Programa de monitoramento de controle do teste do *bag* suspenso

### 3.2. TESTE COM *BAG* DISPOSTO SOBRE O SOLO

Para o teste com *bag* disposto ao solo são necessários: a preparação do terreno, o conhecimento e a autorização do órgão ambiental e a construção da base de fundação (célula) onde se apoiará a unidade do geossintético. A célula de base deve estar devidamente nivelada, com declividade máxima de 0,5% no sentido longitudinal (axial) ao *bag*. Uma membrana impermeável de polietileno de alta densidade (PEAD) deve ser aplicada por toda a área de assentamento, inclusive nas barreiras de contenção da periferia, finalizando com a calha que leva à caixa de coleta e/ou bombeamento.

Observadas as orientações acima, após a aplicação da manta de impermeabilização, aplica-se uma manta de geotecido permeável e resistente ao trânsito de máquinas. Antes da colocação do *bag*, opta-se por colocar uma camada de 15 cm de brita, conforme ilustrado nas Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente. A área utilizada para a célula é de aproximadamente 170 m<sup>2</sup> (20,8 x 8,20 m), considerando o tamanho do *bag* utilizado no teste.



Fonte: Manual Geotube

Figura 3.4: Perfil da Célula do *bag* disposto



Figura 3.5: Preparação da célula na ETA, Gravataí-RS

A planta utilizada no teste considerou o bombeamento do lodo da lagoa para dentro de um tanque de equalização com capacidade de aproximadamente  $20 \text{ m}^3$ . O lodo equalizado é, então, bombeado através de chicana para o *bag*, conforme é ilustrado nas Figuras 3.6 e 3.7.



**Figura 3.6:** Tanque de equalização do lodo

É necessário um ponto de aplicação do polímero, antes da chicana, que promova a floculação e garanta a separação das fases líquida e sólida. Para não haver comprometimento do teste, verifica-se a efetiva floculação em um ponto após a chicana e antes da entrada do *bag*.

A planta possui um *bypass*, uma câmara de manobra dimensionada após a chicana (Figura 3.7), para o escoamento do efluente, na eventualidade de não se efetivar a floculação. Essa linha de retorno é necessária para a verificação da formação dos flocos, antes do bombeamento para o *bag*, evitando desperdícios com polímeros e aumentando a eficiência de drenagem do sistema.



**Figura 3.7:** Câmara de manobra após a chicana (ziguezague)

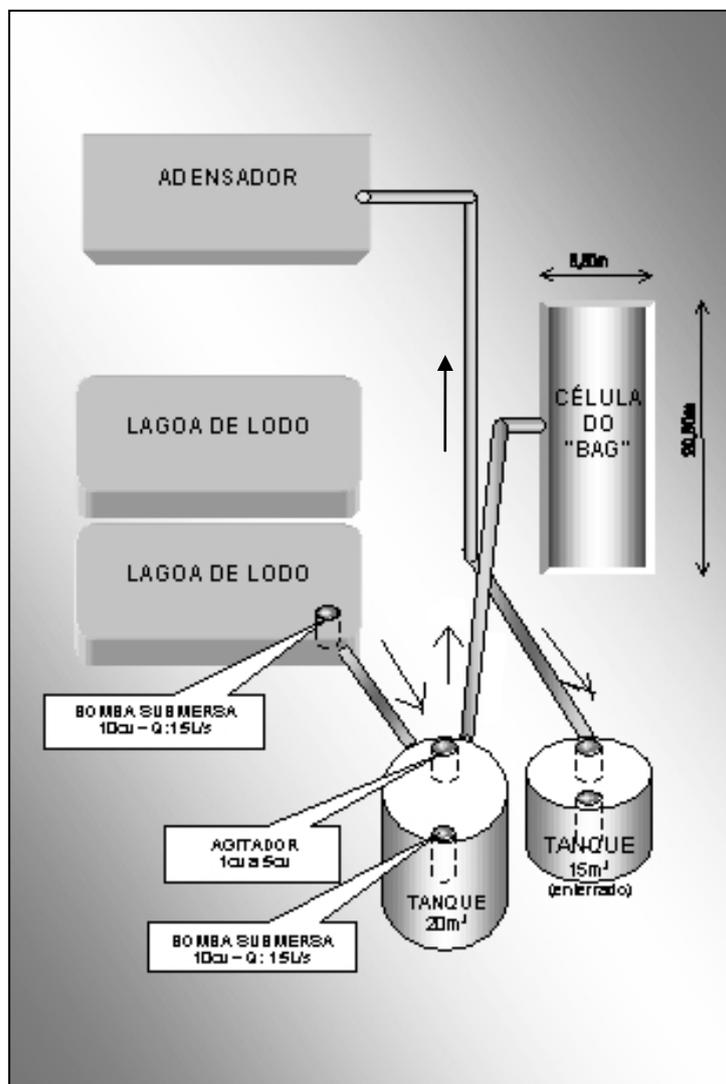
A água drenada escoa para um tanque enterrado com capacidade de  $15 \text{ m}^3$ , é bombeada para um adensador e retorna para o salto hidráulico, ou seja, é recirculada para o início do processo de tratamento da água, conforme demonstrado no croqui apresentado na Figura 3.8.

Os ensaios realizados com o *bag* disposto sobre o solo iniciaram em dezembro (Figura 3.9) com operação por batelada e com monitoramento em três diferentes pontos: na entrada do tanque de equalização, dentro do *bag* e no tanque de recirculação.

Os materiais utilizados no experimento de campo são os relacionados a seguir:

- tanque de  $20 \text{ m}^3$  usado para a equalização do lodo;
- tanque de  $15 \text{ m}^3$  usado para a recirculação da água drenada;
- dosador de polímero;
- tanque para a preparação do polímero;
- agitadores para o tanque de equalização e o tanque do polímero;
- bomba (no teste foram utilizadas bombas submersas);

- *bag*;
- célula;
- chicana.



**Figura 3.8:** Croqui da planta do *bag* disposto sobre o solo



**Figura 3.9:** Foto do *Bag* disposto sobre o solo

Para auxiliar no monitoramento da operação, o teste foi dividido em duas etapas: pré-operação e operação. Na etapa de pré-operação, o bombeamento foi realizado por batelada, monitorando-se o sistema por uma hora e meia após o bombeamento. Os resultados obtidos mostram que a turbidez da água drenada diminui à medida que o tempo de descanso do *Bag* aumenta. Nesta etapa incidem diversos problemas relativos ao bombeamento e à dosagem do floculante, cuja adequação às condições de operação da ETA precisou ser providenciada.

Na etapa de operação, optou-se pelo bombeamento contínuo, ainda por batelada, onde o limitador do sistema é a altura do *bag* e o percentual de sólidos presentes no efluente. O lodo bombeado tem, em média, 1% de sólidos totais. A frequência e os parâmetros de controle utilizado no teste do *bag* disposto sobre o solo estão apresentados na Tabela 3.3.

CONTROLE	ETAPA OPERAÇÃO	FREQUÊNCIA DE REALIZAÇÃO	PARÂMETRO MONITORADO	
			RESÍDUO SÓLIDO	ÁGUA DRENADA
FÍSICO	PRÉ-OPERAÇÃO	DIÁRIO ( por bombeamento)	vol. Bombeado	vol. Recirculado
	OPERAÇÃO	DIÁRIO ( por bombeamento)	vol. Bombeado	vol. Recirculado
QUÍMICO	PRÉ-OPERAÇÃO	DIÁRIO ( a cada 30min)	% sólidos totais*	físico-químicos
	OPERAÇÃO	DIÁRIO ( a cada 30 min)	% sólidos totais	físico-químicos
FLOCULAÇÃO	PRÉ-OPERAÇÃO	DIÁRIO ( por tina)	eficiência floculação	% sólidos totais
	OPERAÇÃO	DIÁRIO ( por tina)	eficiência floculação	% sólidos totais

**Tabela 3.3:** Programação de controle do teste do *bag* disposto sobre o solo.

Para o monitoramento da operação foram definidos três grupos de parâmetros de controle, tanto para o teste do *bag* suspenso como para o teste do *bag* disposto sobre o solo.

Grupo de parâmetros físicos: compreende controles de volume bombeado e volume recirculado dos tanques, controle da altura de operação do *bag* e controle do deságüe do *bag*.

Grupo de parâmetros químicos: compreende controles analíticos realizados nos resíduos sólidos no tanque de equalização, na água drenada coletada no tanque de recirculação e nos resíduos geocondicionados no *bag*, no decantador e na lagoa de infiltração.

Grupo de parâmetros da floculação: compreende controles da qualidade do floco e dos percentuais de sólidos totais associados à dosagem de polímero no tanque de preparação do floculante.

No capítulo seguinte, serão abordadas as características químicas identificadas na composição dos resíduos gerados pelo processo tradicional de tratamento da água e a influência de diferentes fatores e insumos para a composição e quantificação dos resíduos gerados.

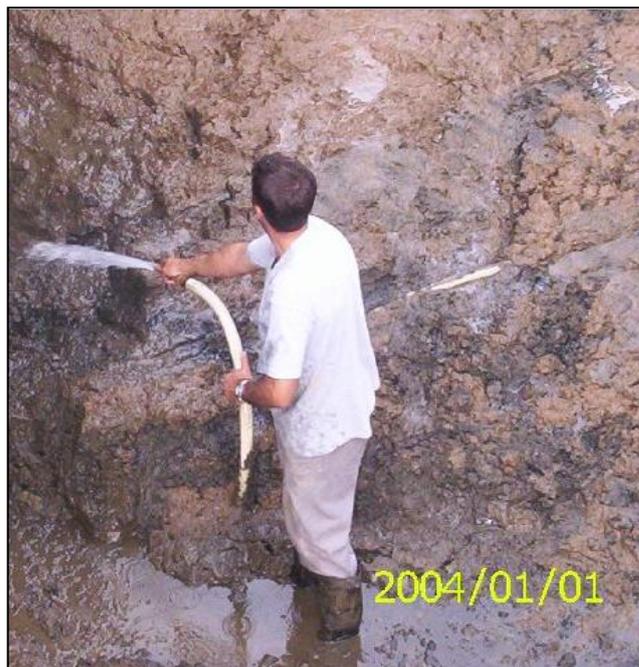


## **CAPÍTULO 4 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E BIOLÓGICAS**

### **4.1. CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS.**

A coagulação/floculação com adição de sulfato de alumínio é um dos processos mais utilizados no Brasil para a clarificação da água em ETAs e constitui uma etapa do processo de potabilização da água. No entanto, esse processo tem como subproduto inconveniente a produção de dois tipos de elementos: o lodo sedimentado no fundo dos decantadores, que contém materiais inertes, materiais orgânicos; e, precipitados químicos, incluindo hidróxidos de alumínio e a água de lavagem dos filtros, que incluem pequenos flocos formados pela aglomeração de colóides e hidróxidos de alumínio (Viessman Jr. Hammer, 1998).

Os resíduos provenientes de uma estação de tratamento de água de ciclo completo são gerados basicamente a partir de limpezas ou descargas de decantadores, de floculadores e de lavagem dos filtros. O processo de limpeza do decantador e dos filtros é ilustrado nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.



**Figura 4.1:** Perfil do lodo do fundo do decantador.



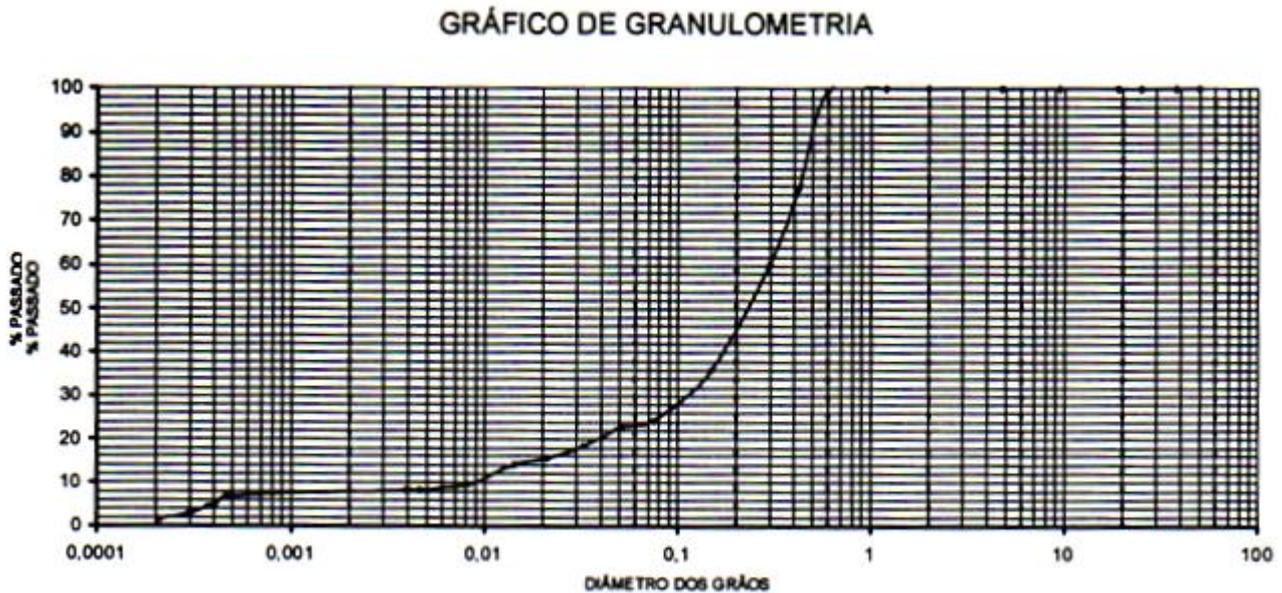
**Figura 4.2:** Perfil do efluente da lavagem dos filtros.

Em termos volumétricos, a maior quantidade é produzida na lavagem dos filtros. No entanto, dado que uma grande quantidade de água é empregada na sua descarga, os efluentes apresentam baixa concentração de sólidos (Figura 4.3). Em termos de massa, a maior quantidade de lodo é gerada no sistema de separação sólido/líquido, ou seja, nos decantadores (os mais leves na parte superior e os mais pesados situam-se no fundo).



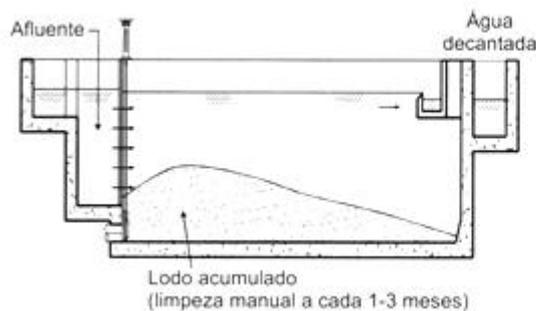
**Figura 4.3:** Processo de lavagem dos filtros.

A granulometria média dos resíduos sólidos gerados em ETAs, conforme a NBR 7181/84, é apresentada na Figura 4.4. Na ETA de Gravataí verifica-se essencialmente a presença de areia, silte e argila.



**Figura 4.4:** Segundo a NBR 7181/84, a granulométrica dos resíduos sólidos gerados em ETAs.

Durante a lavagem do bloco hidráulico (o que pode durar algumas horas) ocorre a limpeza do decantador. Na maioria dos sistemas, essa limpeza ainda é realizada manualmente. A limpeza dos decantadores é geralmente realizada entre 45 dias e 6 meses, pois os sólidos tendem a se compactar e adensar próximo à cortina difusora entre as limpezas sucessivas, conforme no esquema da Figura 4.5 e nas fotos da Figura 4.6.



**Fonte:** Di Bernardo (2005)

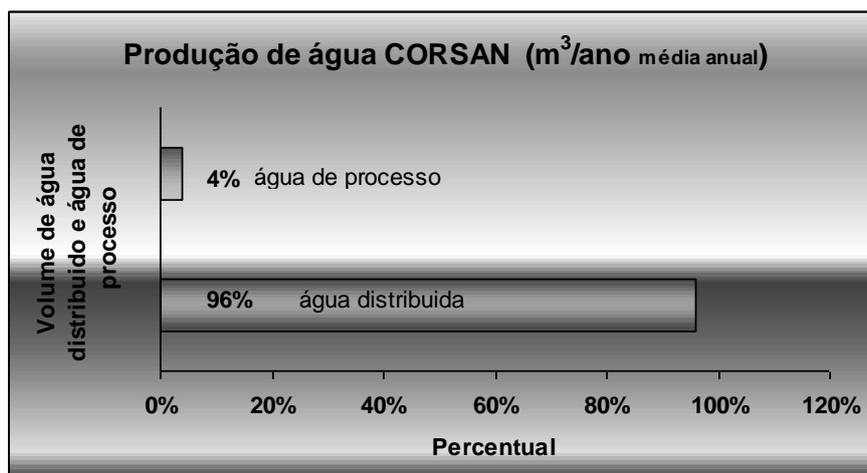
**Figura 4.5:** Esquema de um decantador convencional com limpeza manual de lodo.



**Figura 4.6:** Foto da cortina difusora com concentração de lodo.

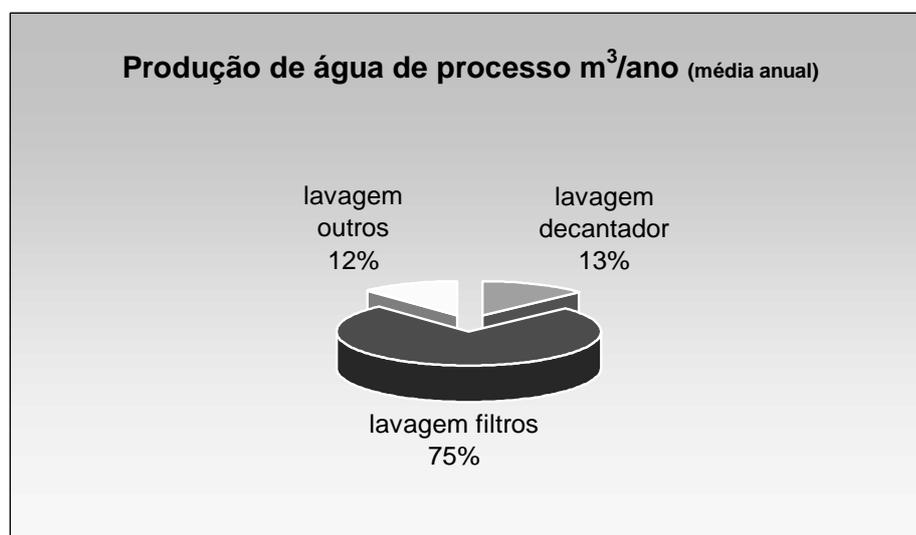
As características e a quantidade dos resíduos produzidos em ETAs dependem de vários fatores, destacando-se: a qualidade da água bruta; a tecnologia do tratamento; as características da coagulação (tipos e dosagens de coagulantes e alcalinizantes); o uso, as características e a dosagem de auxiliares de coagulação; o método de limpeza de decantadores e de lavagem dos filtros; a habilidade dos operadores; o uso racional da água no processo de limpeza do bloco hidráulico, a automação do processo; a operação da estação; e o reuso da água no sistema de tratamento.

De acordo com os dados sobre a produção média anual de água da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) nos anos de 2005 e 2006, cerca de 4% da água destina-se à limpeza do bloco hidráulico (água de processo). Portanto, distribui-se somente 96% da produção total da água tratada para a população (Figura 4.7).



**Figura 4.7:** Volume de água distribuída em relação ao volume de água de processo (média anual).

Como referido acima, a água de processo constitui efluente gerado no processo de lavagem do bloco hidráulico. A Figura 4.8 demonstra a projeção da geração de efluente (água + lodo), em percentuais de águas de processo geradas em diferentes partes do bloco hidráulico.



**Figura 4.8:** Percentuais de águas de processo geradas em diferentes partes do bloco hidráulico.

O presente trabalho parte das considerações feitas por Cordeiro (2002), que em seu trabalho, aponta para a necessidade de caracterização dos resíduos conforme sua importância

e o objetivo do estudo, do mesmo modo que os aspectos ambientais e geotécnicos. Assim, para que os lodos gerados nas ETAs sejam gerenciados adequadamente, providencia-se Laudo Técnico de Classificação de Resíduos Sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Com base nas prescrições da Norma Técnica da ABNT NBR 10.004-2004 e de acordo com o laudo técnico, o resíduo é classificado como não-perigoso e não-inerte (Classe II-A) – ver laudo em anexo.

A análise da composição química dos lodos, conforme laudos técnicos obtidos por fluorescência de raios-X, demonstra a predominância dos seguintes componentes: alumínio, ferro e sílica. A Tabela 4.1 resume o resultado sobre a composição química dos lodos da estação de tratamento de água de Gravataí – a unidade onde se situa o estudo – mediante absorção atômica em análise realizada em março de 2005.

