

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

ESTUDO DE INFLUÊNCIA DE COBERTURA PLÁSTICA NA REMOÇÃO DE  
ÁGUA DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM  
LEITOS DE DRENAGEM

RENAN FELICIO DOS REIS

São Carlos

2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

ESTUDO DE INFLUÊNCIA DE COBERTURA PLÁSTICA NA REMOÇÃO DE  
ÁGUA DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM  
LEITOS DE DRENAGEM

RENAN FELICIO DOS REIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. João Sergio Cordeiro

São Carlos

2011

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

R375ei

Reis, Renan Felicio dos.

Estudo de influência de cobertura plástica na remoção de água de lodos de estações de tratamento de água em leitos de drenagem / Renan Felicio dos Reis. -- São Carlos : UFSCar, 2011.

131 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Engenharia urbana. 2. Lodo. 3. Estação de tratamento de água. 4. Leito de drenagem. 5. Mantas geotêxteis. 6. Polímero catiônico. I. Título.

CDD: 711 (20<sup>a</sup>)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

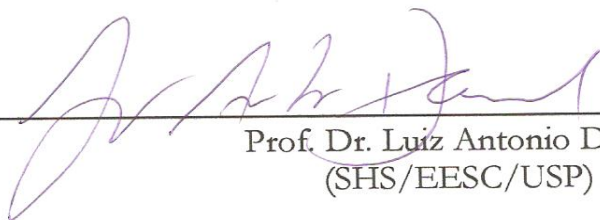
RENAN FELICIO DOS REIS

Dissertação defendida e aprovada em 23 de março de 2011.  
pela Comissão Julgadora



---

Prof. Dr. João Sergio Cordeiro  
Orientador (DECiv/UFSCar)



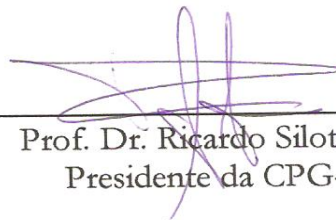
---

Prof. Dr. Luiz Antonio Daniel  
(SHS/EESC/USP)



---

Prof. Dr. Cali Laguna Achon  
(DECiv/UFSCar)



---

Prof. Dr. Ricardo Siloto da Silva  
Presidente da CPG-EU

## ***O Ciclo da Água***

*É a água indo rio a fora  
Deslizando a caminho do mar  
É o mar se revigorando  
Com este eterno receber*

*Sufrerá as influências  
Da nossa lua, das estrelas  
E principalmente o calor  
Do nosso sol - o astro-rei.*

*Evaporarão aos ares  
Formando belas nuvens  
E no ballet e nas brisas,  
Dos travessos ventos,  
Voltarão à terra*

*Desaguarão em chuvas  
Irigarão vales e montanhas  
Infiltrarão-se em todos meandros  
Que matarão a sede das aves,  
Do ser humano e de todos os animais.*

*Renovarão todas as florestas  
Farão florir todas as flores,  
Manterão todas as árvores  
Que nos darão todos os frutos*

*Germinarão novas sementes  
Renovando tudo, escorando a vida.  
Trarão muita benção e alegria  
E voltarão aos rios*

*Que voltarão aos mares  
Seguindo os seus leitos  
Que gerarão as novas nuvens  
Que as devolverão limpas*

*É o ciclo da água  
Do nosso judiado planeta  
Que está chegando  
Ao seu esgotamento.*

*Quanta alegria pelos nossos rios,  
Mas também quanta tristeza.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus por ser presente em cada instante de minha vida, me fazendo compreender, esperar, lutar, perseverar, superar, crescer e agradecer em meio a situações positivas e negativas.

À minha mãe, Vanda (*in memoriam*), por ter sido uma educadora com grande diferencial e excelência na arte de ensinar, que sempre observou os mínimos detalhes em meus passos para o desenvolvimento intelectual, sendo minha mãe, minha mestra, meu exemplo de vida.

Ao meu pai, Osvaldo, pela prestatividade inigualável, amor, carinho, paciência, confiança e incentivo. À sua mulher, Ruth, que sem dúvida faz parte de minhas conquistas, sempre demonstrando torcida, incentivo e amor.