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra
pH	-	6,4
Umidade	%	78,5
Matéria orgânica	%	13
Cinzas	%	8,5
Óleos e Graxas	Mg/kg	1637,2
Nitrogênio total	Mg/kg	5234,9
Fósforo	Mg/kg	434,9
Sulfeto	Mg/Kg	ND
Alumínio	Mg/kg	28883,7
Cádmio	Mg/kg	ND
Chumbo	Mg/Kg	ND
Cromo	Mg/Kg	ND
Magnésio	Mg/Kg	660,5
Níquel	Mg/kg	ND
Potássio	Mg/Kg	385,1
Sódio	Mg/kg	1707,0
Coliformes fecais	Ufc/100ml	Ausente

**Tabela 4.1:** Relação de resultados analíticos realizados nos resíduos sólidos da ETA de Gravataí-RS

Os resultados dos ensaios analíticos para a classificação dos resíduos gerados em diferentes ETAs do estado administradas pela CORSAN podem ser observados nas Tabelas 4.2, 4.3, e 4.4. Percebe-se a presença de elementos químicos semelhantes no lodo das três ETAs a despeito da grande diferença entre os mananciais naqueles municípios. A presença do alumínio deve-se principalmente ao fato de que as três estações utilizam como agente coagulante o sulfato de alumínio. Ressalta-se ainda a importância da representatividade da amostra, que no presente trabalho procurou seguir os requisitos exigíveis para a amostragem de resíduos sólidos definidos pela NBR 10.007/2005. Entretanto, a heterogeneidade é uma característica intrínseca dos lodos gerados devido aos fatores relacionados à sua formação.

Parâmetros	Unidades	ETA Montenegro	ETA Farroupilha	ETA Gravataí
Alumínio	(mg/L)	27,4	4,31	7,41
Arsênio	(mg/L)	ND	ND	ND
Bário	(mg/L)	ND	ND	ND
Cádmio	(mg/L)	ND	ND	ND
Chumbo	(mg/L)	0,1	ND	ND
Cromo Total	(mg/L)	ND	ND	ND
Mercúrio	(mg/L)	ND	ND	ND
Fluoreto	(mg/L)	ND	ND	ND
Prata	(mg/L)	ND	ND	ND
Selênio	(mg/L)	ND	ND	ND

**Tabela 4.2:** Resultados dos ensaios de lixiviação (conforme a NBR 10.005:2004)

Parâmetros	Unidades	ETA Montenegro	ETA Farroupilha	ETA Gravataí
Dureza	(mg/L Ca CO <sub>3</sub> )	51,2	82	51,2
Fenóis Totais	(mg/L)	ND	ND	ND
Merúrio	(mg/L)	ND	ND	ND
Arsênio	(mg/L)	ND	ND	ND
Bário	(mg/L)	ND	ND	ND
Cádmio	(mg/L)	ND	ND	ND
Chumbo	(mg/L)	ND	ND	0,09
Cromo Total	(mg/L)	ND	ND	ND
Alumínio	(mg/L)	ND	ND	27,4
Ferro	(mg/L)	ND	1,2	12,5
Manganês	(mg/L)	0,8	16,3	ND
Sódio	(mg/L)	3,6	ND	4,5
Zinco	(mg/L)	ND	0,1	0,12
Cobre	(mg/L)	ND	ND	ND
Prata	(mg/L)	ND	ND	ND
Selênio	(mg/L)	ND	ND	ND
Cianeto	(mg/L)	ND	ND	ND
Fluoreto	(mg/L)	ND	ND	ND
Nitrato	(mg/L)	ND	ND	ND
Cloreto	(mg/L)	1,4	9,5	21,9
Sulfato	(mg/L)	26,1	ND	16
Surfactantes	(mg/L)	ND	ND	ND

**Tabela 4.3:** Resultados dos Ensaio de Solubilização (conforme a NBR 10.006/2004)

**Tabela 4.4:** Composição química dos resíduos sólidos

Parâmetros	Unidades	ETA Montenegro	ETA Farroupilha	ETA Gravataí
pH (mistura 1:1 em água)		5,7	7,1	5,8
Umidade	%	68,9	90,5	98,4
Matéria Orgânica	%	8,2	8,7	0,77
Cinzas	%	22,9	0,8	0,83
Óleos e graxas (base seca)	%	0,16	0,23	1,1
Nitrogênio total (base seca)	(mg/Kg)	4.798	8.087	15.881
Fósforo total (base seca)	(mg/Kg)	771	750	20.118
Sulfeto (base seca)	(mg/Kg)	ND	ND	14,8
Alumínio (base seca)	(mg/Kg)	90.032	25.310	50.131
Cádmio (base seca)	(mg/Kg)	ND	ND	ND
Chumbo(base seca)	(mg/Kg)	47,9	ND	ND
Cromo(base seca)	(mg/Kg)	65,6	ND	ND
Magnésio (base seca)	(mg/Kg)	1.906	ND	2.887

Níquel (base seca)	(mg/Kg)	73,3	ND	ND
Potássio (base seca)	(mg/Kg)	1143	508,5	1.593
Cálcio (base seca)	(mg/Kg)	36	333,1	ND
Manganês (base seca)	(mg/Kg)	1143	2781,6	ND
Ferro (base seca)	(mg/Kg)	5685	3548,9	
Sódio (base seca)	(mg/Kg)	641	1862	1962
Coliformes Fecais	(UFC/100 mL)	Ausentes	Ausentes	Ausentes

Considerando a legislação vigente, define-se parâmetros analíticos para o monitoramento físico-químico e biológico da água drenada e dos resíduos sólidos gerados e geocondicionados, conforme descrito no capítulo 3. As características desses resíduos estão relacionadas adiante neste capítulo.

## 4.2. CARACTERÍSTICAS DO MANANCIAL DO RIO GRAVATAÍ.

O Rio Gravataí forma-se em Banhado Grande, que abrange os municípios de Santo Antônio da Patrulha, Glorinha, Gravataí e Viamão. Este banhado recebe as águas de toda a bacia hidrográfica compreendida nesses municípios e situa-se entre Serra Geral e Coxilha das Lombas. Uma vista deste manancial próximo à ETA de Gravataí é mostrada na Figura 4.9.



**Figura 4.9:** Foto do Rio Gravataí

O rio deságua no Delta do Jacuí, um conjunto de canais, ilhas e pântanos, a partir do qual forma-se o Lago Guaíba. Do Guaíba, as águas seguem para a Lagoa dos Patos e, dali para o Oceano Atlântico.

Os principais afluentes do Rio Gravataí no Banhado Grande são os arroios Miraguaia e Chico Lomã, em Santo Antonio da Patrulha; Passo Grande, em Glorinha; Passo do Pinto, na divisa Glorinha-Gravataí; e, Sanga da Porteira, Vigário e Alexandrina, em Viamão. Também, de importância é a contribuição das vertentes de Águas Claras, no município de Viamão. Fora da área do Banhado, o principal afluente do rio é o Arroio Demetrius, em Gravataí, também chamado de Arroio Passo dos Ferreiros, e que tem sua nascente no município de Taquara. Outro arroio importante é o Barnabé com nascente no Morro Itacolomi; e, em Alvorada, os arroios Águas Belas e Passo do Feijó, os mais expressivos neste município.

A Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí possui uma área de aproximadamente 2.020 km<sup>2</sup>, abrangendo os municípios de Santo Antônio da Patrulha, Glorinha, Gravataí, Cachoeirinha, Alvorada, Viamão, Porto Alegre e uma pequena contribuição de Taquara. O Rio Gravataí é a principal alavanca para o desenvolvimento de toda a região. Deste manancial hídrico é realizada a captação de água para o abastecimento de quase 1 milhão de pessoas.

As águas deste manancial hídrico abastecem as indústrias dos mais diversos ramos, as lavouras de toda a região da bacia, a criação de gado, bem como as atividades de lazer e recreação. Na Tabela 4.5, estão representados os resultados analíticos obtidos em três campanhas realizadas no ponto de captação da CORSAN no Rio Gravataí, atendendo a exigências da Portaria 518/2005. Um dado particular a ser observado refere-se ao fato de que, para alguns parâmetros analíticos, há uma concentração de resíduos na água bruta muito maior do que na água drenada.

Ensaio/data	Água drenada (04/05/07).	Água bruta (30/10/06)	Água bruta (09/07/07)
Alumínio	4,3	22	0,082
Arsênio	Nd	Nd	Nd
Bário	Nd	0,3	Nd
Chumbo	Nd	Nd	Nd
Cobre	Nd	Nd	Nd
Cromo	Nd	0,017	0,007
Cromo hexavalente	Nd	Nd	Nd
Cádmio	Nd	Nd	Nd
Ferro	13	9,4	0,89
Manganês	0,77	0,12	Nd
Mercúrio	Nd	Nd	Nd
Níquel	Nd	Nd	Nd
Selênio	Nd	1,1	Nd
Sódio	9		
Zinco	Nd	Nd	Nd
Clorofórmio	4,21		
THM	4,21		
Cor	50	550	100
Dureza	60,0	31	12
Fenóis	0,0	0	0,003
Fluoretos	Nd		
Fósforo total	0,1	0,22	0,05
Nitrogênio amoniacal	1,4	0,3	0,1
Nitrogênio orgânico	1,4		
pH	5,0	7,3	6,8
Surfactantes	0,2		0,06
Óleos e graxas	20,0		
Turbidez	50	206	24

**Tabela 4.5:** Resultados analíticos realizados em três campanhas no ponto de captação no Rio Gravataí

### 4.3. RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA DRENADA E DOS RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS E GEOCONDICIONADOS.

Os ensaios analíticos da água drenada realizam-se no laboratório da ETA sob as condições devidamente adequadas para os mesmos. A cada trinta minutos são monitorados, na ETA, os parâmetros de turbidez, odor, dureza, alcalinidade, pH, Manganês, Ferro, Alumínio, Oxigênio dissolvido, demanda biológica de oxigênio (DBO), sólidos totais, coliformes totais e bactérias heterotróficas. Este monitoramento constitui um procedimento regular da ETA de Gravataí.

O laboratório da estação de água de Gravataí (Figura 4.10) foi equipado para a realização *in loco* das análises durante o período de teste. Os seguintes parâmetros foram avaliados nos ensaios: turbidez, pH, ferro, manganês, alumínio (método colorimétrico), odor, dureza, alcalinidade e sólidos totais.



**Figura 4.10:** Laboratório da ETA de Gravataí.

Complementam-se as análises diárias da ETA de Gravataí por quatro campanhas analíticas executadas em laboratório independente para esta pesquisa. As amostras de água drenada coletadas no teste são encaminhadas para o laboratório central da CORSAN para a execução de ensaios contendo todos os parâmetros exigidos pela legislação vigente. As campanhas durante o período de operação compreendem os seguintes ensaios:

1. Ensaio físico-químico em água: cor, dureza, fenóis, fluoretos, fósforo total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio orgânico, pH, surfactantes e óleos e graxas;
2. Ensaio de metais em água: alumínio, arsênio, bário, chumbo, cobre, cromo, cádmio, ferro, manganês, mercúrio, níquel, selênio, sódio e zinco;
3. Ensaio de agrotóxicos, em água, por cromatografia gasosa: hexaclorobenzeno; simazina; atrazina; lindano; propanil; heptacloro epóxido; aldrin/dieldrin; endosulfan; endrin; DDT; metoxicloro; clordano; molinato; alacloro; metolacloro; pendimetalina; permetrina; benzo (a) pireno; 2,4,6 triclorofenol; 2,4 D-pentaclorofenol; bentazona e trifluralina;
4. Ensaio de compostos orgânicos, em água, por cromatografia gasosa: 1,1-dicloroetano; diclorometano; clorofórmio; 1,2-dicloroetano; benzeno; tetracloro de carbono; tricloroetano; bromodiclorometano; tolueno; dibromoclorometano; tetracloroetano; xileno; estireno; bromofórmio; triclorobenzenos; cloreto de vinila; monoclorobenzeno; etilbenzeno e trihalometanos (THM).

Os ensaios analíticos dos resíduos sólidos também são realizados no laboratório da ETA e complementados por quatro campanhas analíticas. Os parâmetros monitorados a cada batelada na ETA são a taxa de umidade e percentual de sólidos totais. Desenvolvem-se as campanhas analíticas durante o período de operação compreendendo os seguintes ensaios: benzeno, cianetos, clorofórmio, cromo hexavalente, densidade, dureza, fenol total, fluoretos, fósforo total, nitrogênio total, óleos e graxas, pH, sulfeto, surfactantes, teor de umidade, tolueno, TPH, xileno, alumínio, arsênio, bário, boro, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, lítio, mercúrio, molibdênio, níquel, prata, selênio, sílica, vanádio e zinco. A Tabela 4.6 apresenta os valores dos parâmetros analisados nos resíduos sólidos gerados e geocondicionados nas campanhas analíticas realizadas nos meses de março, abril, maio e outubro.

Parâmetros	Amostra (11/03/2007)	Amostra (24/04/2007)	Amostra (02/05/2007)	Amostra (11/10/2007)
Local coleta	Lagoa	dentro BAG	dentro BAG	dentro BAG
Benzeno (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Cianetos Total (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Clofórmio (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Cromo VI (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,07	1,04	1,00	0,34
Dureza (mg/Kg)	77.670	20.860	7.255	240
Fenol Total (mg/Kg)	ND	0,38	ND	ND
Fluoreto (mg/Kg)	5,29	4,4	4,39	Nd
Fósforo Total (mg/Kg)	ND	ND	300	64
Nitrogênio Total (mg/Kg)	1.050	404	284	3220
Óleos e Graxas Totais (mg/Kg)	ND	ND	1,26	11
Ph	6,4	5,92	5,37	4,8
Sulfeto (mg/Kg)	159	ND	160	160
Surfactantes (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Teor de Umidade (mg/Kg)	87,9	81,7	86,6	28
Tolueno (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
TPH (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Xileno (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Alumínio (mg/Kg)	11.935	9.628	14.102	24.165
Arsênio (mg/Kg)	ND	ND	1,3	3,28
Bário (mg/Kg)	14,6	14,3	ND	25,8
Boro (mg/Kg)	61,1	ND	ND	ND
Cádmio Total (mg/Kg)	ND	ND	ND	1,85
Chumbo Total (mg/Kg)	3,73	ND	ND	6,57
Cobalto Total (mg/Kg)	0,68	ND	ND	ND
Cobre Total (mg/Kg)	5,77	3,41	ND	7,53
Cromo Total (mg/Kg)	5,09	ND	ND	9,48
Estanho (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Ferro Total (mg/Kg)	5.063	4.527	7.984	19.093
Mercúrio Total (mg/Kg)	0,18	ND	0,6	0,058
Molibdênio Total (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Níquel Total (mg/Kg)	1,02	ND	ND	1,62
Prata Total (mg/Kg)	ND	ND	ND	ND
Selênio (mg/Kg)	ND	ND	1,39	1,39
Sílica (mg/Kg)	166	1146	6544	6544
Vanádio (mg/Kg)	8,19	9,84	ND	22,2
Zinco (mg/Kg)	ND	39,5	36,6	20,9

**Tabela 4.6:** Resultados físico-químicos realizados pelo laboratório ALAC, amostras contendo lodo antes e após o bombeamento para o *bag*.

Observa-se que enquanto alguns parâmetros não apresentam grandes variações, outros apresentam variações significativas nos resultados analíticos, tais como, dureza, nitrogênio, alumínio, ferro, manganês e sílica. Igualmente, alguns parâmetros analisados nos resíduos gerados em ETA, dentre eles: o fósforo total, boro, bário, chumbo, cobalto, cobre, cromo, mercúrio, níquel, selênio e zinco são detectados em algumas campanhas, porém não em outras. Provavelmente, estas discrepâncias estão relacionadas à heterogeneidade das amostras, o que enseja um estudo mais aprofundado da representatividade e da predominância destes elementos na fase sólida.

A dureza se deve à presença de cátions metálicos divalentes, capazes de reagir com o sabão e formar precipitados, e de certos ânions presentes na água, que levam à formação de crostas. Os principais íons causadores de dureza são cálcio e magnésio. O zinco e o estrôncio exercem um papel secundário nesse processo. E, em alguns casos, o alumínio e o ferro também podem contribuir para um maior grau de dureza.

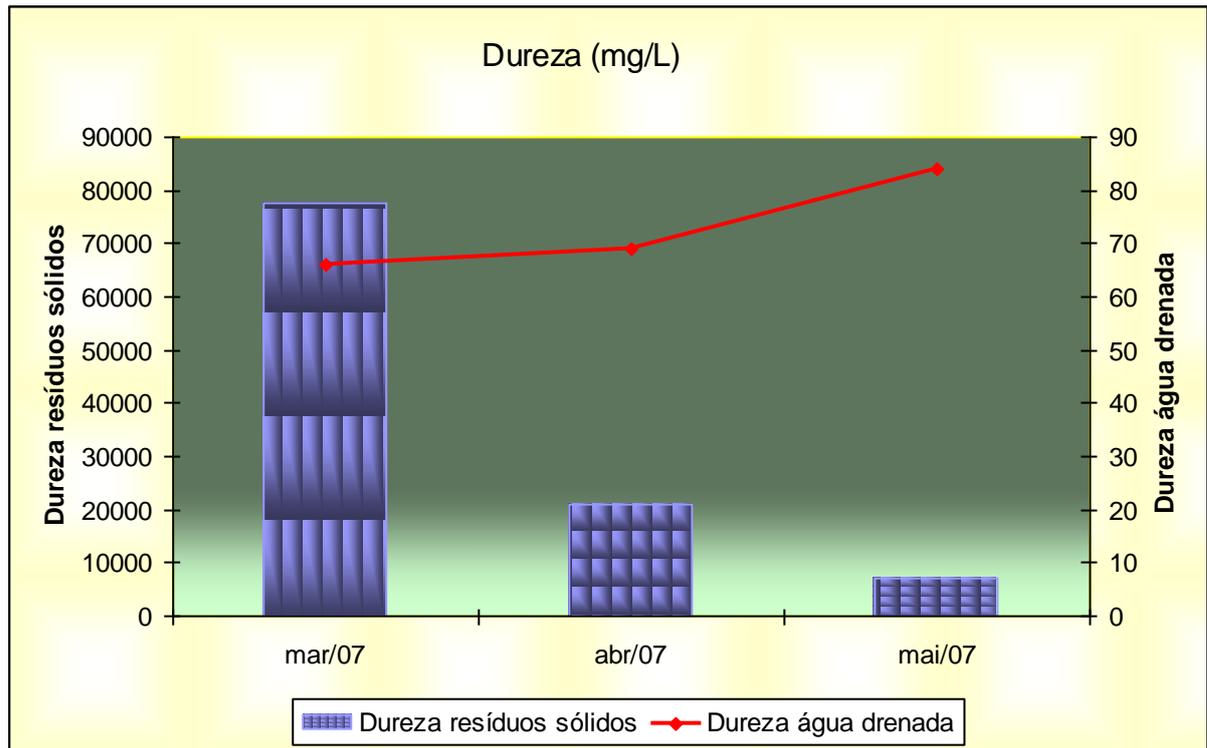
O método utilizado para a determinação de dureza é o titrimétrico do ácido etilenodiaminatetracético (EDTA). Este método é comumente empregado na determinação de dureza e baseia-se na reação do EDTA ou seus sais de sódio. Nessa reação, são formados complexos solúveis quelados com certos cátions metálicos. Alguns metais podem interferir no método causando um enfraquecimento do ponto final e, conseqüentemente, tornar indistinto o resultado analítico. Esta interferência pode ser reduzida através da adição do inibidor MgCDTA (1,2 - ciclohexonodiaminatetracetato de magnésio), que possui como vantagem a característica de não ser tóxico e/ou malcheiroso, mas, como desvantagem, a liberação de algum magnésio na solução contribuindo para a dureza. Os inibidores I (NaCN) e II (Na<sub>2</sub>S) podem ser escolhidos conforme as concentrações de interferentes da Tabela 4.7.

**Tabela 4.7:** Concentrações máximas permissíveis de interferentes para a seleção de inibidores com base em um volume de 25 ml de amostra diluído para 50 ml.

	Máxima Concentração Interferente	
Interferente	(mg / L)	
	Inibidor I	Inibidor II
Alumínio	20	20
Bário	*	*
Cádmio	*	20
Chumbo	*	20
Cobalto	mais de 20	0,3
Cobre	mais de 30	20
Estrôncio	*	*
Ferro	mais de 30	5
Manganês (Mn <sup>+</sup> )	*	1
Níquel	mais de 20	0,3
Zinco	*	200
Polifosfatos	*	10

A eliminação de matéria orgânica suspensa ou coloidal (que também interfere na definição do ponto final da dureza) é feita pela evaporação da amostra e ignição do resíduo a 550°C durante 15 minutos. O resíduo ignizado é, então, dissolvido com 20 ml de ácido clorídrico 1N, neutralizado para um pH 7 com NaOH 1N e diluído para 50ml com água destilada. Aplica-se este procedimento analítico aos resíduos gerados e geocondicionados no *bag*.

Na Figura 4.11, verifica-se a variação da dureza. Atribui-se à migração de alguns elementos químicos, como exposto acima, o maior ou menor grau de dureza na fase líquida e na fase sólida.



**Figura 4.11:** Resultado dos ensaios de dureza realizados nos resíduos gerados e geocondicionados e na água drenada

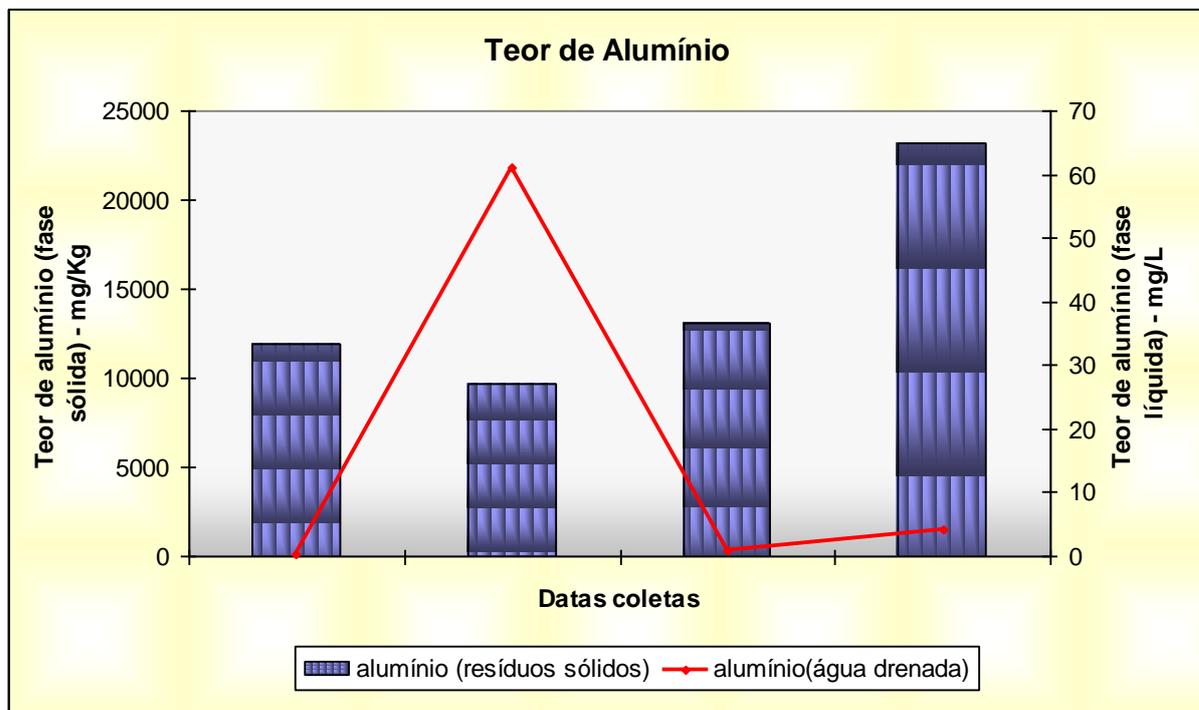
O alumínio é o terceiro elemento químico em maior abundância na litosfera. A maior parte do alumínio ocorre nos aluminossilicatos tais como: argilas, micas e feldspatos. Esse elemento é um metal extremamente versátil, pode ser enrolado, prensado, moldado, curvado e extrudado, dando origem às mais variadas formas. Sua densidade baixa o torna útil na construção de aeronaves e, mais recentemente, nas indústrias automobilísticas. O alumínio puro é um excelente condutor elétrico e é utilizado em fios elétricos, competindo como o cobre. O uso extensivo do alumínio na indústria resulta na crescente presença deste elemento químico no solo e na água em suas diversas formas combinadas.

A indústria da produção de água utiliza, em geral, o sulfato de alumínio  $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O]$ , como agente coagulante. Cada 1 mg/L do sulfato de alumínio contém aproximadamente 15% de  $Al_2O_3$  e forma hidróxido de alumínio. Comercializado na forma líquida, o sulfato de alumínio utilizado pela CORSAN apresenta as seguintes características e especificação:

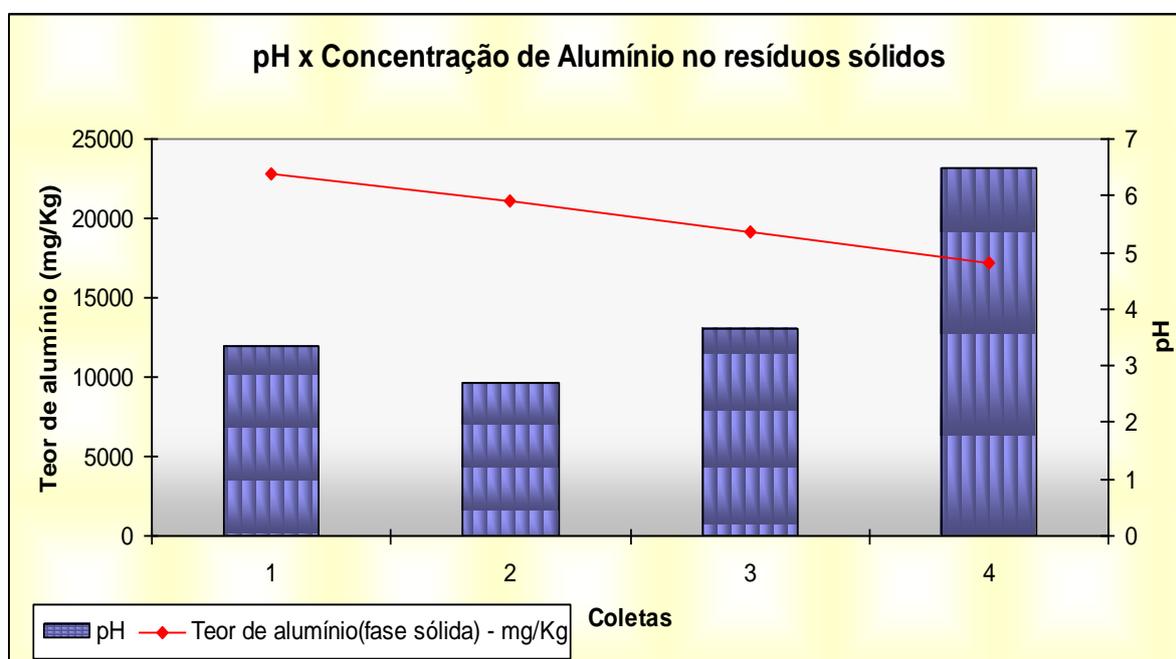
- Conteúdo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 17 - 18%, solúvel em água, insolúvel em álcool, estável em ar
- Aparência: pedaço branco e acinzentado, em grânulos e em pó
- Insolúvel em Água: 0.02% - 0.05%

As reações que ocorrem com a adição do sulfato de alumínio à água podem ser simplificadas resultando na formação de hidróxido de alumínio, sulfato e com carga positiva. A adição de cal, utilizado para controle do pH da água, proporciona a formação de  $\text{CaSO}_4$  e  $\text{H}_2\text{CO}_4$ . Quanto maior a turbidez da água bruta, maior a necessidade de uso de agente coagulante e, conseqüentemente, maior a formação de resíduos nos decantadores, floculadores e filtros. O método analítico utilizado para detecção do alumínio consiste em EAA – Forno de Grafite.

As datas de coleta para as análises estão compreendidas entre março e outubro de 2007. Os resultados apresentados na Figura 4.12 exibem a crescente concentração do alumínio na fase sólida. Já, a Figura 4.13 traz evidência complementar dessa concentração, mediante à qual se verifica a redução do pH, provavelmente pela percolação dos íons  $\text{H}^+$ , similar aos padrões de comportamento proposto por Meurer (2000) para a química do solo.

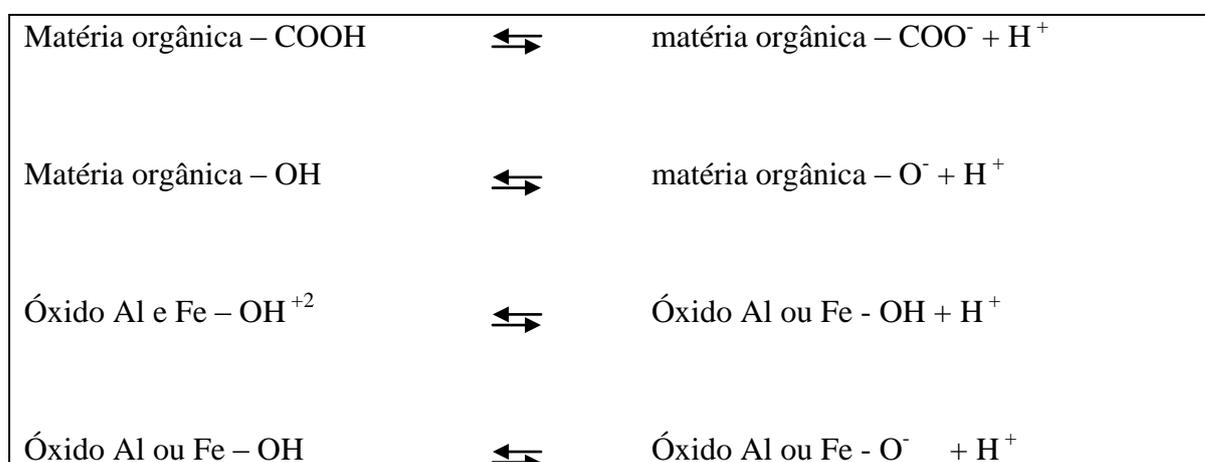


**Figura 4.12:** Teores de alumínio na fase sólida (geocondicionada) e na fase líquida (água drenada)

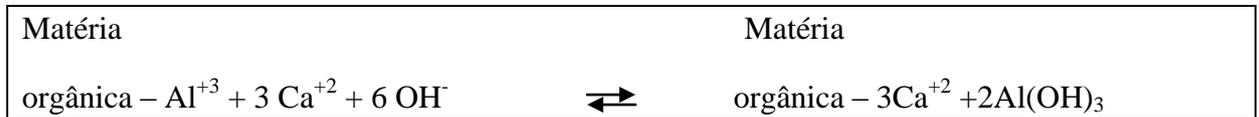


**Figura 4.13:** Teores de alumínio em relação ao pH para a fase sólida

A acidez potencial provavelmente corresponde aos compostos que liberam íons  $H^+$  para a percolação, causando uma acidificação dos resíduos sólidos geocondicionados. Estas devem incluir, pelos resultados obtidos, o  $Al^{+3}$ , trocável, adsorvido pelas cargas negativas das argilas e dos grupos funcionais COOH e OH. Este processo ocorre conforme as seguintes reações:



Observa-se que o processo de dissolução de algumas moléculas tem similaridade com o processo que ocorre com amostras de solo. Acredita-se que uma das reações que justifica a fixação do alumínio na fase sólida, na forma de hidróxido de alumínio, seja a seguinte:



Percebe-se, ainda, que existe uma adequação dos conceitos de acidez ativa e acidez potencial para as amostras analisadas neste estudo, bem como a similaridade entre os conceitos de acidez trocável, representada pela soma do  $\text{Al}^{+3}$  e do  $\text{H}^+$  trocáveis; acidez não-trocável, que refere-se à quantidade de  $\text{Al}^{+3}$  e do  $\text{H}^+$  que não se deslocam para a solução por ação de KCL, possibilitando ao alumínio ser complexado pela matéria orgânica e retido fortemente nas superfícies minerais; e a acidez neutralizável que representam a quantidade de  $\text{Al}^{+3}$  e do  $\text{H}^+$  do resíduo da ETA que é necessário à modificação do pH até os valores recomendados.

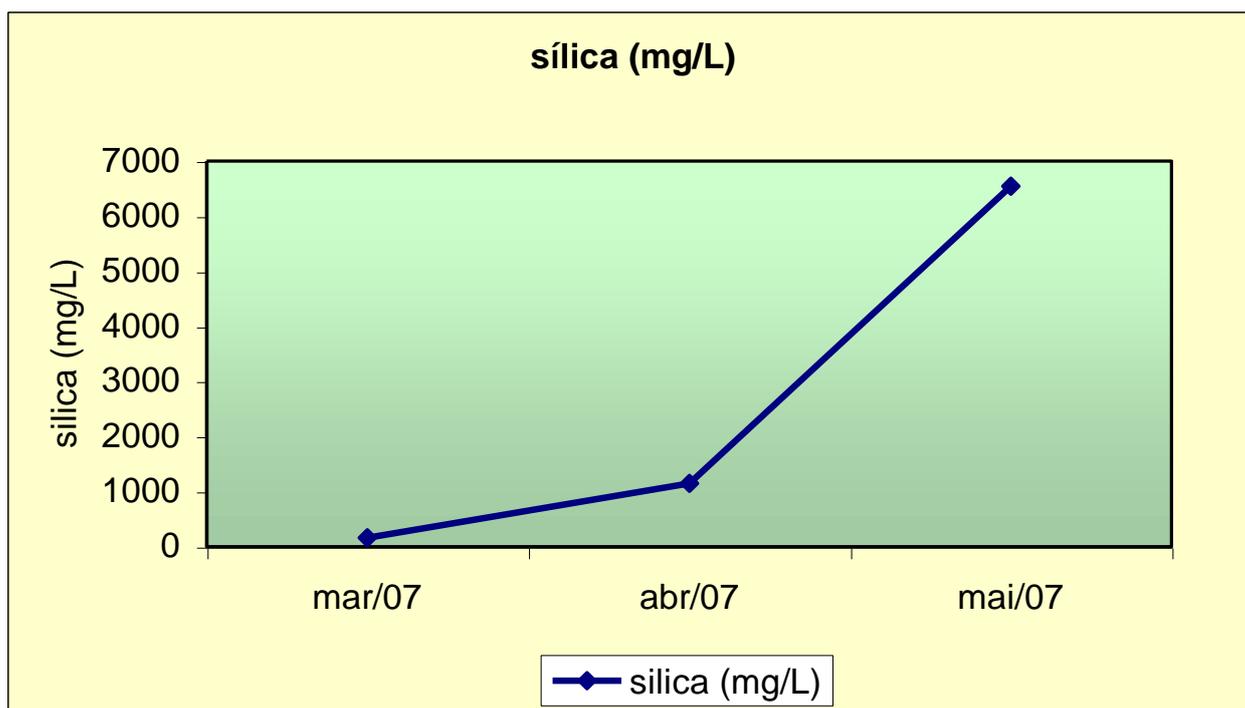
Nos ensaios físico-químicos realizados nas quatro campanhas analíticas, outros dois elementos apresentam concentração crescente: o silício e o nitrogênio. No grupo IVA, o silício é classificado como um metalóide. Em termos de abundância, o silício só perde para o oxigênio. A grande maioria das rochas, solos, areias e terras são compostas de silício, ou das várias formas de sílica pura ou impura,  $\text{SiO}_2$  (quartzo, sílex, tridimita, ágata, opata, etc.), ou de silicatos, tais como feldspatos, micas, talcos e muitos outros. A química do silício é essencialmente aquela do estado +4, no qual quatro elétrons de seu orbital de valência são elementos mais eletronegativos. Embora forme compostos binários com o hidrogênio e com os halogênios, como o tetracloreto de silício ( $\text{SiCl}_4$ ), esses compostos tendem a se converter em dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) na presença de ar. A química do silício é, sem dúvida, a química de seus oxocompostos, dióxidos de silício e silicato.

Como ilustrado na Figura 4.14, em maio de 2007, a concentração de sílica aumenta aproximadamente 3.942% na amostra, em comparação com a amostra de março do mesmo ano. Tal reforça as características minerais presentes na composição química do lodo de ETA e demonstra a rápida concentração deste elemento na fase sólida.

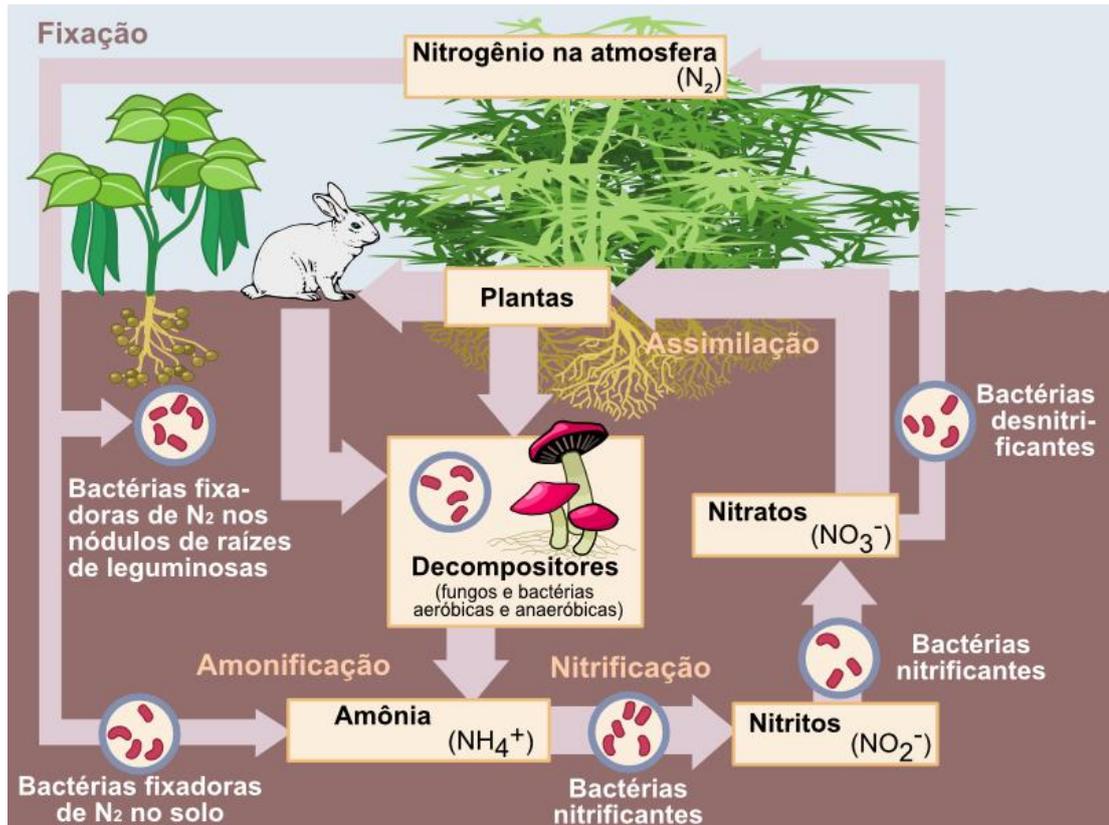
No presente trabalho, a forma, amorfa ou cristalina, da sílica presente na composição dos resíduos sólidos gerados e geocondicionados, não é objeto de análise. Verifica-se,

entretanto, a acentuada concentração deste componente no resíduo em um curto espaço de tempo.

O nitrogênio ocorre na terra como o principal constituinte do ar, cerca de 78% em volume. Este elemento químico é encontrado em compostos orgânicos em todos os seres vivos, animais e plantas. Compostos inorgânicos do nitrogênio não são usualmente encontrados na forma mineral porque a maioria é solúvel em água. A molécula de nitrogênio pode ser representada como:  $N:::N$ : (ligação ativa) enquanto a teoria dos orbitais moleculares representa a tripla ligação – ligação muito forte com energia de  $945 \text{ kJmol}^{-1}$ . A grande força da tripla ligação no nitrogênio é responsável pela pequena velocidade com que ele reage com a maioria das outras substâncias.



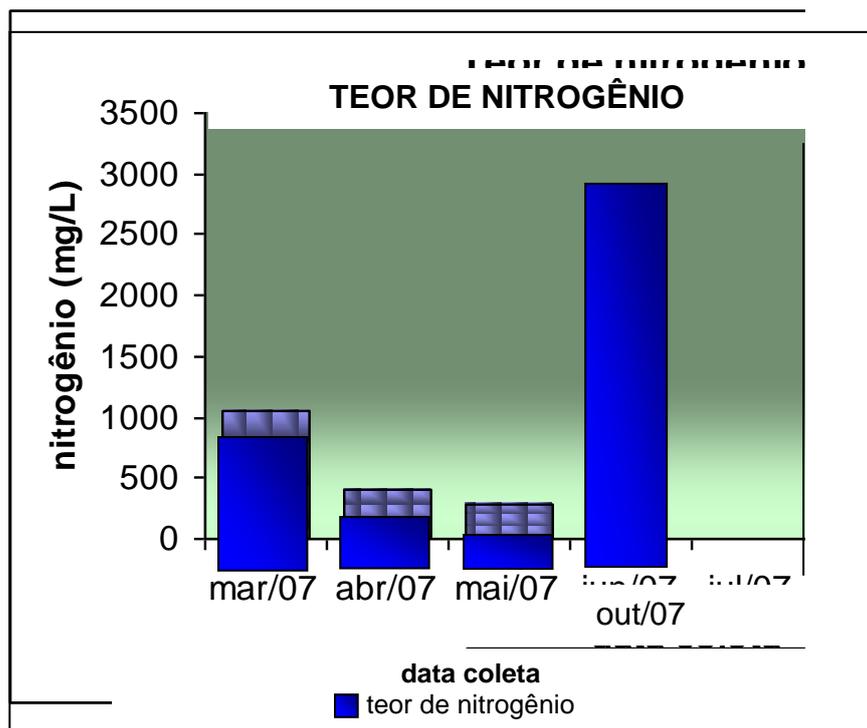
**Figura 4.14:** Teores de sílica da amostra de lodo da ETA de Gravataí.