À minha noiva, Miriã, que além do seu admirável jeito meigo de ser, acredita, me incentiva e é meu braço direito em tudo.

Ao meu irmão, Deyvison, de quem muito me orgulho e que sempre será exemplo de persistência e conquista para mim. À minha cunhada, Joana, por sempre ser tão próxima e muito me agradar com sua dedicação à família.

Ao meu tio Marcelo Mizuno, minha tia Vanderlice Mizuno e meus primos Lucas e Rafael, por serem minha família, meus aconselhadores e parceiros durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo, professor e orientador Dr. João Sergio Cordeiro, pelos ensinamentos, paciência e confiança que demonstrou durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao corpo docente do PPGEU/UFSCar que muito contribuiu para meu crescimento intelectual e desenvolvimento da capacidade de pensar, criticar e agir.

À Patrícia, técnica responsável pelo laboratório de Saneamento da UFSCar, pela ajuda, comprometimento e confiança na realização das análises laboratoriais.

Aos funcionários do SAAE (ETA – São Carlos), por toda contribuição, paciência, disposição e amizade que demonstraram em relação ao desenvolvimento do presente trabalho e a mim.

Aos amigos do PPGEU/UFSCar pela confiança, ajuda, comprometimento e torcida.

Aos amigos que fiz na igreja Sara Nossa Terra de São Carlos que, sem dúvida, são amigos iguais ou mais próximos que irmão.

A todos meus familiares, amigos e colegas que me incentivaram e apoiaram nos momentos de alegria e tristeza vividos.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e à Sônia pela ajuda, paciência, apoio e auxílios confiados a mim para desenvolver esta pesquisa e crescer em experiência e conhecimento.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão das bolsas e apoio financeiro para realização desta pesquisa.

## RESUMO

A maior parte das Estações de Tratamento de Água (ETAs) para abastecimento existente no Brasil se utiliza de captação de águas superficiais e sistema de tratamento de ciclo completo convencional. Neste tratamento são retidos/gerados resíduos que variam principalmente segundo o tipo e quantidade de produto químico adicionado e as características do manancial de captação. Estes resíduos são encontrados principalmente nos decantadores (lodo) e na água de lavagem dos filtros (ALF) das ETAs. Infelizmente, a maioria das ETAs brasileiras lança seus resíduos diretamente em corpos d'água, infringindo disposições da Lei 9.605/98. Existem tecnologias mecanizadas e naturais para remoção de água dos resíduos retidos no tratamento. Uma vez que possuem característica fluida, foram desenvolvidas algumas tecnologias para remoção de suas águas. Uma tecnologia natural para remoção de águas de resíduos de ETAs é o leito de drenagem, desenvolvido e proposto por Cordeiro (2001). O leito de drenagem possui basicamente duas etapas envolvidas: drenagem e evaporação. Esta pesquisa apresenta resultados de um estudo, cujo objetivo central foi alcançar melhorias na remoção da água de lodo retido nos decantadores através da utilização de cobertura plástica no leito de drenagem (etapa de evaporação). Resultados obtidos nesta pesquisa para ensaios realizados em protótipos de leitos de drenagem instalados na ETA de São Carlos-SP demonstraram que, quando se utiliza cobertura plástica (referência comercial PVC 0,30 mm), o processo de evaporação da água presente no lodo é acelerado e a ocorrência de precipitação não interfere em momento algum na remoção de água do lodo. A altura da cobertura em relação ao protótipo que apresentou os melhores resultados foi de 0,20 m, permitindo-se obter um lodo final até 56% mais "seco" que na ausência de cobertura. Ensaios realizados em escala laboratorial para condicionamento prévio do lodo bruto com polímero catiônico apresentaram resultados promissores para sua utilização em maior escala, duplicando a eficiência da drenagem inicial do lodo. Entretanto, outros ensaios laboratoriais com mantas geotêxteis de características distintas apenas confirmaram a superioridade da utilização de manta do tipo tecida de densidade superficial 600g/m<sup>2</sup> (que já havia sido utilizada em outras pesquisas) em relação às demais, no que se refere à obtenção de melhor eficiência na drenagem inicial da água presente no lodo bruto.