**Figura 4.15:** Ciclo do nitrogênio na natureza.

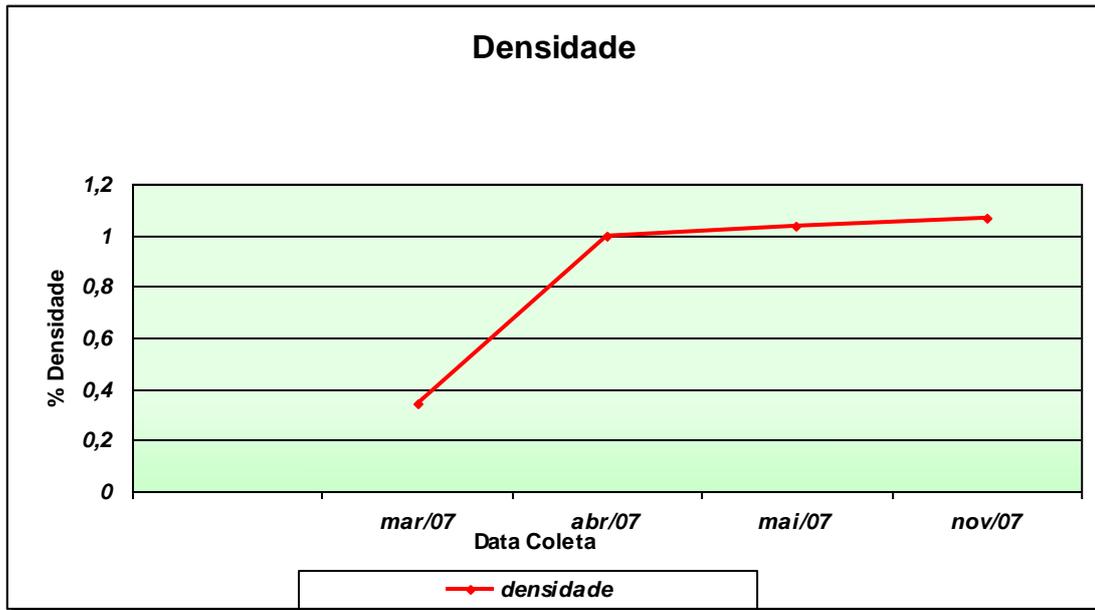
A ocorrência de nitrogênio no mundo vivo ocorre graças à atividade dos microrganismos fixadores, das algas azuis e de algumas bactérias, que o transformam em amônia. No processo de nitrificação, outras bactérias transformam a amônia em nitritos e nitratos. Essas três substâncias são utilizadas pelos vegetais para a elaboração de compostos orgânicos nitrogenados que serão aproveitados pelos animais. O ciclo fecha-se com a atividade de certas espécies de bactérias, que efetuam a desnitrificação e devolvem o nitrogênio molecular para a atmosfera.

Pode-se verificar que o teor de nitrogênio também aumenta ao longo do período de secagem dos resíduos geocondicionados, ou seja, o processo de deságüe permite a fixação do nitrogênio na fase sólida. Os resultados mostram que existe uma tendência do nitrogênio concentrar-se na fase sólida pois, à medida que o tempo de secagem aumenta, há aumento dos teores de nitrogênio nas amostras realizadas, como demonstra a Figura 4.16.



**Figura 4.16:** Teores de nitrogênio nos resíduos gerados e geocondicionados.

A Figura 4.17 apresenta as variações da densidade do material geocondicionado. Pode-se verificar que ocorre um sensível aumento da densidade entre a amostra retirada da lagoa de sedimentação antes do bombeamento para o *bag* e o material geocondicionado no *bag*, devido ao deságüe do material.



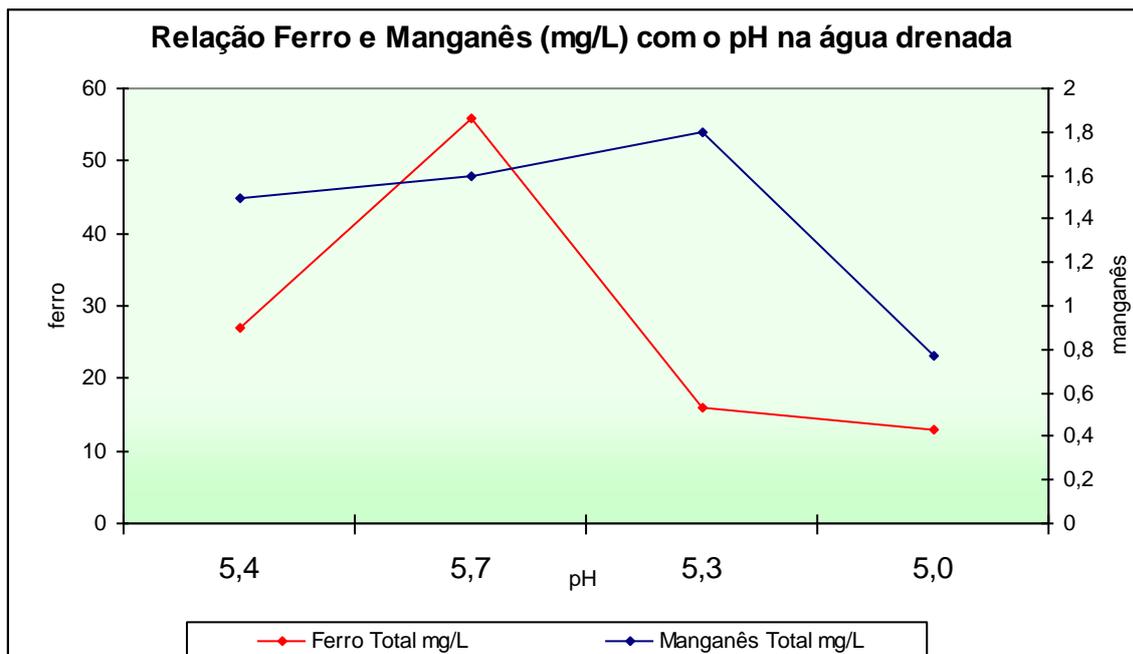
**Figura 4.17:** Densidade dos resíduos sólidos gerados e geocondicionados.

O processo de drenagem permite a separação da fase líquida do lodo da fase sólida. Quimicamente, através do processo de lixiviação, os metais e demais elementos químicos separam-se de forma a permitir uma maior concentração do elemento na fase sólida ou na fase líquida. Observa-se que tanto o ferro como o manganês apresentam sensíveis variações nos ensaios nas quatro campanhas analíticas, quando verificada a variação do pH na água drenada (Figura 4.18).

Os resultados das quatro campanhas comparados com os limites permitidos pela CONAMA 357/2005 estão descritos na Tabela 4.9. Observa-se que o ferro e o manganês tendem a apresentar valores maiores que os permitidos para o lançamento nos corpos d'água, todavia ao misturar-se com a água bruta, no processo de recirculação, é relativamente fácil corrigir os teores desses elementos.

**Tabela 4.9:** Ferro e manganês nos resíduos sólidos gerados e geocondicionados – ETA Gravataí.

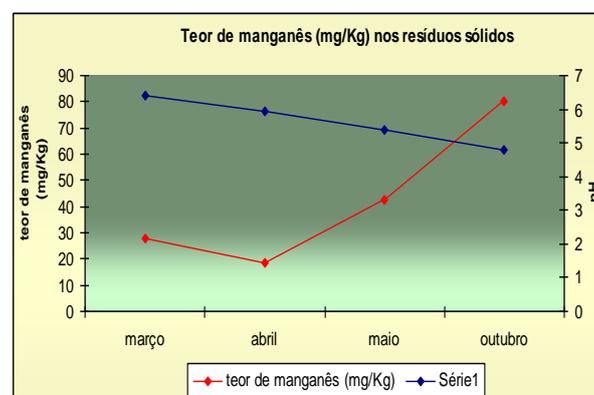
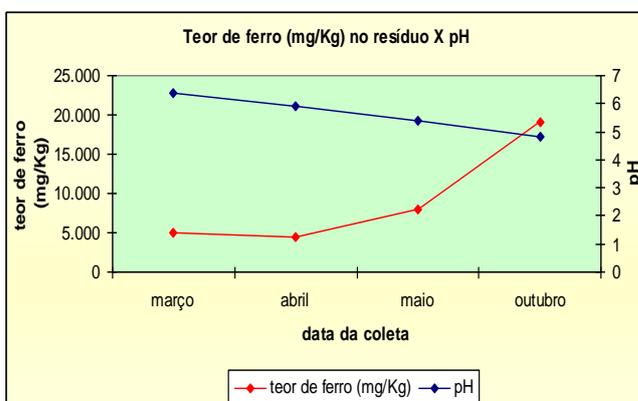
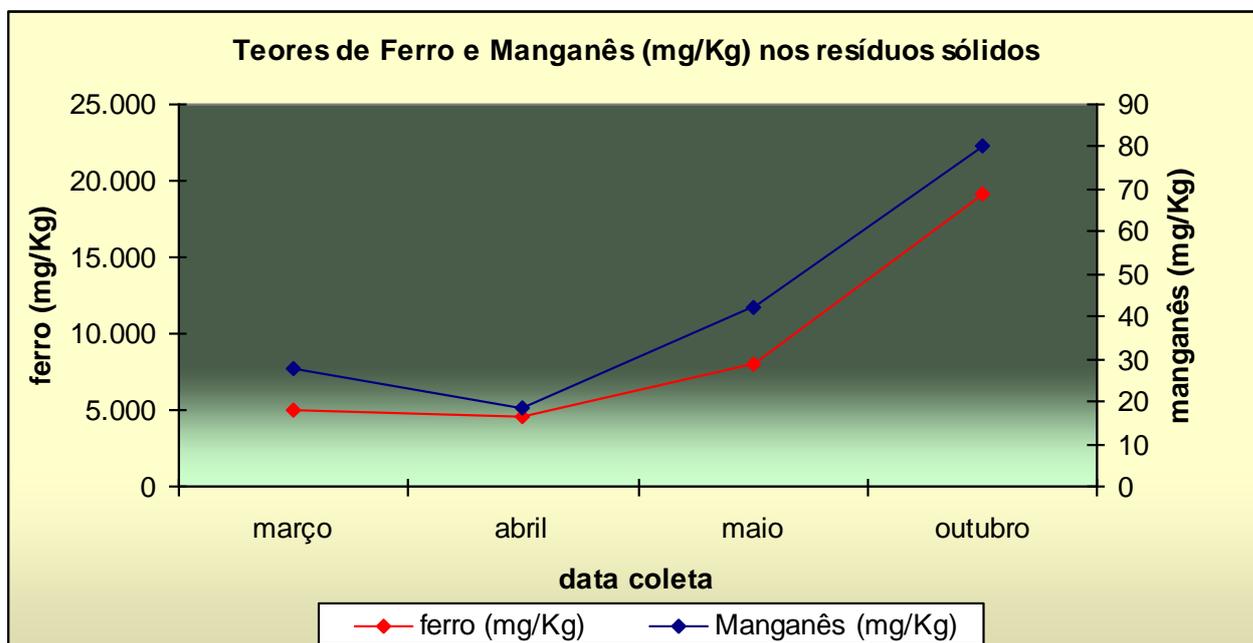
Água Drenada - Tanque de recirculação - amostra composta						
RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS EM ÁGUAS						
Parâmetros	Unidades	Amostra (10/04/07)	Amostra (24/04/07)	Amostra (02/05/2007)	Amostra (04/05/2007)	CONAMA 357
pH		5,4	5,7	5,3	5,0	5,0 A 9,0
Ferro Total	mg/L	27	56	16	13	15
Manganês Total	mg/L	1,5	1,6	1,8	0,77	1



**Figura 4.18:** Teores de Ferro e manganês na água drenada, nas quatro campanhas analíticas.

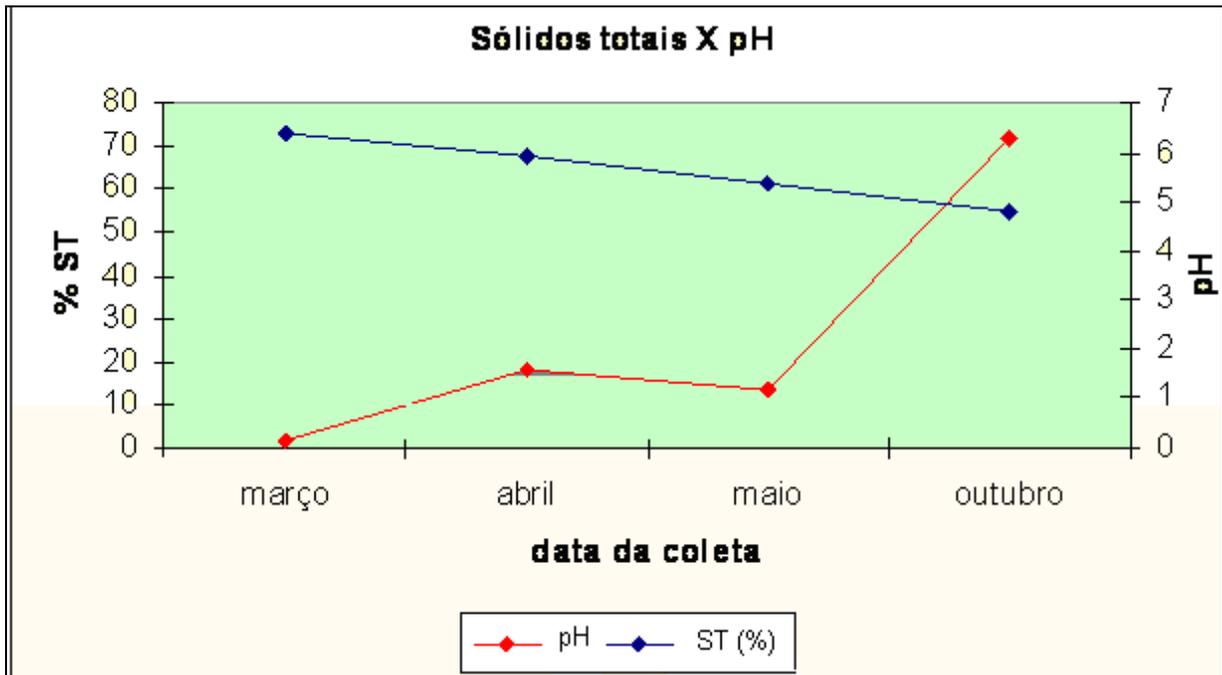
As Figuras 4.19 e 4.20 ilustram a ocorrência de picos de manganês na água drenada no mesmo período em que se observa redução deste elemento na fase sólida. Neste período, correspondente a março e abril de 2007, verifica-se elevação do pH de 4,1 para valores maiores que 5,2. Ao observar, conforme Tabela 4.10, os resultados analíticos realizados pelo





**Figura 4.20:** Teores de ferro e manganês nos resíduos gerados e geocondicionados. Gráficos à direita e à esquerda demonstram a influência do pH nos teores de ferro e de manganês, respectivamente.

Os resultados mostram que, à medida que os resíduos geocondicionados concentram os teores de sólidos totais, os valores do pH são reduzidos (Figura 4.21).

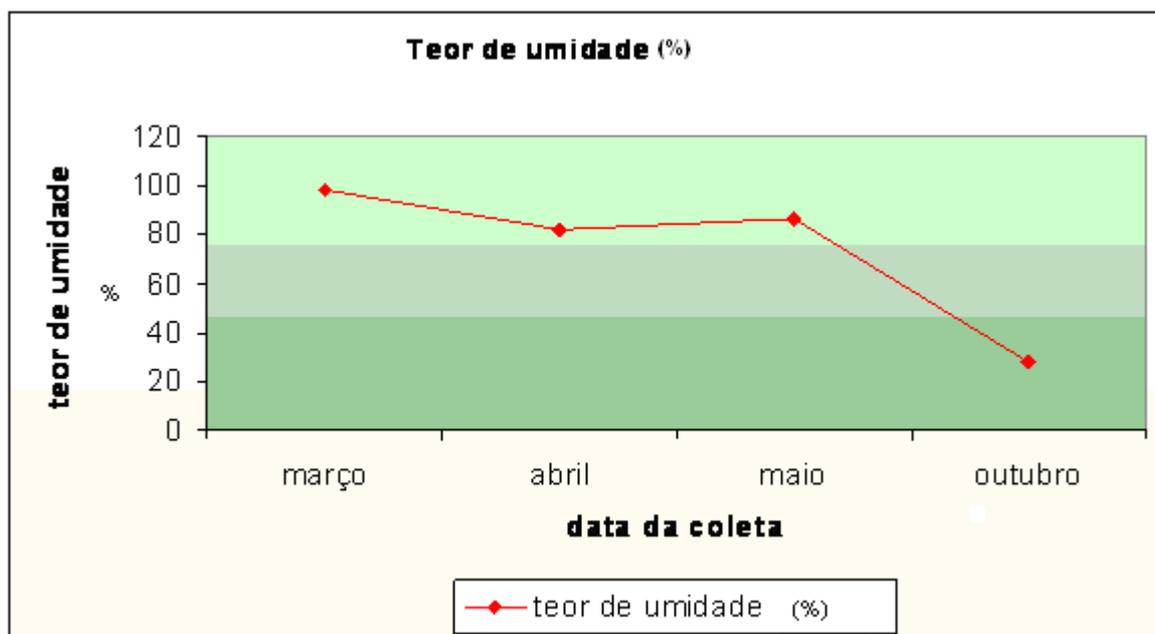


**Figura 4.21:** Comportamento dos parâmetros sólidos totais e pH nos resíduos gerados e geocondicionados.

Adicionalmente, ressalta-se a presença de alguns elementos químicos na fase sólida que merecem avaliação específica. O chumbo que existe em uma única variedade alotrópica, metálica, cinza, mole e de baixo ponto de fusão é encontrado em duas das quatro amostras realizadas. Por tratar-se de um metal pesado e tóxico merece atenção a sua presença em concentrações de 3,73 mg/kg na amostra coletada na lagoa de sedimentação e 6,57 mg/kg na amostra coletada em outubro de 2007 do material geocondicionado.

A ABNT/NBR 10004 apresenta como fonte de geração deste metal os lodos e poeiras provenientes do sistema de controle de emissão de gases empregados na fundição do chumbo e que de alguma forma deve estar sendo carregada para o Rio Gravataí. Verifica-se também a presença de outros metais, como o vanádio, zinco, níquel, mercúrio, lítio, cromo, cobre, cádmio, boro, bário e arsênio. Ainda que não tenha sido foco desta pesquisa a identificação detalhada da composição química dos resíduos sólidos gerados, serve de alerta a presença, ainda que, preliminarmente, de traços destes elementos.

Os teores de umidade dos resíduos gerados e geocondicionados podem ser observados na Figura 4.22. Em um período em torno de seis meses, o percentual de umidade passa de aproximadamente 98%, lodo coletado na lagoa, para 28% na amostra geocondicionada, coleta no mês de outubro de 2007.



**Figura 4.22:** Teores de umidade nos resíduos sólidos gerados e geocondicionados.

#### 4.3.1. Comparativo entre a água bruta e a água drenada do *bag*.

As características da água bruta, em valores médios, em comparação à água drenada do *Bag*, também expressa em valores médios, pode ser observada na Tabela 4.9. Na última coluna da tabela são apresentados os teores permitidos pela legislação CONAMA 357/05 para o lançamento em corpos d'água. Não existe ainda legislação brasileira para a recirculação da água do processo. Conforme legislação vigente, a composição química da água drenada apresenta, em algumas amostras, os parâmetros ferro e manganês com valores acima dos permitidos para o lançamento nos corpos d'água. Para a efetiva comparação qualitativa da água bruta em relação à água drenada faz-se necessário um maior número de campanhas analíticas.

**Tabela 4.9:** Parâmetros da água bruta, valores médios, e da água drenada do *Bag*, também valores médios.

Parâmetros		água drenada (média)	água bruta (média)	CONAMA 357
COR	mg/L Pt-Co	1087,5	325	
Dureza	(mg/L)	69,75	21,5	
Fenol Total	(mg/L)	0,01075	0,0015	0,5
Fluoreto	(mg/L)	0,1	0	10
Fósforo Total	(mg/L)	0,275	0,135	
Nitrogênio Total	(mg/L)	3,775	0,2	20
pH		5,35	7,05	5,0 A 9,0
Surfactantes		0,3975	0,06	
Óleos e Graxas	mg/L	14	0	70
Alumínio Total	mg/L	16,575	11,041	
Arsênio Total	mg/L	ND	ND	0,5
Bário Total	mg/L	ND	ND	5,0
Chumbo Total	mg/L	ND	ND	0,5
Cobre Total	mg/L	ND	ND	1
Cromo Total	mg/L	0,034	0,017	0,5
Cádmio Total	ug/L	ND	ND	0,2
Ferro Total	mg/L	21,25	5,145	15
Manganês Total	mg/L	1,0425	0,12	1
Mercurio Total	ug/L	ND	ND	0,01
Níquel Total	mg/L	ND	ND	2
Selênio total	ug/L	ND	ND	0,3
Sódio Total	mg/L	6,75	ND	
Zinco Total	mg/L	ND	ND	5

#### 4.3.2. Resultados biológicos da água drenada

Na Tabela 4.10 são apresentados os resultados dos ensaios fitoplanctônicos realizados na água drenada, os métodos de ensaios e preservação utilizados estão de acordo com o documento *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater – 21<sup>th</sup> Edition of American Water Works Association – AWWA*.

**Tabela 4.10:** Resultado do ensaio fitoplanctônico em águas.

Fitoplâncton	UPA/ml 27/04/07	Cél/ml	Organismos predominantes
Cianofíceas	5,4	48	-
Clorofíceas	11,9	45	-
Diatomáceas	9,4	19	-
Fitoflagelados	5,8	10	-
Total	32,5	122	-

A amostra apresenta diversidade fitoplanctônica com densidade normal de células. Na tabela 4.11 está o resultado do ensaio fitoplanctônico na água bruta, captada no Rio Gravataí, no período posterior à análise da água drenada.

**Tabela 4.11:** Resultado do ensaio fitoplanctônico em água bruta (Rio Gravataí).

Fitoplâncton	UPA/ml 10/07/07	Cél/ml	Organismos predominantes
Cianofíceas	1,8	11	-
Clorofíceas	1,8	2	-
Diatomáceas	21,6	14	-
Fitoflagelados	1,9	2	-
Total	27,1	29	-

As duas amostras apresentam diversidade de microorganismos, entretanto não foi possível apontar uma tendência com o uso da tecnologia para avaliação microbiológica, já que ocorre muita sazonalidade na qualidade da água bruta captada neste manancial e o período de coleta das amostras não coincidem. Sugere-se, então, a avaliação mais detalhada para o uso de geossintéticos no tratamento de resíduos de estações, quando esses são oriundos de mananciais com forte presença de microorganismos.

#### 4.4. COMENTÁRIOS FINAIS

Como base nas investigações apresentadas ao longo deste capítulo, é possível estabelecer algumas considerações de caráter geral que impactam os processos de limpeza e remoção de lodo em ETAs, similares à de Gravataí, ou seja, estações que operam com processos convencionais de clarificação da água e utilizam como insumos de tratamento o coagulante sulfato de alumínio, como alcalinizante a cal e como auxiliares de floculação polímeros sintéticos. Os resultados apresentados demonstram a crescente necessidade de adequação dos decantadores convencionais, através da utilização de sistemas de sucção de fundo dos resíduos sólidos gerados, como forma de reduzir o volume de resíduos a serem tratados.

Verifica-se a viabilidade técnica no uso de geossintético para o deságüe dos resíduos sólidos gerados nas ETAs, especialmente quanto ao processo físico-químico de desaguamento, uma vez que a eficiência no processo de secagem pode ser uma forma de garantir a redução dos teores de umidade e manter a classificação ambiental dos resíduos gerados.

De maneira geral, os resultados dos ensaios analíticos mostram a dinâmica dos elementos e compostos químicos em função do processo de filtração. Em decorrência desse processo, alguns elementos predominam na fase líquida ou na fase sólida, concomitantemente, verifica-se a influência da redução do teor de umidade.

Observa-se ainda uma tendência natural de concentração, na fase sólida, de alguns elementos como alumínio, nitrogênio e sílica, provavelmente pela pequena mobilidade destes elementos nas condições de pH apresentadas nos resíduos. Igualmente, os teores de ferro e manganês tendem a manter um aumento de concentração na água drenada, indicando a necessidade de pós-tratamento para atender os padrões exigidos para o lançamento em corpos d'água de acordo com a legislação vigente.

Sabe-se que a escolha do manancial de captação deve ser precedida de um levantamento sanitário da bacia hidrográfica e de estudo da qualidade da água bruta, a qual pode variar com a sazonalidade, mas também ao longo dos anos. Por conseguinte, é necessário avaliar constantemente a qualidade da água bruta, bem como a qualidade dos insumos utilizados no tratamento, uma vez que as características físico-químicas e biológicas

dos resíduos gerados dependem destes fatores. Finalmente, destaca-se a importância de caracterizar os resíduos gerados antes de definir qual a tecnologia a ser utilizada, considerando o seu reuso ou destinação final.

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OPERACIONAIS

### 5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos em cada um dos ensaios aplicados na pesquisa. Como apresentado na metodologia o teste foi dividido em duas partes: primeiramente, foi realizado o ensaio do *bag* suspenso com o objetivo de definir a curva de tendência da secagem dos resíduos (deságüe e desidratação), o volume de lodo adicionado ao *bag* em teste de forma contínua e em batelada e as condições operacionais desta tecnologia. Posteriormente foi realizado o teste do *bag* disposto sobre o solo com o objetivo de avaliar o desempenho operacional desta tecnologia *in loco*.

A análise das condições de operação avalia o tempo de deságüe, a capacidade de suporte da malha do geossintético, a capacidade volumétrica real dos *bags*, as características físico-químicas dos resíduos geocondicionados e da água drenada (Capítulo 4); e, define o polímero e a faixa de dosagem de melhor operação.

### 5.2. FLOCULAÇÃO

Para garantir o funcionamento do processo de retenção dos sólidos com o uso de geossintético, na forma de *bag*, é necessária a adição de um agente flocculante. No presente estudo utiliza-se polímeros sintéticos. De forma genérica, os polímeros provocam uma ligação entre as partículas, aderindo-as às superfícies absorventes dos colóides, provocando a formação de massas flocculadas de maior porte para garantir a separação da fase líquida da fase sólida.

A eficiência da flocculação garante a eficiência da operação do *bag*. Assim, é necessária a construção de uma planta de polímero. Essa planta é composta de reservatório de

polímero, previamente dosado e testado quanto a sua eficiência de floculação e reservatório de água limpa, para servir de meio reagente, quanto da abertura das cadeias poliméricas. A capacidade volumétrica destes reservatórios depende da dosagem de polímero em relação ao volume bombeado por hora. Aconselha-se o uso de um reservatório exclusivo para a preparação e dosagem do polímero.

A escolha adequada da bomba dosadora deve considerar os percentuais de sólidos totais do efluente. Na Figura 5.1 observa-se a bomba dosadora utilizada no teste. Nesse estudo, esta bomba não atende as necessidades de operação quando ocorre o aumento da concentração do lodo (entre 3,5 e 6%), uma vez que, mesmo trabalhando com três pistões, a dosagem de polímero não é suficiente para garantir a floculação. Entretanto, é possível utilizá-la no teste porque a concentração média de sólidos totais no lodo variou até 1,5 %.



**Figura 5.1:** Bomba dosadora e tanques de preparação do polímero utilizada no teste na ETA de Gravataí - RS

Outro fator limitante para a eficiência da floculação é o tipo de polímero. No presente trabalho foram testados vários tipos de polímeros considerando a carga elétrica e a massa molecular. A concentração mais eficiente e a dosagem ideal dependem de testes em bancada e *in loco*. Na Tabela 5.1 observam-se os resultados dos ensaios realizados, em bancada, para verificação da melhor floculação, com o uso de diferentes polímeros sintéticos.

**Tabela 5.1:** Resultados dos ensaios, em bancada, com polímeros sintéticos.

PLANILHA DE MONITORAMENTO DOS ENSAIOS COM POLIMEROS						
POLIMERO	CARGA ELETRICA	MASSA MOLECULAR	TEMPO AGITAÇÃO	CARACTERISTICA DA FLOCULAÇÃO	CONCENTRAÇÃO	DOSAGEM (ppm)
sem polímero	—	—	1 minuto	não floculou	—	—
com polímero 912	neutro	media/alta	1 minuto	boa floculação	0,10%	50 ppm
com polímero 905	aniônico fraco	média	1 minuto	regular floculação	0,10%	50 ppm
com polímero 910	aniônico médio	média	1 minuto	não floculou	0,10%	50 ppm
com polímero 934	aniônico forte	média	1 minuto	não floculou	0,10%	50 ppm
com polímero 4140	catiônico fraco	média	1 minuto	não floculou	0,10%	50 ppm
com polímero 4240	catiônico médio	média	1 minuto	não floculou	0,10%	50 ppm

Os polímeros que apresentam efetiva reação de floculação são o aniônico de baixa carga molecular e o neutro. Na Figura 5.2 verifica-se o teste de bancada realizado e visualmente observam-se as diferenças de floculação nas diferentes amostras.



**Figura 5.2:** Ensaio, em bancada, com polímeros sintéticos.

Nos testes realizados na ETA de Gravataí adota-se um polímero comercializado como polieletrólito. Devido à característica dos resíduos sólidos gerados nas ETAs, que possui carga iônica positiva, a melhor floculação ocorre com o polímero levemente aniônico, de baixa carga molecular. A reação do polímero com o efluente é momentânea e pode ser observada na Figura 5.3.



**Figura 5.3:** Reação do polímero com o lodo promovendo a separação da fase sólida da fase líquida

Ressalta-se a diferença de concentração e dosagem utilizadas nas duas etapas: *bag* suspenso e *bag* disposto ao solo. Na primeira, a dosagem utilizada foi de 50 ppm, com uma concentração de 0,10%. Na segunda, se reduz a dosagem para um valor médio de 20 ppm com uma concentração de 0,50%. Essa diferença deve-se ao mecanismo de preparação e dosagem do polímero que foi manual para o *bag* suspenso e mecanizado para o *bag* disposto ao solo, conforme apresentado na Figura 5.4. O presente trabalho mostra que não é possível promover a dosagem do polímero dentro do tanque de equalização, uma vez que o bombeamento quebra o floco.





**Figura 5.4:** Preparação do polímero de forma manual e mecanizada.



**Figura 5.5:** Ponto de aplicação do polímero – sistema ziguezague.

### 5.3. RESULTADOS PARA O ENSAIO DO *BAG* SUSPENSO

O teste tem início no dia 30 de abril de 2006, às 10h. São bombeados 400 litros de lodo do decantador, com percentual de umidade de 98,5% em dois *bags* suspensos de capacidade nominal de 200 litros cada (B1 e B2). Ao término do bombeamento, a abertura

superior dos *bags* é completamente fechada. Nesta pré-análise da eficiência no processo de filtração e do desaguamento foram aplicam-se os procedimentos do ensaio, conforme apresentado por Fowler et al (1994) e Martins (2006). A Figura 5.6 apresenta a seqüência de procedimento do ensaio.



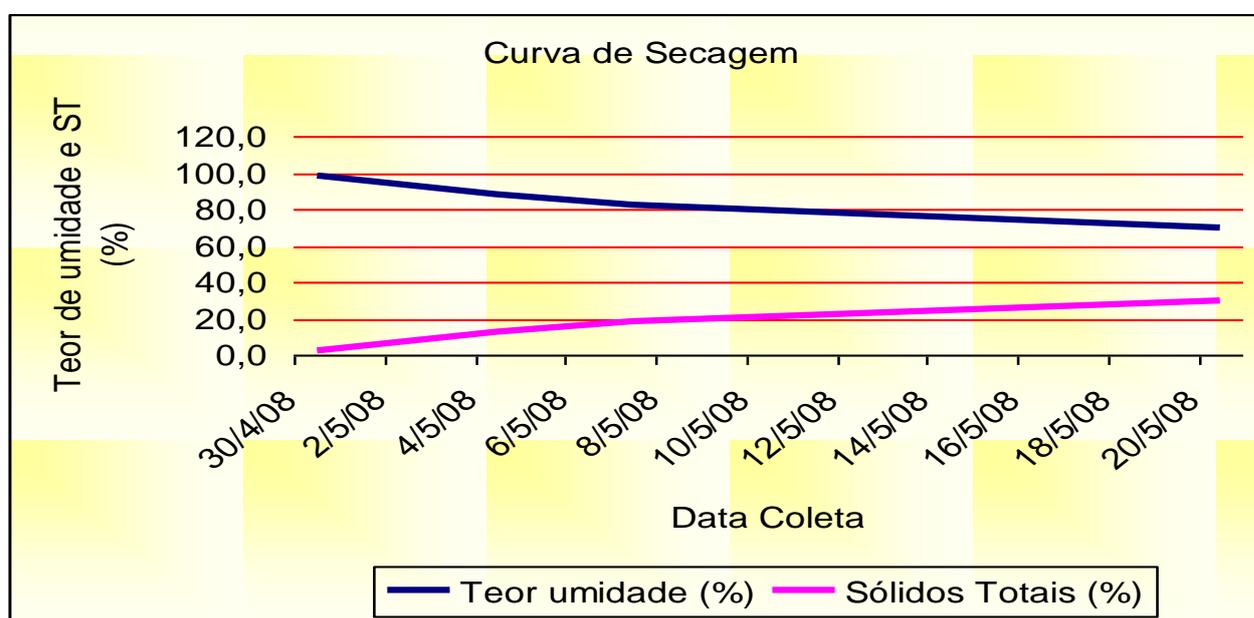
**Figura 5.6:** Seqüência do procedimento de ensaio. Foto (a) verificação, em bancada, da eficiência da filtração; Foto (b) verificação, *in loco*, da eficiência da floculação; Foto (c) suspender o *Bag* e deixar um tanque para o deságüe.

Esse teste é utilizado para o dimensionamento do *Bag*, ou seja, possibilita avaliar a curva de secagem para um determinado resíduo, conforme as condições do meio e as características dos resíduos em teste. Na Figura 5.7 apresenta-se, com detalhe, o processo de deságüe no teste B1.



**Figura 5.7:** Detalhamento do processo de desaguamento

Realiza-se o teste com dois *bags* para avaliar separadamente a curva de tendência da secagem em dois momentos: somente com um bombeamento, conforme demonstrado na Figura 5.8 e com três bombeamentos consecutivos.



**Figura 5.8:** Curva de secagem – teste *bag* suspenso com um bombeamento de 200 litros (teste B1).

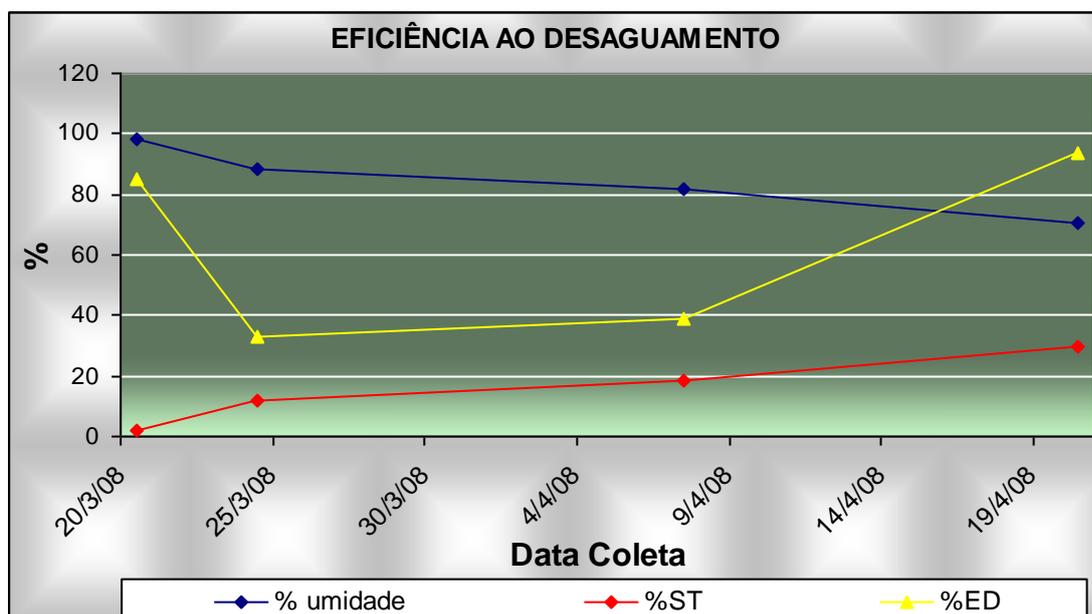
Observa-se neste ensaio uma redução do percentual de sólidos de 1,8% no início do ensaio para 29,8%, aproximadamente trinta dias após o bombeamento. Após este período não ocorre significativa alteração do volume do material geocondicionado no primeiro *Bag*. A

eficiência à filtração (EF) e a eficiência ao desaguamento (ED) proposta por Moo-Young et al (2002) no Capítulo 2.

De particular interesse, a eficiência do desaguamento é normalizada, de acordo com aquele estudo, pela relação de comparação entre as porcentagens de sólidos finais e iniciais no material retido. Aqui, sugere-se uma alteração da fórmula proposta por Moo-Young (op. cit.) para medir a eficiência do desaguamento, de modo para que o valor limite da eficiência ao desaguamento seja, no máximo, de 100%, conforme a equação abaixo:

$$EF = \frac{PS_{\text{final}} - PS_{\text{inicial}}}{PS_{\text{final}}} * 100\%$$

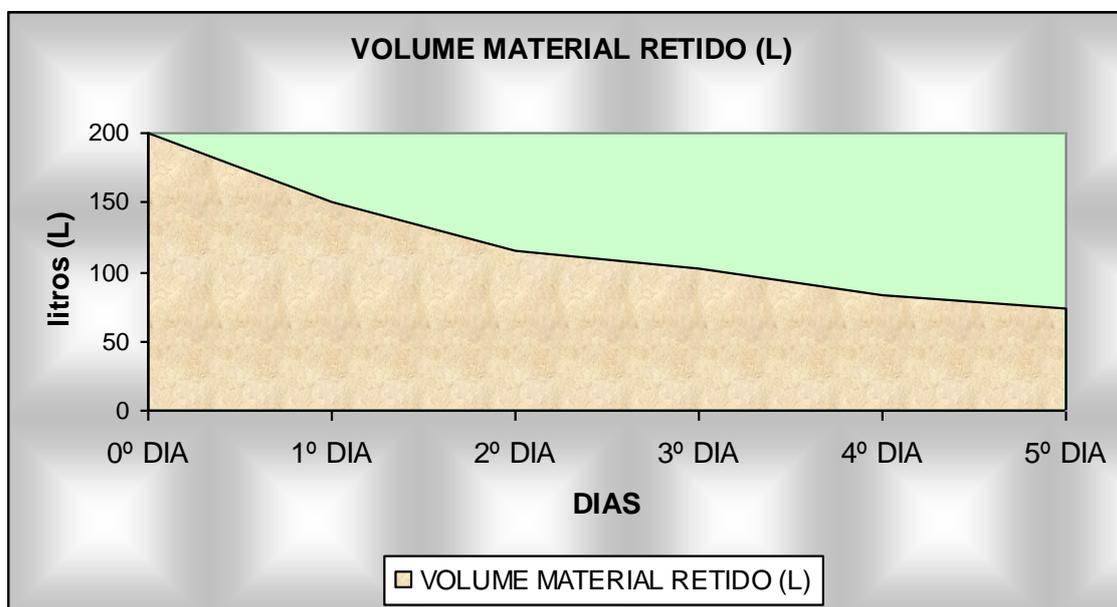
Os valores da ED calculados variam entre 0% e 100%. No espaço ED versus tempo, percentual de umidade versus tempo e percentual de sólidos totais versus tempo é possível visualizar diretamente a eficiência do sistema de deságüe em porcentagem, conforme observado na Figura 5.9. Portanto, os resultados apresentam uma comparação entre a eficiência ao desaguamento com a redução do teor de umidade e de sólidos totais no período de trinta dias, e pode-se observar que no período de menor eficiência ao desaguamento ocorreu a menor redução do teor de umidade. Destaca-se que o valor de ED no último período aumenta porque o valor representa a relação entre os teores de sólidos no início do teste e no final do teste.



**Figura 5.9:** Comparação entre a eficiência ao desaguamento e a redução do teor de umidade e a concentração de sólidos totais, para os resíduos retidos no *bag* suspenso

Da análise da equação proposta observa-se que a eficiência final ao desaguamento foi de 94%. A proposta de Mon-Young et al. (2002) teria como valor limite máximo o valor do teor de umidade inicial (para uma análise simplificada, assumindo que não houve perda de partículas pelo processo de filtração). A redução do teor de umidade foi de aproximadamente 29% (reduzindo de 98,5% para 69,5%), ainda que com o tempo o teor de umidade do material reduziu-se, atingindo, após dois meses e meio do material geocondicionado, o valor de 49%.

Utiliza-se o teste com o *bag* suspenso como balizador para a avaliação do comportamento do uso do geossintético para o deságüe do lodo de ETA. A Figura 5.10 apresenta o perfil do desaguamento. Pode-se verificar que logo após a adição do material (lodo mais polímero) ao *bag* ocorre o maior desaguamento, que reduz gradativamente ao longo dos dias.