**Palavras-chave:** Lodo de Estação de Tratamento de Água, Leito de Drenagem, Remoção de Água, Cobertura Plástica, Mantas Geotêxteis, Polímero Catiônico.



## **ABSTRACT**

Most of Water Treatment Plant (WTP) for public supply in Brazil use surface water as source and conventional complete cycle as treatment system. In this type of treatment wastewater are restrained/generated which vary mainly according to the type and amount of chemical added and the characteristics of the water resource. This wastewater is found mainly in clarifiers (sludge) and backwash water filter (BWF) from WTP. Unfortunately, most of Brazilian WTP launches its waste directly into water resources, violating Brazilian Law 9605 published in 1998. There are mechanical and natural technologies for water removal from wastewater restrained during the treatment. Once known that wastewater from WTP has fluid characteristic, some technologies to remove its water have been developed. A natural one is the drainage bed, developed and proposed by Cordeiro (2001). The drainage bed has basically two stages: drainage and evaporation. This dissertation presents results of a study, whose centre objective was to achieve improvements in water sludge removal restrained in clarifiers by the use of plastic cover (evaporation stage). Results of effective tests in prototypes located in Sao Carlos WTP (Sao Paulo State) with plastic cover have showed that, when this roof (commercial reference PVC 0.30 milimeters) is used, it accelerates the evaporation process, and protects sludge from rain. The height of the roof that presented the best result was 0.20 meters in relation to the board of prototype, realizing to obtain a sludge 56% dryer than in tests without the roof. Preliminary tests in laboratory scale generated a promising scenario for the use of cationic polymer in large scale doubling the efficiency of the initial drainage of sludge. However, other laboratory tests with different characteristics of geotextile blanket only confirmed the superiority of using woven blanket type with surface density of 600 g/m<sup>2</sup> (which had already been used in other studies), compared to the others, in reference to obtain better efficiency at the initial drainage of water present in raw sludge.

**Key-words:** Sludge from Water Treatment Plant, Drainage Bed, Dewatering, Plastic Roof, Geotextile Blanket, Cationic Polymer.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> – Representação das principais tipologias de tratamento de água.....	23
<b>Figura 3.2</b> – Representação ilustrativa de classificação de águas presentes em lodos de ETAs.....	27
<b>Figura 3.3</b> – Ilustração esquemática de energia requerida ( $*E_i$ ) para remoção dos diferentes volumes de frações de água constituintes de lodo de ETAs. ....	28
<b>Figura 3.4</b> – Aumento na adição de produtos químicos (P.Q.) e, possivelmente, quantidade proporcional de resíduos (lodo).....	31
<b>Figura 3.5</b> – Formas de redução de volume de resíduo de ETA.....	39
<b>Figura 3.6</b> – Sistemas naturais para desaguamento de lodo: (a) leito de drenagem, ETA de Cardoso (SP); (b) leito de secagem, ETE de São Domingos das Dores (MG); (c) leito solar coberto, series HELIOBOLT ®, ESTRUAGUA Technology For Life, Espanha; (d) lagoa de lodo, ETA de Rio Claro (SP); (e) Bags, ETE de Presidente Prudente (SP).....	42
<b>Figura 3.7</b> – Sistemas mecânicos para desaguamento de lodo: (a) filtro-prensa em operação – São Bernardo do Campo (SP); (b) prensa desaguadora, VLC Indústria e Comércio Ltda.; (c) Centrífuga, ETE de Araçatuba (SP) – DAEA; (d) filtro à vácuo, MAUSA S/A; (e) contipress, M-TEC CONTIPRESS.....	43
<b>Figura 3.8</b> – Representação esquemática de leito de secagem (corte).....	44
<b>Figura 3.9</b> – Leitos de secagem – ETA de Nova Odessa-SP.....	46
<b>Figura 3.10</b> – Mecanismos de remoção de água em lagoas.....	47
<b>Figura 3.11</b> – Lagoa de lodo da ETA de Rio Claro-SP, após 45 dias do despejo.....	49
<b>Figura 3.12</b> – Bags instalados na ETA Curitibanos-SC.....	50
<b>Figura 3.13</b> – Bag instalado na ETA Santo Antônio do Jardim-SP.....	50
<b>Figura 3.14</b> – Bags ETE de Presidente Prudente-SP.....	51
<b>Figura 3.15</b> – Bags após despejo de lodo bruto ( ETA de Nova Odessa-SP).....	52
<b>Figura 3.16</b> – Bags preparados para receber novo despejo de lodo bruto (ETA de Nova Odessa-SP).....	52
<b>Figura 3.17</b> – Esquemas ilustrativos dos sistemas de leitos de secagem tradicionais e modificados por Cordeiro (1993) e (2000).....	54

---

<b>Figura 3.18</b> – Curvas de remoção de água de sistema modificado por Cordeiro (1993) e remodelado em 2000. ....	54
<b>Figura 3.19</b> – Protótipo leito de drenagem – Vista frontal.....	55
<b>Figura 3.20</b> – Protótipo leito de drenagem. ....	55
<b>Figura 3.21</b> – Planta baixa do protótipo leito de drenagem. ....	56
<b>Figura 3.22</b> – Vista perspectiva do protótipo leito de drenagem.....	56
<b>Figura 3.23</b> – Planta dos módulos do leito de drenagem.....	57
<b>Figura 3.24</b> – Corte da estrutura do leito de drenagem.....	57
<b>Figura 3.25</b> – Leito de drenagem construído na ETA-Cardoso. Sequência ilustrando (a) o despejo do lodo no leito; (b) a água livre drenada; (c) o lodo “seco”. ....	59
<b>Figura 3.26</b> – ETA Guanhães: (a) despejo de lodo em leito de drenagem; (b) leito de drenagem com lodo bruto; (c) remoção de lodo desaguado; (d) leito de drenagem pronto para receber novo despejo. ....	61
<b>Figura 3.27</b> – Leito de drenagem ETA Guaíra: (a) disposição da manta geotêxtil; (b) leitos cheios; (c) leito de drenagem com lodo desaguado; (d) lodo “seco”. ....	63
<b>Figura 3.28</b> – Disposição do lodo de ETE em leiras de compostagem. ....	65
<b>Figura 3.29</b> – Interior do leito de secagem coberto da ETE São Luiz do Paraitinga. ....	66
<b>Figura 3.30</b> – Leitos de secagem cobertos (ETE São Luiz do Paraitinga).....	66
<b>Figura 3.31</b> – Leito de secagem coberto (ETE Embaú). ....	67
<b>Figura 3.32</b> – Frente: bloco cerâmico sem adição de lodo; fundo: bloco cerâmico com adição de lodo da ETA de Nova Odessa-SP. ....	69
<b>Figura 3.33</b> – Esquema simplificado ilustrando a cobertura com renovação de ar ilimitada em leito de secagem tradicional. ....	71
<b>Figura 3.34</b> – Esquema simplificado ilustrando a cobertura com renovação de ar limitada em leito de secagem tradicional. ....	71
<b>Figura 3.35</b> – Esquema de funcionamento de desaguamento de lodo em estufas.....	74
<b>Figura 3.36</b> – Esquema de funcionamento de desaguamento de lodo em estufas.....	75
<b>Figura 3.37</b> – Resultado da ação do jato de água sobre as mantas de pequena espessura: (a) manta OP-15; (b) manta OP-20.....	78
<b>Figura 3.38</b> – Resultado da ação do jato de água sobre as mantas de grande espessura: (a) manta OP-30; (b) manta OP-60.....	79