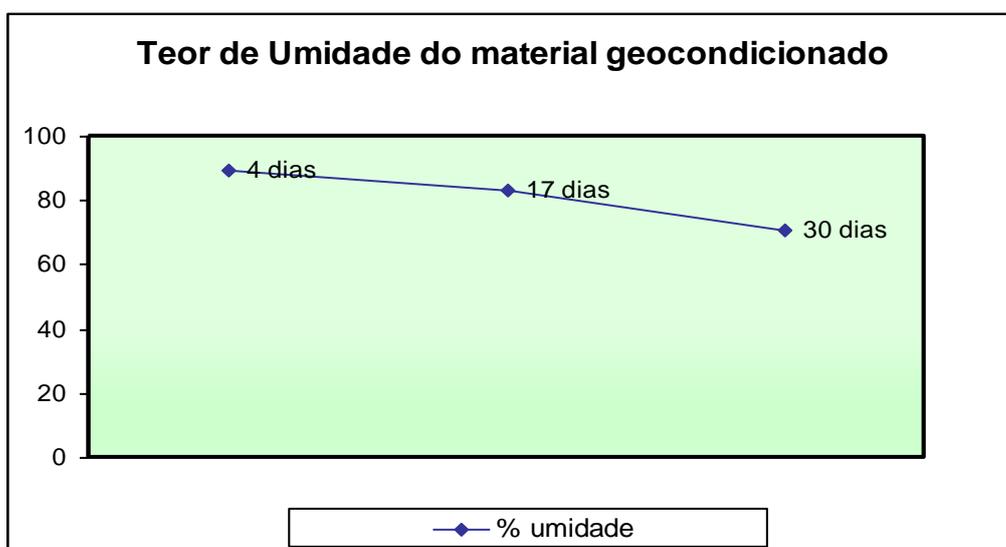


**Figura 5.10:** Relação do volume de material (lodo+polímero) retida no *Bag* suspenso ao longo dos primeiros 5 dias.

Pela Figura 5.10 percebe-se que ocorre uma redução do volume de material adicionado de 200 litros, para 74,4 litros, nos primeiros cinco dias. Após este período o

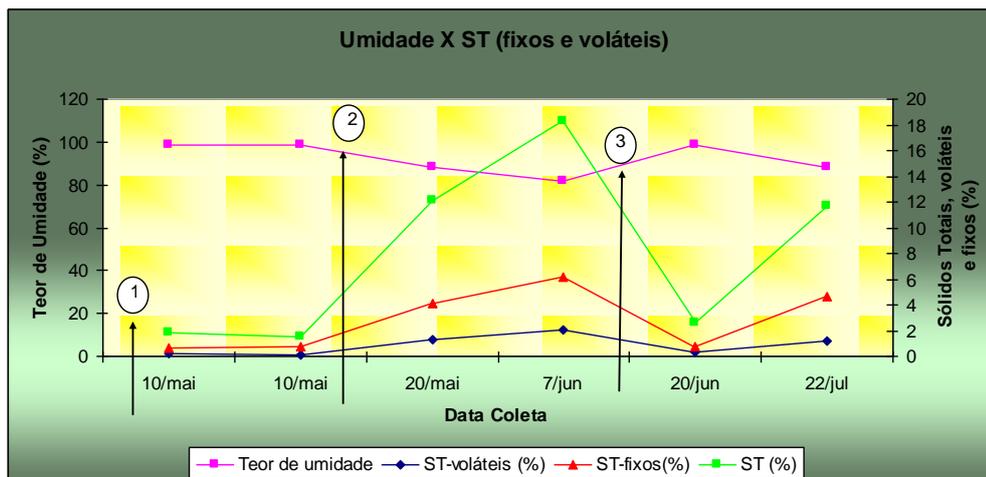
percentual de desaguamento reduz drasticamente, mesmo que ocorra uma redução posterior no teor de umidade (Figura 5.11).

Na Figura 5.11, verifica-se a redução do teor de umidade após 4, 17 e 29 dias do início do bombeamento. Mesmo depois do período de maior deságüe ocorre uma sensível redução do teor de umidade, provavelmente, pela ação do processo de secagem através da transferência de calor.



**Figura 5.11:** Teores de umidade do material geocondicionado em 4, 17 e 30 dias após o início do bombeamento.

No teste realizado com o segundo *bag*, o objetivo consiste em avaliar a capacidade volumétrica do geossintético. Para tal, promove-se o bombeamento consecutivo de 200, 150 e 100 litros de lodo com percentual de umidade de 98,5%, respectivamente em 30 de abril, 18 de maio e 16 de junho. Realiza-se o bombeamento total de 450 litros, em oposição aos 200 litros do primeiro *bag*. A Figura 5.12 mostra esses valores juntamente com a variação dos percentuais de umidade e o teor de sólidos com as respectivas adições de resíduos sólidos. Sugere-se a análise conjunta da figura 5.12 e a Tabela 5.2..



**Figura 5.12:** Curva de secagem – teste *Bag* suspenso com um bombamento de 200 litros (posição 1), 150 litros (posição 2) e 100 litros (posição 3).

Pela Figura 5.13, os teores de umidade não apresentam grandes variações, tendo reduzido somente 10,2% ao longo do período de teste. Como era esperado, há uma correspondência entre os teores de sólidos totais, fixos e voláteis, e os resíduos geocondicionados que apresentam baixo teor de sólidos voláteis. Tem-se, assim, um sensível aumento da concentração de sólidos totais entre a segunda e a terceira adição de lodo.

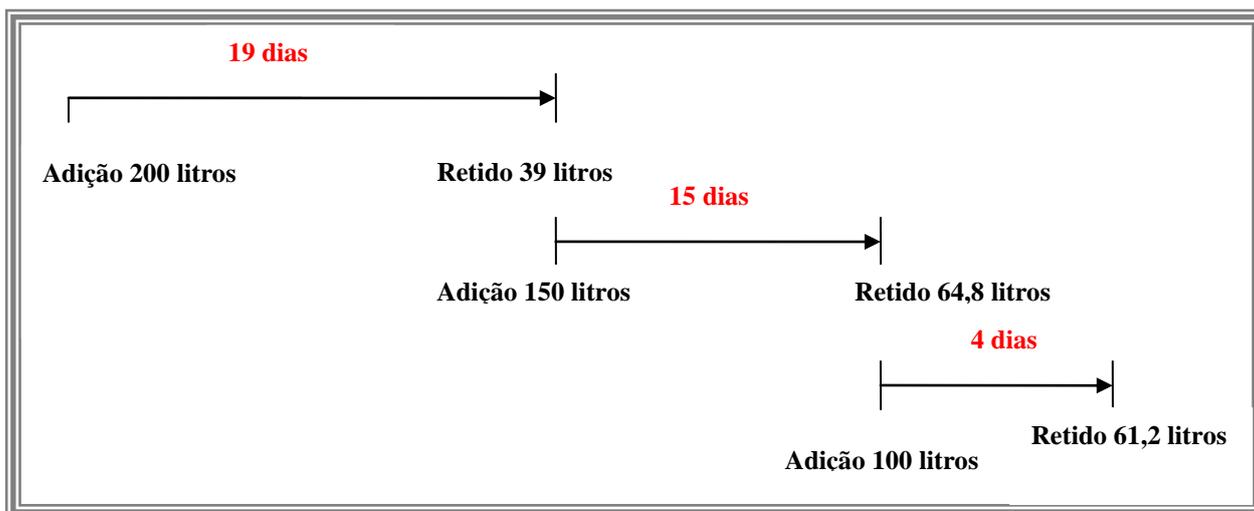
Pela Tabela 5.2 podemos observar que a taxa média de deságüe por litros de água drenada/dia é de 8,5, 8,3 e 25,9 litros para a primeira, segunda e terceira adição de lodo, respectivamente. Entretanto o aumento da taxa de deságüe da segunda para a terceira adição de lodo resulta da deformação da malha do geossintético, uma vez que o peso do material geocondicionados no *bag* suspenso leva ao aumento da abertura da malha e permite uma maior taxa de drenagem, com uma pior qualidade do material drenado. Esta observação é empírica, pois não há uma medida direta e precisa da variação da abertura do geotêxtil durante os testes.

**Tabela 5.2:** Resultados de teor de umidade e ST (fixos e voláteis) para o lodo geocondicionados após adições consecutivas.

Coleta	umidade (%)	ST-fixos (%)	ST-voláteis (%)	ST (%)
10/mai	98,5	1,1	0,64	1,8
10/mai	98,8	0,74	0,74	1,48
Adição de mais 150 litros em 18/05/2006				
20/mai	88,3	8,07	4,08	12,15
7/jun	81,8	12,1	6,2	18,3
Adição de mais 100 litros em 16/06/2006				
20/jun	98,6	1,8	0,8	2,6
22/jul	88,3	7,1	4,6	11,7

Analisando simultaneamente a eficiência da filtração e a eficiência ao desaguamento do segundo *bag*, destaca-se a similaridade no desaguamento em relação ao ensaio com *Bag* suspenso, mesmo com consecutivas adições de resíduos. Nestes ensaios há uma redução do percentual de sólidos de 1,8%, no início do ensaio, para 11,7%, aproximadamente oitenta e três dias após o bombeamento. Assim como no primeiro *bag*, aplica-se a equação para o segundo, e a eficiência ao desaguamento obtida é de 84,61%.

Na Figura 5.13 são apresentadas as comparações entre as adições de lodo ao longo do período do teste e o material retido antes de cada adição, e também ao final do processo. Para avaliar a capacidade volumétrica do geossintético, adiciona-se 450 litros a um *bag* de 200 litros de capacidade. Aos 450 litros, o bombeamento é interrompido devido à deformação da malha do geossintético. Nesse ponto, o peso do material retido atinge 58,9 Kg. Portanto, nota-se que há relação direta entre as medidas em litros e em gramas nos valores representados na tabela e na figura, provavelmente, devido à variação de densidade do lodo. No entanto, não foram feitas análises de densidade.



**Figura 5.13:** Taxa deságüe e quantidade de lodo geocondicionados com as adições consecutivas.

**Tabela 5.3:** Taxa deságüe e quantidade de lodo geocondicionados com as adições consecutivas.

Adição de lodo	Deságüe		taxa de deságüe (L <sub>água</sub> drenada/dia)	massa de lodo (Kg)	Teor de umidade no lodo (%)
	Dias	Volume (l)			
200 litros	19	161	8,5 litros/dia	0	100
150 litros	15	124,2	8,3 litros/dia	38,5	29,8
100 litros	4	103,6	25,9 litros/dia	58,9	29

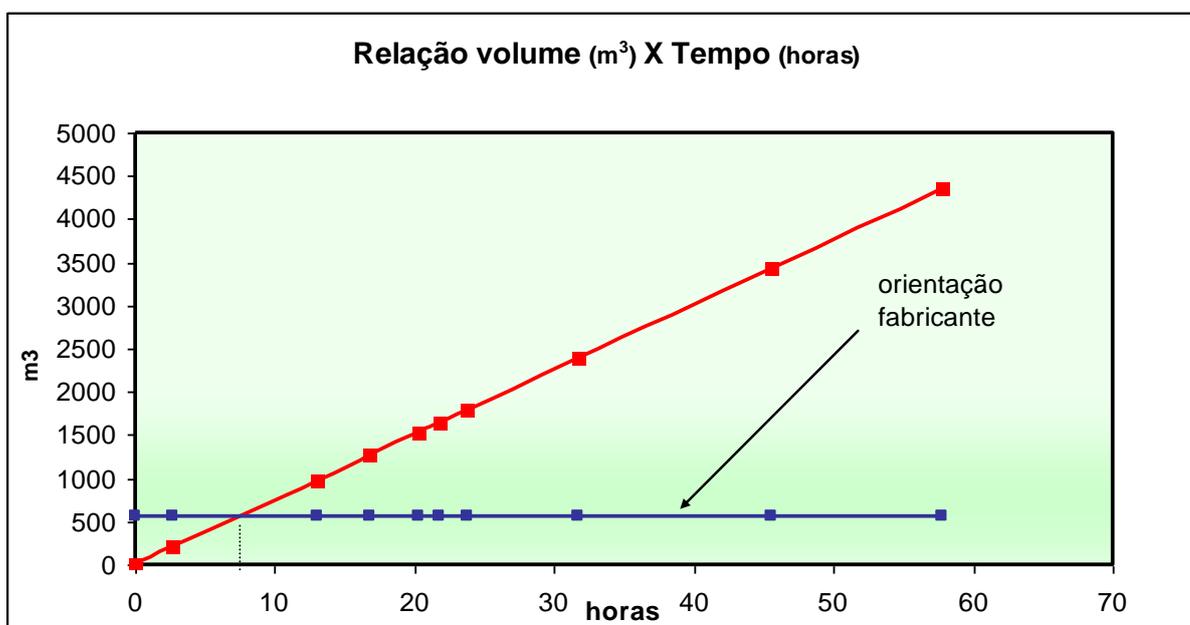
Verifica-se que a segunda adição de 150 litros de lodo, conforme demonstrado pela Tabela 5.3., ocorre quando há 38,5 Kg de lodo geocondicionado com cerca de 29,8% de umidade. Após a terceira adição de lodo, a massa do resíduo geocondicionado é de 58,9 Kg, com percentual de umidade próximo a 29%.

Por tratar-se de uma nova técnica aplicada ao gerenciamento de resíduos gerados em ETAs, salienta-se que há publicações insuficientes na literatura indicando como os resultados obtidos no ensaio de *bag* suspenso podem ser utilizados para estimar o comportamento deles em operação. Contudo, estes resultados qualitativos servem de indicativo para a metodologia de avaliação do teste de operação, relatado a seguir.

#### 5.4. RESULTADOS PARA DO ENSAIO DO *BAG* DISPOSTO SOBRE SOLO

O teste com o uso de geossintético disposto sobre o solo tem início em 23 de dezembro de 2006. Neste período, há um odor bastante intenso do lodo na lagoa de infiltração devido ao calor da estação (verão no Rio Grande do Sul). Após o bombeamento para o *bag* o cheiro desaparece, mesmo na água drenada. Tal observação empírica oferece indícios para o uso desta técnica em detrimento de outras técnicas convencionais em locais de concentração populacional.

As especificações técnicas apresentadas pelo fabricante do geossintético prevêm um volume nominal de bombeamento de 550 m<sup>3</sup>, com taxa de sólidos totais de 2%. A Figura 5.14 mostra que, após aproximadamente 7 horas de bombeamento, o volume bombeado corresponde ao volume nominal do *bag*. Neste ponto, observa-se claramente que o potencial de armazenamento do *bag* não está esgotado – fato que oferece indícios de conservadorismo nas estimativas do fabricante.



**Figura 5.14:** Curva de volume bombeado com o tempo de bombeamento para o *bag* disposto sobre o solo.

O percentual de sólidos totais do lodo a ser bombeado varia entre 6% a 0,10% e apresenta uma média de 1,0 %. Manter o teor de sólidos homogêneo só é possível a cada batelada, já que a equalização do lodo na lagoa de decantação é difícil. Esse dado pode explicar a eventual dispersão dos resultados apresentados ao longo deste capítulo.

O funcionamento do *bag* depende da eficiência da floculação e, para garantir a dosagem mais adequada, é necessária a equalização do lodo. Na presente pesquisa, foi utilizado um tanque de equalização do lodo com as dimensões apresentadas na Figura 5.15 (vide croqui do Capítulo 3).

A capacidade volumétrica do tanque deve-se à opção de trabalhar em regime de batelada. A aplicação desse tipo de regime permite controlar as possíveis variações de sólidos totais decorrentes do processo de bombeamento e da heterogeneidade do lodo de dentro da lagoa de infiltração. Assim, sugere-se que avalie-se o bombeamento do lodo direto por sucção de fundo do decantador para o *bag*, com a adição de polímero pelo sistema de chicanas, em implantações futuras desta tecnologia.

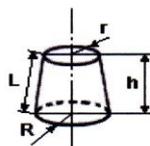
TANQUE DE EQUALIZAÇÃO LODO		
R	r	h
1.5 m	1.325 m	3 m

Fórmula Utilizada:

$$V = \frac{1}{3} \pi h (R^2 + Rr + r^2)$$

Resultado
Volume (V) = 18.82796 m <sup>3</sup>

**Comentários:**  
Volume útil corresponde até o nível da bomba.



**Legenda:**

- $S_L$  - Área lateral do tronco de cone
- V - Volume do tronco de cone
- R - Raio da base maior
- r - Raio da base menor
- h - Altura do tronco de cone

**Figura 5.15:** Dimensões do tanque de equalização de lodo.

Na operação do *bag* disposto sobre o solo, bombeia-se 250 bateladas, cada uma com  $18,82 \text{ m}^3$ . Assim, o volume total de lodo bombeado é de aproximadamente  $5.000 \text{ m}^3$  – volume dez vezes maior que o limite estabelecido pelo fabricante. A Figura 5.16 apresenta as diferentes etapas de bombeamento do *bag*.



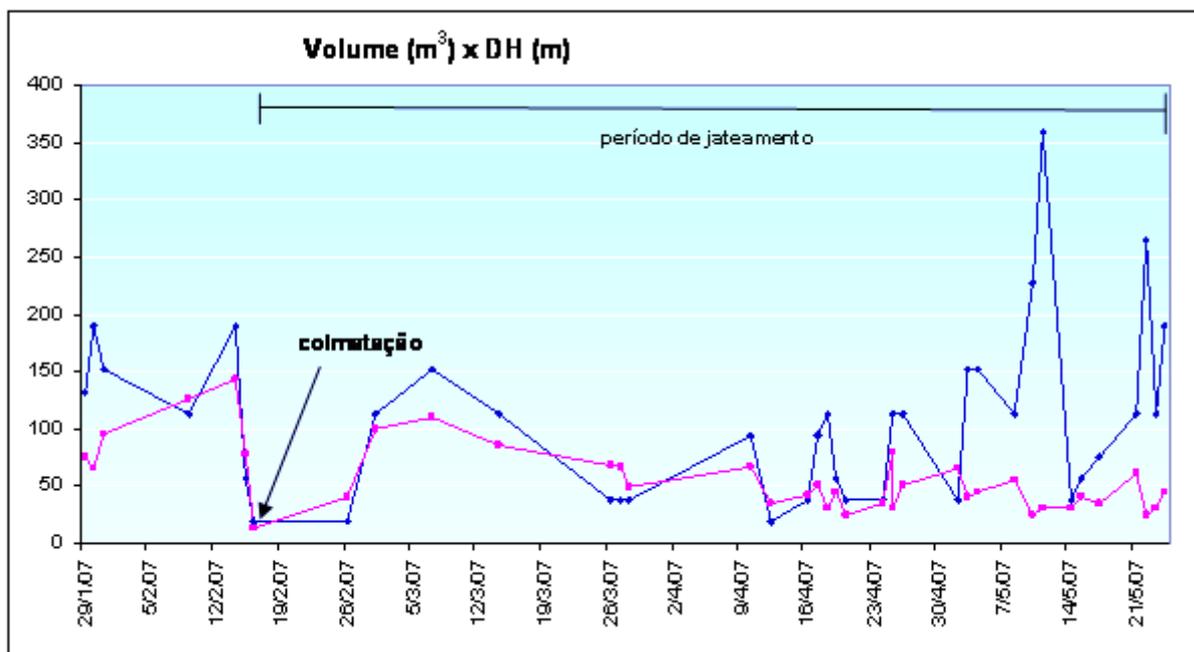


**Figura 5.16:** Diferentes etapas de bombeamento do *bag*.

Referenciando os estudos realizados por Vidal & Urashima (1999), há três diferentes condições para o meio poroso, conforme discutido na revisão bibliográfica: material a reter uniforme, material bem graduado e material mal graduado e não uniforme. A curva granulométrica apresentada no Capítulo 4 mostra um percentual significativo de partículas na fração areia, seguida de silte e argila. Essa provável descontinuidade granulométrica induz ao mecanismo de filtragem análogo (Vidal & Urashima, 1999) e pode relacionar-se à sufusão, ou seja, passagem livre das partículas mais finas através da estrutura do solo ou erosão interna, em função das condições do fluxo.

Na operação do *bag* disposto sobre o solo verifica-se que após a adição de 48 bateladas, ou seja, após o bombeamento de aproximadamente  $950 \text{ m}^3$  de material (lodo + polímero) é possível operar na altura máxima de 1,83 m indicada pelo fabricante. No processo, quando operando próximo à altura máxima, o volume de água drenada aumenta e, posteriormente, ocorre a colmatação. Esse evento pode ser útil para a compreensão dos mecanismos de retenção de sólidos e drenagem da parcela líquida dos lodos.

Na Figura 5.17, verifica-se no gráfico o momento da colmatação (neste período já havia sido bombeado aproximadamente  $950 \text{ m}^3$ ). O jateamento, então, funciona como uma medida operacional para garantir a continuidade do bombeamento.



**Figura 5.17:** Dimensões do tanque de equalização de lodo.

Segundo Vidal & Urashima (1999), o processo de colmatação física ocorre devido a um problema crítico de filtração em suspensão – perda de carga que ocorre quando as partículas carregadas encontram o geotêxtil. Já Leshchinsky (1992) e Gaffney et al (1999) ressaltam que o processo de colmatação diz respeito à colmatação física ou biológica do geotêxtil e denominam este processo de “*Filter Cake*”, pois ocorre o melhora da filtração e a água drenada torna-se mais limpa. No entanto, o processo é acompanhado da diminuição da permeabilidade. Mesmo que a granulométrica das partículas seja menor que a abertura de filtração da manta, as mesmas tendem a se depositar na superfície do *bag*, provocando a colmatação.

Este processo é evidenciado no presente experimento e apresenta similaridade com as zonas de deposição do material durante o bombeamento, como nos estudos realizados por Gaffney et al. (1999) e Moo-Young & Tucker (2002) – mesmo que a técnica tenha sido aplicada ao tratamento de resíduos oriundos das estações de tratamento de esgoto e não de sistemas de tratamento de água.

O comportamento da filtração é compatível com as descrições na literatura, ou seja, ocorre maior drenagem no período anterior à colmatação. No acompanhamento da operação, à medida que aumenta a concentração de resíduos geocondicionados, a drenagem na parte

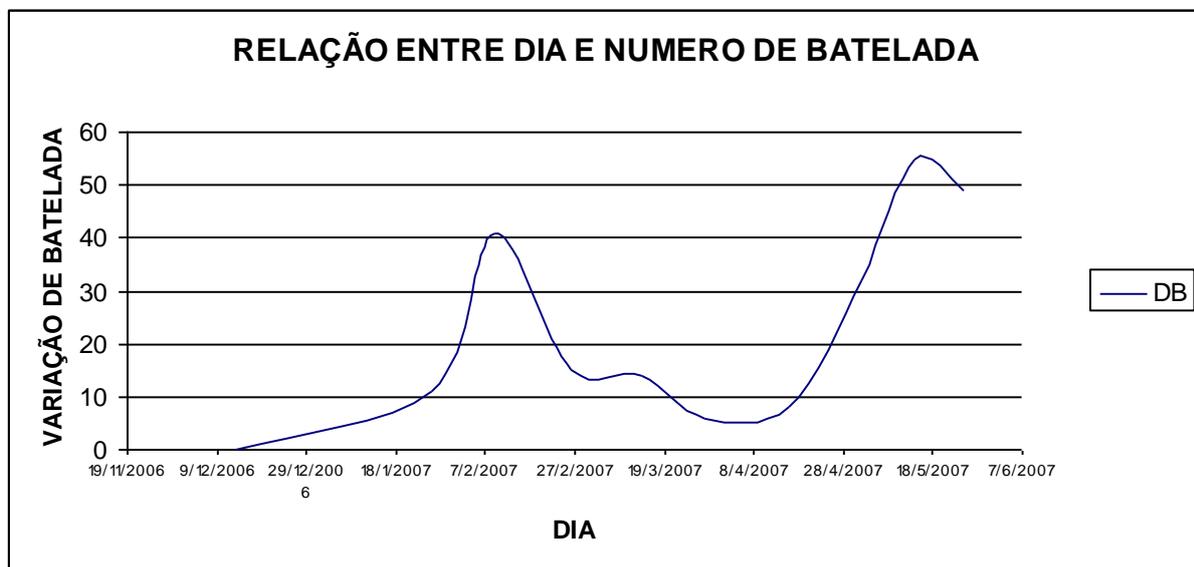
inferior do *bag* é reduzida. No teste realizado com o *Bag* disposto sobre o solo verifica-se a colmatação após o bombeamento ocorrido na capacidade máxima de operação, ou seja, no momento posterior à primeira operação na altura máxima de bombeamento, de acordo com a orientação do fabricante.

A Figura 5.18 apresenta uma foto com o procedimento operacional para a remoção da película que se forma na interface do geotêxtil com o material que estava sendo desaguado. A agitação das paredes do geossintético, promovida pela pressão do lava-jato, promove a remoção da película na superfície interna do *bag* e possibilita a continuidade da operação. Entretanto, posteriormente é necessário empregar o procedimento periodicamente para garantir a continuidade da operação (Figura 5.19) e o bombeamento de 5000 m<sup>3</sup> de resíduos.

Sem qualquer perda de eficiência no *bag*, é possível bombear 950 m<sup>3</sup>– o dobro da recomendação do fabricante. Após a colmatação ocorre perda de eficiência mecânica, mas, não há comprometimento da qualidade da água de deságüe (análise química apresentada no Capítulo 4). Portanto, não há motivo para interromper a operação. Conforme Figura 5.19, após vários jateamentos, a eficiência mecânica do *bag* aumenta significativamente. Isso ocorre porque a operação ocorre sempre próxima à altura máxima do *bag* (altura da ordem de 1,40m) e corresponde às máximas pressões de água no interior do *bag*.



**Figura 5.18:** Medida operacional para remoção da colmatção.



**Figura 5.19:** Momento da colmatção e do jateamento.

## 5.5. ANÁLISE ECONÔMICA

Nesta seção é apresentada uma breve análise de viabilidade econômica já que a escolha de uma tecnologia para o deságüe dos resíduos sólidos deve avaliar aspectos técnicos, ambientais e econômicos. Os custos apresentados na Tabela 5.3 consideram a implantação, manutenção e a utilização de insumos necessários ao funcionamento do sistema.

O fabricante do *bag* informa que o produto é importado pela NCM 59.09.00.00 com imposto de importação de 14% e IPI de 5%, dentro da classificação de produto têxtil. A garantia oferecida pelo fabricante é de 18 meses contados da data de entrega dos materiais ou 12 meses de operação, o que primeiro ocorrer. Esta garantia não considera defeitos atribuídos aos seguintes itens:

- Não observância das instruções;
- Desgastes normais decorrentes de uso;
- Indevida utilização;

- Dano causado por dolo, culpa ou inexperiência do operador ou terceiros.

Os equipamentos são fornecidos em embalagem apropriada para transporte rodoviário, e com romaneio de embarque. A vida útil do produto é de até 10 anos exposto às intempéries. Os períodos de utilização para o bombeamento de resíduos sólidos podem ser intercalados.

Para efeito de cálculo, convencionou-se que a vida útil do *bag* é equivalente a uma capacidade de bombeamento de 5000 m<sup>3</sup> e que as instalações hidráulicas e eletro-mecânica implementadas apresentam uma vida útil de aproximadamente 15 anos, período médio utilizado nos cálculos de obras de engenharia. Os custos de operação consideram a utilização de técnicos e agentes de tratamento de água e esgoto, cujo salário e encargos somam o valor de R\$ 4.320,00 por mês.

A base de custos de energia elétrica está apresentada na Tabela 5.4. A concessionária da ETA de Gravataí é a empresa RGE e as taxas médias do período para os horários de pico e fora de pico são R\$ 0,80 e R\$ 0,20, respectivamente. O tempo de operação das bombas considerado para o cálculo do consumo de energia elétrica utiliza grau de incerteza de 20%.

O teste emprega três bombas centrífugas com as seguintes características e tempo de operação:

- Bomba submersível (instalada na lagoa); GMB submersível marca KSB, tipo KRTK 100-251, 10 CV, 380 V, DN rotor 205 mm; o tempo médio de operação é 87 horas;
- Bomba submersa (para pressurização *bag*): GMB submersível marca KSB, tipo BPD 262/2 – 4,8 CV 380 V – 60 HZ; o tempo médio de operação é 87 horas;
- Bomba submersível (reservatório de recirculação da água drenada): GMB submersível marca SPV, tipo P40 CHV, 6,3 CV, 380 V – 60 HZ; o tempo médio de operação é 82 horas.

**Tabela 5.4:** Custos de energia elétrica para o teste – ETA Gravataí – RS.

Calculo do Custo de Energia Eletrica			
Unidade:	Gravataí		
Período considerado:	dez/2006 a jun/2007		
Concessionária:	RGE		
Período	KWh Fat Pta	R\$ FatPta	R\$/KWh
dez/06	220824	R\$ 4.980,00	R\$ 0,02
jan/07	223904	R\$ 4.764,91	R\$ 0,02
fev/07	225760	R\$ 5.216,10	R\$ 0,02
mar/07	253632	R\$ 5.359,13	R\$ 0,02
abr/07	229320	R\$ 4.628,13	R\$ 0,02
mai/07	257360	R\$ 5.903,20	R\$ 0,02
jun/07	235752	R\$ 6.296,06	R\$ 0,03
jul/07	223408	R\$ 6.111,05	R\$ 0,03
ago/07	247112	R\$ 6.484,96	R\$ 0,03
set/07	223624	R\$ 5.996,14	R\$ 0,03
out/07	244840	R\$ 7.035,87	R\$ 0,03
nov/07	274232	R\$ 6.097,44	R\$ 0,02
dez/07	239904	R\$ 5.125,23	R\$ 0,02
<b>total</b>	<b>3099672</b>	<b>R\$ 73.998,22</b>	<b>R\$ 0,20</b>

Tipo bomba	cv	kw	horas operação	kwh	R\$/KWh
Bomba submersível (instalada na lagoa)	10	7,50	87	652,5	R\$ 130,50
Bomba submersa (para pressurização bag)	4,8	3,60	87	313,2	R\$ 62,64
Bomba submersível ( reservatório de recirculação da água drenada):	6,3	4,73	82	387,5	R\$ 77,49
					<b>R\$ 270,63</b>

O custo na utilização de insumos baseia-se na necessidade do uso de polímeros para garantir o funcionamento do processo de retenção dos sólidos a partir do bombeamento de efluentes com percentuais variados de sólidos totais. O polímero encontra-se na forma sólida, sendo que o kg do produto é comercializado por R\$ 11,00. Para o teste, o rendimento foi, em média, 80 m<sup>3</sup> de lodo tratado/kg de polímero.

Os custos de manutenção do sistema utilizam como base de cálculo o percentual de 3% ao ano sobre o valor da instalação (não inclusos os valores de transporte e disposição final dos resíduos sólidos gerados). Na Tabela 5.5., estão os custos estimados para a implantação e operação do sistema de tratamento de lodo utilizando o *bag*.

**Tabela 5.5:** Estimativa de custos do sistema de tratamento utilizando o *bag* disposto sobre o solo

CUSTO UNITÁRIO DO SISTEMA DE DESÁGÜE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE ETAs			
Natureza	descrição	Custo Total	R\$/m <sup>3</sup> bombeado.ano
Custo de capital	bag (vida útil = 5.000 m <sup>3</sup> )	R\$ 15.000,00	R\$ 3,00
	instalações hidráulicas e eletro-mecânicas (vida útil =15 anos)	R\$ 73.000,00	R\$ 0,97
Sub-total			<b>R\$ 3,97</b>
Custo de operação	pessoal	R\$ 4.320,00	R\$ 0,86
	energia elétrica	R\$ 270,63	R\$ 0,05
	insumos (polieletrólito)	R\$ 687,00	R\$ 0,14
Sub-total			<b>R\$ 1,06</b>
Custo de manutenção	manutenção das instalações	R\$ 2.190,00	R\$ 0,44
Sub-total			<b>R\$ 0,44</b>
Sub-total			<b>R\$ 5,47</b>

Com base nesta análise simplificada, e conforme resumido na Tabela 6.2, o custo unitário, quando aplicado à tecnologia ao lodo de ETA e considerando as peculiaridades do sistema de Gravataí, resulta em um valor aproximado de R\$ 5,47/ m<sup>3</sup> bombeado por ano.

A comparação desta tecnologia com as outras alternativas usualmente adotadas pelas estações de tratamento não é facilmente obtida em função de variáveis como o volume a ser tratado e o tempo de tratamento, só para citar duas. O custo médio para remoção dos resíduos do leito de secagem de uma ETA do Estado do Rio Grande do Sul é de R\$ 16,00/m<sup>3</sup>, por exemplo. Adicionalmente, não há dados disponíveis na literatura que fazem referência a custos de tratamento. Portanto, o valor de R\$ 5,47/ m<sup>3</sup> bombeado por ano serve apenas como indicativo, podendo servir de referência quando da avaliação de viabilidade da técnica.

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

O presente estudo propõe e avalia o uso de geossintético para o deságüe e geocontenção de resíduos sólidos de estações de tratamento de água. A seguir, apresentam-se as conclusões da pesquisa diferenciadas para as modalidades *bag* suspenso e *bag* disposto sobre o solo, as considerações gerais, lições aprendidas e sugestões e recomendações para futuras pesquisas sobre o tema.

### 6.1. BAG SUSPENSO

Os ensaios com bolsa de geotêxtil suspensa são propostos como pré-análise da eficiência da filtração, caracterizada pela curva de secagem e do desaguamento proposto, bem como a relação entre os teores finais e iniciais de sólidos totais nos resíduos do geossintético. O procedimento auxilia na identificação da dimensão do geossintético a ser utilizado em escala real, bem como o geossintético mais adequado, pela eficiência na filtração, para cada tipo de material. O ensaio, porém, não permite a análise do desaguamento por completo, uma vez que este processo está diretamente ligado ao peso próprio do material e à área filtrante.

O ensaio com a bolsa suspensa também pode ser utilizado na avaliação do comportamento físico-químico dos resíduos geocondicionados ao longo do tempo. Nessa pesquisa, há uma contínua redução do teor de umidade. Esse fato fornece evidência da concentração de metais, compostos nitrogenados e sílica nos materiais geocondicionados.

### 6.2 BAG DISPOSTO SOBRE O SOLO

Para viabilizar a operação do *bag* disposto sobre o solo é necessário considerar alguns aspectos importantes, tais como:

- A variação da concentração de sólidos totais nos resíduos a serem geocondicionados;
- A escolha do agente flocculante mais adequado para promover a separação da fase sólida da fase líquida;
- A medida operacional que permita o descarte do material (resíduo + flocculante), na possibilidade de não ocorrer boa flocculação;
- A existência na planta de um sistema de preparo e aplicação de polímero e a possibilidade de utilizar dosadores com alta capacidade;
- A preferência pela aplicação de polímero por sistema de chicanas;
- A avaliação do comportamento do material (resíduos + polímeros), em escala real, de modo a possibilitar a escolha da melhor dosagem;
- A verificação do comportamento do sistema em operação com diferentes pressões internas, seja por diferentes pressões de bombeamento ou pelo controle da altura máxima de bombeamento;
- A verificação, junto ao fabricante, das condições ótimas de operação do *bag*, para servir como balizador da operação;
- O emprego de um lava-jato, ou equipamento similar, que promova a agitação da superfície do *bag*, como forma de remover a colmatção;
- A verificação da qualidade das costuras, bem como as especificações do geossintético.

A formação do “*Filter cake*” (película na interface do geossintético) durante o desaguamento de materiais finos traz benefícios ao processo de retenção das partículas; mas, em contrapartida, diminui a permeabilidade e dificulta a eliminação do fluído existente.

Outras considerações relativas à implantação do sistema com o uso de geossintético na forma de bolsa devem ser observadas:

- A preparação da célula de assentamento do *Bag* antes da instalação do sistema de modo que esteja devidamente nivelada a uma declividade máxima de 0,5% no sentido longitudinal da unidade. No sentido transversal, o desnível deve ser zero a fim de evitar o rolamento do geossintético.
- A construção de um sistema de contenção em todo o perímetro da célula para evitar que o líquido drenado escoe para o ambiente.
- A avaliação da necessidade de impermeabilização, com o uso de membrana do tipo PEAD em toda a área da célula, o que também evita que a água drenada infiltre no solo adjacente.
- A utilização de material com permeabilidade maior do que a do geotêxtil como meio drenante na célula. No estudo, emprega-se brita com altura de 15 cm.
- A construção de um sistema de aplicação do polímero, de modo que a realização de manobra para o descarte do material seja possível, quando não ocorrer a floculação,

Com base nos dados da presente pesquisa, propõe-se o cálculo da eficiência da drenagem (ED) em valores entre 0% e 100% e pela relação entre a diferença de sólidos totais finais e iniciais em relação aos sólidos totais finais.

Em relação à colmatação química ou biológica do geotêxtil, o estudo possibilita a comprovação *in loco* das discussões apresentadas por muitos autores, que justificam a sua ocorrência e apontam a filtração em suspensão como problema crítico, devido à perda de carga que se dá quando as partículas carregadas encontram o geotêxtil. Assim, conclui-se que a eficiência da floculação, juntamente com o bombeamento de resíduos com percentual de sólidos totais acima de 1%, minimiza a colmatação.

### 6.3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O uso da bolsa de geotêxtil pode ocorrer em processos de desaguamento de resíduos de estações de tratamento de água como sistema único ou para a otimização do sistema existente, servindo para a redução do volume de resíduos de modo eficiente e trazendo economia ao transporte e à disposição final, como apresentado no estudo da viabilidade econômica da implantação e da operação do sistema (Capítulo 5). O custo médio estimado é de R\$5,47/m<sup>3</sup> de bombeado por ano.

Como a grande maioria das estações de tratamento de água para abastecimento utiliza como coagulante o sulfato de alumínio, os resíduos gerados possuem características físico-químicas semelhantes. Esses são classificados como pertencentes à classe II-A, de acordo com a ABNT NBR 10.004:2004. O uso da tecnologia não altera a classificação dos resíduos, mas permite o desaguamento de uma maneira que evidencia as concentrações de elementos químicos presentes na composição do resíduo.

No que se refere às especificações técnicas apresentadas pelo fabricante do geossintético, ressalta-se que elas prevêm um volume nominal de bombeamento bastante inferior ao verificado pela pesquisa. Esse dado pode denotar certo conservadorismo das estimativas por parte do fabricante.

Na pesquisa de matérias, verifica-se que não há concepção padrão das bolsas e que, dependendo de cada caso, devem ser considerados, por exemplo, o volume de material, sua granulometria, a área disponível para desaguamento e o reuso ou disposição final dos resíduos. A técnica de desaguamento por bolsas têxteis apresenta diferentes resultados para a eficiência ao desaguamento nas duas etapas do estudo (vide Capítulo 5).

É notório que a eficiência da drenagem é resultante do controle de três fatores do processo, a saber:

- A qualidade da floculação. Nesse sentido, é necessário demarcar o ponto de coleta para a verificação da eficiência da floculação após a aplicação do polímero;
- A altura máxima de bombeamento. A pesquisa demonstra que a drenagem é mais eficiente quando operada na altura máxima;

- A homogeneização dos resíduos sólidos: a homogeneização deve ser realizada através de tanque de equalização, como forma de manter o percentual de sólidos.

O trabalho também busca a avaliação da real capacidade volumétrica dos geossintéticos, tanto no ensaio utilizando o *bag* suspenso quanto no teste com o *bag* disposto sobre o solo. No primeiro, bombeia-se duas vezes e meia a capacidade nominal indicada pelo fabricante – o ensaio é interrompido somente devido à abertura na malha. No teste utilizando o *bag* disposto ao solo, por sua vez, o resultado é mais animador, uma vez que bombeia-se 10 vezes mais do que o volume especificado pelo fabricante.

Para a operação da tecnologia é importante avaliar, em bancada, o melhor flocculante antes de iniciar a operação em escala real. Na escolha do agente flocculante, é importante avaliar a carga elétrica e a massa molecular. Igualmente, a estabilidade do floco deve ser avaliada e verificada, pois cada resíduo possui um agente flocculante mais adequado. Somente através de novos estudos será possível avaliar a utilização desta tecnologia sem o uso de um flocculante. No entanto, pode-se inferir que tal seja possível se a ETA utilizar um auxiliar de coagulação no processo de clarificação da água e se utilizar um tanque de separação de fases antes do bombeamento para o *bag*.

A pesquisa demonstra a crescente necessidade de adequação dos decantadores convencionais, através da utilização de sistemas de sucção de fundo dos resíduos sólidos gerados como forma de reduzir o volume de resíduos a serem tratados. Ainda, sugere-se o bombeamento contínuo do lodo, retirando-o diretamente do fundo do decantador.

Verifica-se a viabilidade técnica do uso de geossintético para o desaguamento dos resíduos sólidos das ETAs de modo pleno e satisfatório. Em especial, quanto ao processo físico-químico de desaguamento, sua viabilidade é atestada uma vez que a eficiência no processo de secagem serve como forma de garantir a redução dos teores de umidade e a manutenção da classificação ambiental dos resíduos gerados.

Quanto aos resíduos gerados, ressalta-se a tendência de concentração, na fase sólida, de alguns elementos como alumínio, nitrogênio e sílica, provavelmente pela pequena mobilidade destes elementos nas condições de pH encontradas nos resíduos. Igualmente, os teores de ferro e mangânes tendem a manter um aumento de concentração na água drenada,

indicando a necessidade de pós-tratamento para atender os padrões exigidos pela legislação vigente para o lançamento em corpos d'água. Como alternativa e processo adicional, sugere-se a recirculação completa da água drenada para o sistema de tratamento da água.

Apesar da avaliação da destinação final dos resíduos geocondicionados e do próprio *bag* não serem focos desse estudo, após avaliação e análises adicionais, o reuso dos resíduos em terraplanagem, confecção de tijolos, compostagens e incorporação ao concreto (co-processamento) poderia ser considerado.

Por tratar-se de uma tecnologia aplicada ao gerenciamento do lodo de estações de tratamento de água, é importante salientar que não há ainda dados suficientes na literatura que indiquem como os resultados obtidos com os *bags* possam ser utilizados para estimar a eficiência do desaguamento ao longo do tempo, havendo a necessidade de mais estudos que também considerem as características granulométricas dos resíduos e as características da malha do geossintético.

## 6.4 LIÇÕES APRENDIDAS

Após a realização da pesquisa, dos ensaios e dos testes, destacam-se algumas lições, que podem nortear a utilização ou o aprofundamento da avaliação da tecnologia. Assim, recomenda-se:

- A determinação, antes do início do teste, da faixa de percentuais de sólidos totais presentes no descarte do lodo dos decantadores. A medida auxilia na verificação de três importantes decisões a serem tomadas: a construção de um tanque de equalização; a aquisição de dosador adequado, que permita maiores dosagens; o cálculo prévio da eficiência da filtração e do desaguamento com o uso do geossintético.
- A avaliação, *in loco*, da real capacidade volumétrica do geossintético, pelo bombeamento e manutenção da operação na altura máxima especificada pelo fabricante. Essa orientação decorre da estimativa conservadora do volume nominal do *bag* indicada pelo fabricante.

- A avaliação da necessidade de construção de célula com o uso de impermeabilizante e brita;
- A elaboração de plano de monitoramento mecânico do *bag* disposto sobre o solo, associado ao plano de monitoramento físico-químico, no que tange à realização de ensaios de densidade, sólidos totais, sólidos sedimentáveis e suspensos e a granulométrica do material;
- O estudo das características do geossintético, como forma de se apurar as especificações para o tratamento dos resíduos que se pretende dispor, lançar ou descartar;
- A proposta e formulação de leis de controle ambiental que busquem e contemplem o tratamento e a disposição final dos resíduos sólidos gerados em ETAs, com valorização e recomendação da recirculação da água drenada.

O trabalho realizado e apresentado trata-se de pesquisa em escala real e insere-se em discussão pouco adiantada. A conscientização dos envolvidos na área de saneamento deve ser ponto de partida para a busca de soluções que confirmem maior proteção ao meio ambiente, sejam coerentes e economicamente viáveis.

## 6.5. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para finalizar, sugerimos o aprofundamento dos estudos envolvendo os seguintes aspectos e focos:

- A comparação do uso da tecnologia utilizando geossintético, na forma de *bag*, para o tratamento de resíduos, em especial, dos diferentes lodos gerados em estações de tratamento de água e de esgoto;
- O estudo mais acurado das especificações técnicas das malhas de geotêxteis, em função das pressões impostas e das deformações permitidas, avaliando-se o uso de geotêxtil tecido e não-tecido;

- A análise mais aprofundada do processo de desaguamento, e do próprio adensamento, através de ensaios com a bolsa, como estudo preliminar que permita a melhor compreensão do processo de retenção de contaminantes, inclusive para materiais submetidos à ação dos floculantes;
- A avaliação mais detalhada da formação do “*Filter Cake*”, considerando resíduos com diferentes percentuais de sólidos finos e a sua influência no processo de colmatção;
- A avaliação do uso do *bag* com o bombeamento, em batelada, direto por sucção de fundo do decantador, com e sem a aplicação de floculantes;
- O estudo de diferentes reusos de resíduos gerados em ETAs, e proposição de legislação que regulamente o reaproveitamento e a incorporação destes materiais ao solo ou como insumo em processos produtivos;
- O estudo das restrições para a recirculação da água drenada no processo de tratamento da água.

Por ter sido uma operação acompanhada de rigoroso controle químico e mecânico, esse estudo pode contribuir com as sugestões de estudos acima especificadas, enquanto oferece sua contribuição para o avanço de discussões e de uma alternativa tecnológica que promove a sustentabilidade dos sistemas de tratamento de água.

## REFERÊNCIAS

ALBRECHT, A.E. Disposal of alum sludges. *Journal AWWA*. Denver, v.64, n.1, jan, p. 46-52, 1972.

ABRÃO, A. J., P. C.; OLIVEIRA, S. L.. Mineração. In: OLIVEIRA, A. M.; BRITO, S. N. A. (orgs). *Geologia de Engenharia — ABGE*. Oficina de Textos, SãoPaulo, p. 432-438., 1998.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. *Water Treatment Plant Waste Management*. American Water Works Association Research Foundation: Denver, 1987.

AMERICAN STANDARD TESTING MATERIALS. ASTM D 4884: Standard Test Method for Seam Strength of Sewn Geotextiles, Estados Unidos, 1990.

\_\_\_\_\_. ASTM 1987: Standard Test Method for Biological Clogging of Geotextile or Soil/Geotextile Filters. Estados Unidos, 1991.

\_\_\_\_\_. ASTM D4355: Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles from Exposure to Ultraviolet Light and Water (Xenon Arc Type Apparatus). Estados Unidos, 1992.

AMIRTHARAJAHA, A; MILLS, K.M. Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation. *Journal AWWA*, Denver, v.74, n.4, p.210, 1982.

AMOCO FABRICS AND FIBERS COMPANY, *Stabilization - Application Guidelines*, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12824: Geotêxteis: Determinação da resistência em tração não confinada em ensaio de faixa larga*. Rio de Janeiro, 1993.

ANDREOLI, C.V, Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final, *PROSAB*, 2001.

\_\_\_\_\_. *NBR 13134: Geotêxteis: Determinação da resistência em tração não confinada em ensaio de faixa larga*. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. *NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. *NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. *NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, 2004.

BAKER, T. L. Long term relationship of outdoor exposure to xenon-arc test apparatus exposure. In: *GEOSYNTHETICS'97*, Long beach: EUA, p. 177-190, 1997.

BAES, C.F.; MESMER, R.E. *The hydrolysis of cations*. New York: John Willey and sons, 1976.

BISHOP, S.L. Alternate processes for treatment of water plant wastes. *JAWWA*. Denver, v.70, n.9, set, 1978.

BISHOP, M.M.; ROLAN, A.T.; BAILEY, T.L. et al (1987). Testing of alum recovery for solids reduction and reuse. *JAWWA*. Denver, v.79, n.6, p. 76-82, jun, 1987.

BLACK, A.P. Disposal of softening plant wastes – Committee Report. *JAWWA*. Denver, v.41, n.9, p.819, set, 1949.

BOGOSSIAN, F.; SMITH, R. T.; VERTEMATTI, J. C. E.; YAZBEK, O. Continuous retaining dikes by means of geotextiles. *2<sup>nd</sup> INT. CONF. ON GEOTEXTILES*. Las Vegas, nov., p. 211-216, 1982.

BORMA, L. S.; EHRLICH, M.; BARBOSA, M. C. Caracterização de um sedimento lagunar para efeito de dragagem e disposição em terra. *40º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL - REGEO'99*, dezembro de 1999, São José dos Campos. *Anais...* São José dos Campos: ITA, p. 275-285, 1999.

BRITISH STANDARD. *BS 8006: Code of practice for strengthened / reinforced soils and other fills*. Inglaterra — RU, 1995.

BUSCH, D. Variation of long term design strength of geosynthetics in temperature up to 40°C. *4<sup>th</sup> INTERN. CONF. ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS*, The Hague, Holanda. *Proceedings...* p. 673-676, 1990.

CARROLL, R. P. Submerged geotextile flexible forms using noncircular cylindrical shapes. *Geotechnical fabrics report. IFAI*. 12(8), p. 4-15. 1994.

CAMPOS, J. R.; DI BERNARDO, L. Ensaio de floculação. São Carlos, SHS – EESC. In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Salvador, 1975.

CASTRO, N. P. B. *Sistema Tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados*. Tese de Doutorado. Instituição Tecnológica de Aeronáutica. São José dos Campos: SP, 2005.

CHAGAS, W. F. *Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado. Fundação Oswaldo Cruz: Escola Nacional de Saúde Pública. Rio de Janeiro: RJ, 2000.

CORNWELL, D. A.; KOPPER, H. M. N. Slib, Schlamm, Sludge. *AWWA Research Foundation*, 267p, 1990.

CORDEIRO, J. S. *Noções de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Capítulo 5: Remoção de água de lodos de ETAs através de filtração forçada. Série Lodo das publicações do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PRSAB. Marco Antônio Penalva Reali (coordenador). Rio de Janeiro, 1999.

CORDEIRO, J. S. Recuperação e utilização de lodos de estações de tratamento de águas. CRHEA, São Carlos In: 9º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Belo Horizonte, jun., 1977.

CORDEIRO, J. S.; HESPANHOL, I. Reuso de lodos de ETAs. In: 11º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Fortaleza, set., 1981.

CORNWELL, D. A.; ZOLEK, J. J. Recycling of alum used for phosphorus removal in domestic wastewater treatment. *Journal WPCF*. Washington, v.49, n.4, p.600-612, 1977.

CORNWELL, D. A.; SUSAN, J. A. Characteristics of acid – treated alum sludges. *JAWWA*. Denver, v.71, n.10, p.604-608, oct., 1979.

CORNWELL, D. A. An overview of liquid ion exchange with emphasis on alum recovery. *JAWWA*. Denver, v.71, n.12, p. 741-744, dec., 1979.

CORNWELL, D.A.; EMUNYON, R. M. (1980) Feasibility studies on liquid ion exchange for alum recovery from water treatment plant sludges. *JAWWA*. Denver, v.72, n.1, p. 64-68, jan., 1980.

CORNWELL, D.A.; BISHOP, M. M.; GOUD, R.G et al. Handbook water treatment plant waste management. *AWWA Research Foundation*. Denver, 431p, 1987.

CORNWELL, D. A.; KOPPER, H. M. N. Slib, schlamm, sludge. *AWWA Research Foundation*. 267 p., 1990.

DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. *Rima*. Vol. 1 e 2, 2005.

DI BERNARDO, L.; MENDES, C. G. N.; GUIMARÃES, A. F. Coagulação-floculação de águas com turbidez ou cor elevada. *REVISTA DAE*. São Paulo, v.47, n.150, p.227-239, dez., 1987.

DRISCOLL Jr., C. T.; LETTERMAN, R. D.; FITCH, D. E. Residual aluminum in filtered water. *AWWA*. Denver, 71p., 1987.

DRISCOLL Jr., C.T.; LETTERMAN, R. D. Chemistry and fate of Al (III) in treated drinking water. *Journal of Environmental Engineering – ASCE*. New York, v.114, n.1, p.21-37, fev., 1988.

ELLIOT, H. A.; DEMPSEY, B. A.; HAMILTON, D. W. et al. Land application of water treatment sludges: impact and management. *AWWA Research Foundation*. Denver. 99p., 1990.

FARRELL, J. B.; SMITH Jr., J. E.; DEAN, R. B. et al. Natural freezing for dewatering of aluminum hydroxide sludges. *JAWWA*. Denver, v.62, n.12, p.787-91, dez., 1970.

CRABTREE, B.; BAGBBY, R.M.; TRAINER, E. Dewatering sewage sludge and hazardous sludge with geotextile tubes. *GEOSYNTHETICS – 7<sup>TH</sup> IGG*, 2002. Nice. *Anais...* p.1007-1012, 2002.

GAFFNEY, D. A., et al. *Dewatering contaminated, fine-grained material using geotextiles*. SI Geosolutions, 1999.

GAFFNEY, D. A.; Moo-Young, H. K. *Dewaterin highly organic, fine-grained dredge material using geotextile tubes*. Nota técnica. SI Geosolutions, ago., 2000.

GEORGE, D. B.; BERK, S.G.; ADAMS, V.D. et al. Alum sludge in the aquatic environment. *AWWA Research Foundation*. Denver. 155p., 1991.

GOURC, J. P. *Quelques aspects du comportement des géotextiles en mécanique des sois*. Tese de Doutorado. Université Joseph Fourier, Grenoble, França, 1982.

GREENWOOD, J. H. The creep of geotextiles. 4<sup>TH</sup> INTERN. CONF. ON GEOIEXIILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. Hague, Holanda. *Anais...* p. 645-650, 1990.

HERILE, A. R. H.; NORRISH, A. M. *Sludge ponds versus mechanical dewatering for a wastewater treatment plant with biological phosphorus removal*.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). *Report of the nineteenth consultative meeting of contracting parties to the convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter*. Marine Division, Londres, Reino Unido, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10319: Geotextiles and geotextiles related products – wide-width tensile test*. 1993.

\_\_\_\_\_. *ISO 10321: Geotextiles and geotextiles related products — tensile tests for joints/seams by wide-width method*. 1993.

\_\_\_\_\_. *ISO 11058: Geotextiles and geotextiles related products — Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load*. 1999.

\_\_\_\_\_. *ISO 13431: Geotextiles and geotextiles related products — determination of tensile creep and creep rupture behavior*. 1998. 16p.

\_\_\_\_\_. *ISO 12956: Geotextiles and geotextiles related products — determination of the characteristics opening size*. 1999.

\_\_\_\_\_. *ISO / EN 13434: Geotextiles and geotextiles related products — guidelines on durability*. Relatório Técnico. 1998. 34 p.

\_\_\_\_\_. *ISO / TR 10722 - 1: Geotextiles and geotextile-related products — procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular materials*. Relatório Técnico. 1998, 7 p.

JAMES, C. R.; OMELIA, C. R. Considering sludge production in the selection of coagulents *JAWWA*. Denver, v.74, n.3, mar., 1982. p.148-151.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A.. *Tratamento de esgoto doméstico*. Rio de Janeiro, Brasil, 1975. Capítulo 10, p. 185-203.

KAZIMIEROWICZ, K. Simple Analysis of Deformation of Sand-Sausages. In: 5<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILE, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. Singapore. *Anais...* 1994. p. 775-778.

KOERNER, R. M. *Design with geosynthetics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1998.

LAFLEUR, J. Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils, *Geotextiles & Geomembranes*, v. 17, 1999. p.299-312.

LANGENHOVE, L. V. Conclusions of an extensive BRITE-research program on ageing. In: IV INT. CONF. ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. Hauge, Holanda, Balkerna, 1990. p. 703-707.

LESHCHINSKY, D.; LESHCHINSKY, O. Geosynthetic Confined Pressurized Slurry (GeoCoPS): Supplementa! Notes. *Technical Report CPAR-GL-96- 1*. Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, 1996. 54 p.

\_\_\_\_\_. ADAMA Engineering, mc.. *GeoCoPS (2.0): Supplementa! Notes*, 2002.

LESHCHINSKY, D. Issues in geosynthetic-reinforced soil. In: INT. SYMP. ON EARTH REINFORCED PRACTICE. Kyushu, Japan. Balkerna, Rotterdam. *Anais...* 1992. pp. 871-897.

LIU, G.S. Design criteria of sand sausages for beach defences. 19<sup>TH</sup> CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH. 1981. New Delhi, India. Subject B (b), Paper n<sup>o</sup>6. *Anais...* 1981. p. 123-131.

LONGSDON, G. S.; EDGERLEY Jr. E. Sludge dewatering by freezing – Part.1. *JAWWA*. Denver, v.63, n.11, p.734-40, nov. 1971.

MEURER, E. J. *Fundamentos de Química do solo*. Gênese, 2000.

MOO-YOIJNG, H. K.; TUCKER, W. R. Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes. *Geotextiles and Geomembranes*. v. 20, p. 191-212, 2002.

MOO-YOIJNG, H. K.; GAFFNEY, D. A.; MO, X. Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 20, p. 289-303, 2002.

MORI, H.; MIM, H. E.; TSIINEOKA, N. The use of geo-tube method to retard the migration of contaminants in dredge soil. *GEOSYNTHETICS - 7<sup>TH</sup> ICG*, 2002, Nice. *Anais...* 2002. p. 1017-1020.

NETZSCH. Disponível em: <<http://www.netzsch.com.br/filtros/download/it0009.pdf>>. Acesso em: 5 de março de 2005, 14h e 25min.

OBLADEN, N. L. *Aterro Sanitário para Resíduos Sólidos Urbanos*. Programa de Treinamento Novas Tendências Profissionais. Federação das Associações de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Estado do Paraná — FEAPAR, Paraná: Curitiba, 2004.

PALMEIRA, E. M.; FANNIN, R. J. Abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob confinamento. XI CONG. BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Brasília. *Anais...* 1998, p. 657-659.

PAGLIARDINI, A.; PEREZ, J. J.; RANDON, G. et al. *Mesure automatisée de l'alars lês eaux. Techniques Science Methodes – L'eau*. Paris, fev., 1988. p. 99-107.

PROGRAMA de Produção Limpa. Departamento de Engenharia de Produção & Fundação Vanzolini, Escola Politécnica USP, novembro de 1998, São Paulo.

PILARCZYK, K. W. *Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering*. ISBN-9058093026. Balkema, 2000.

REALI, M. A.; PATRIZZI, L. J.; CORDEIRO, J. S. *Noções de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. 4. Desidratação de lodo por centrifugação. Série Lodo das publicações do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico — PRSAB. Marco Antônio Penalva Reali (coordenador). Rio de Janeiro, 1999.

RITCHIE, A. M. Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport. MAC short course handbook. Waterloo, Ontario, Canadá: Jambor, J. L. & D. W. Blowes, v. 22, mai., 1994. p. 201-246..

RICHTER, C. A. Tratamento de Água – Tecnologia atualizada, EDGARD BLÜCHER LTDA, 2002, p. 86-115.

ROCHHOLZ, J. M.; KIRSHNER, R. Creep of geotextiles at different temperatures. In: 4TH INTERN. CONF. ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS. Hague, Holanda, 1990. p. 657-659.

ROBERTO, S.; ABREU, R. M. Utilidade dos indicadores de qualidade das águas. *Revista Ambiente*, São Paulo, v.5, n.1, 1991. p.74-51.

RUSSEL, J. B. *Química Geral*. 2º ed, Pearson Education do Brasil, 1994.

SALMAN, A. et al. Durability of geosynthetics based on accelerated laboratory testing. GEOSYNTHETICS'97. 1997, Long Beach, EUA. *Proceedings...* p. 217-234.

SALMAN, A.; ELIAS, V.; DIMILLIO, A. The effect of oxygen pressure, temperature and manufacturing processes on laboratory degradation of polypropylene geosynthetics. 6<sup>TH</sup> INT. CONF. ON GEOSYNTHETICS. 1998, Atlanta, EUA, p. 683-690.

SILVEIRA, A. An analysis of the problem of washing through in protective filters. In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. 1965. Montreal, Canadá. p.SS1-SSS.

SILVESTER, R. Use of grout-filled sausages in coastal structures. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, ASCE. 112 (1), pp. 95-114.

\_\_\_\_\_. Flexible membrane units for breakwaters. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. John B. Herbich., Vol. 1, 1990. p. 921-938.

SYNTHETICS INDUSTRIES COMPANY. *Geotextile tubes for industrial /agricultural dewatering*. 2003.

TRESSOLDI, M.. Disposição de Resíduos. In: OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S.. N. A. (orgs). *Geologia de Engenharia — ABGE*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 1998. p. 333-360.

U.S. ARMY OPERATIONS SUPPORT COMMAND. U.S. Army Attributes Success of Dredging Clean-Up Project to “Innovative Technology”, New Mud Cat TM MC-2000 Auger Dredge Used, By Gale Smith. Disponível em: <http://www.inudcat.com/environmentallusarmy-success-1.htm>. Acesso em: 30 de março de 2003.

URASHIMA, D. C. *Dimensionamento de Filtros Têxteis por teoria Probabilística*. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos: SP, 1996.

URASHIMA, D.; VIDAL, D.; BENARDES, G. Abertura de filtração de geotêxteis: Determinação das características do produto e critérios de dimensionamento. In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. Rio de Janeiro, 1999.

VIDAL, D.; RIGHETTI, C. C. Propriedades hidráulicas dos geotêxteis. VI CBGE / XI COBRAMSEF. 1990, Salvador. *Anais...* p.33-44.

VIDAL, D.; VIEIRA, B. M.; MELLO, J. L. Metodologia para análise da durabilidade de geossintéticos frente a agentes químicos. II SIMPÓSIO DE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS. Nov. 1991, Rio de Janeiro. *Anais...* p. 295-304.

THOMAS, C. M. (1971) The use of filter press for the dewatering of sludges. *JWPCF*. Washington, v.43, n.1, jan., 1991. p.93-101.

VIDAL, W. L.; PEREIRA, P. C. G. *Avaliação e tratamento dos lodos das ETAs de Piracicaba*. CETESB: São Paulo. Nov, 1990. 34 p.

YOUNG, E. F. Water treatment plant sludge disposal practices in the United Kingdom. *JAWWA*. Denver. v. 60, n.6, p.717-732, jun. 1968.

VIDAL, D.; FABRIN, T. W.; MONTEZ, F. T. O conceito de fatores de redução aplicados às propriedades dos geossintéticos. In: GEOSSINTÉTICOS'99. Out., 1999, Rio de Janeiro.

VIDAL, D.; URASHIMA, D. C. Dimensionamento de filtros e drenos em geossintéticos. In: GEOSSINTÉTICOS'99. Out., 1999, Rio de Janeiro.

VIDAL, D. Aplicações Especiais de Geossintéticos. In: 40 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. Porto Alegre, 2003.

WATTS, R. J. *Hazardous Wastes: Sources, Pathways, Receptors*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

## **ANEXO**