---

<b>Figura 4.1</b> – Protótipo de leito de drenagem. ....	82
<b>Figura 4.2</b> – Minileito de drenagem. ....	83
<b>Figura 4.3</b> – Fluxograma resumido dos métodos de pesquisa. ....	84
<b>Figura 4.4</b> – Esquema representativo dos ensaios com polímero catiônico. ....	86
<b>Figura 4.5</b> – Etapas de ensaio com polímero catiônico: (a) preparação de solução e mistura com lodo bruto; (b) despejo no minileito de drenagem; (c) drenagem da água livre; (d) amostras de água drenada. ....	87
<b>Figura 4.6</b> – Esquema representativo dos ensaios com mantas geotêxteis. ....	89
<b>Figura 4.7</b> – Mantas geotêxteis utilizadas nos ensaios em minileito de drenagem: (a) não-tecida 150 g/m <sup>2</sup> ; (b) não-tecida 200 g/m <sup>2</sup> ; (c) não-tecida 300 g/m <sup>2</sup> ; (d) não-tecida 400 g/m <sup>2</sup> ; (e) tecida 600 g/m <sup>2</sup> . ....	90
<b>Figura 4.8</b> – Protótipo de leito de drenagem utilizado nos ensaios. ....	91
<b>Figura 4.9</b> – Esquema representativo do protótipo de leito de drenagem utilizado nos ensaios. ....	92
<b>Figura 4.10</b> – Protótipo de leito de drenagem com cobertura plástica e ajuste de altura utilizado nos ensaios. ....	93
<b>Figura 4.11</b> – Esquema representativo do protótipo de leito de drenagem com cobertura plástica e ajuste de altura utilizado nos ensaios. ....	94
<b>Figura 4.12</b> – Sistema sifão para coleta de lodo bruto: decantador, à direita; coleta, à esquerda. ....	94
<b>Figura 4.13</b> – Localização dos protótipos de leito de drenagem na ETA de São Carlos-SP. ....	95
<b>Figura 4.14</b> – Drenagem inicial do lodo bruto de decantador coletado. ....	96
<b>Figura 5.1</b> – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 2,5 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados. ....	100
<b>Figura 5.2</b> – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 5,0 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados. ....	100

- 
- Figura 5.3** – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 7,5 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados..... 101
- Figura 5.4** – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 10,0 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados..... 101
- Figura 5.5** – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 15,0 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados..... 102
- Figura 5.6** – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 20,0 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados..... 102
- Figura 5.7** – Comparação entre resultados sem e com polímero catiônico para a amostra 2,5 em concentração 0,25% e diferentes volumes de solução de polímero adicionado..... 103
- Figura 5.8** – Comparativo entre volumes drenados no 1º e 2º ensaios (1,0 e 1,5 min.) com uso de diferentes mantas geotêxteis. .... 106
- Figura 5.9** – Comparativo entre valores de cor obtidos nos volumes drenados no 1º ensaios (1,0 min.) com uso de diferentes mantas geotêxteis. .... 106
- Figura 5.10** – Comparativo entre valores de turbidez obtidos nos volumes drenados no 1º ensaios (1,0 min.) com uso de diferentes mantas geotêxteis..... 107
- Figura 5.11** – Degradabilidade das mantas geotêxteis: (a) não-tecida 150 g/m<sup>2</sup>; (b) não-tecida 200 g/m<sup>2</sup>; (c) não-tecida 300 g/m<sup>2</sup>; (d) não-tecida 400 g/m<sup>2</sup>; (e) tecida 600 g/m<sup>2</sup>.  
..... 108
- Figura 5.12** – Ensaio 01 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,20 m) e sem cobertura. .... 115
- Figura 5.13** – Ensaio 02 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,30 m) e sem cobertura. .... 115
- Figura 5.14** – Ensaio 03 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,40 m) e sem cobertura. .... 116

---

<b>Figura 5.15</b> – Ensaio 04 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,50 m) e sem cobertura. ....	116
<b>Figura 5.16</b> – Ensaio 05 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,60 m) e sem cobertura. ....	117
<b>Figura 5.17</b> – Ensaio 06 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,20 m) e sem cobertura. ....	117
<b>Figura 5.18</b> – Ensaio 01 - Despejo de lodo no protótipo de leito de drenagem. ....	118
<b>Figura 5.19</b> – Ensaio 01 - Um dia após do despejo de lodo no protótipo com cobertura a 0,20 m de altura. ....	118
<b>Figura 5.20</b> – Ensaio 01 - Lodo desaguado no leito de drenagem com cobertura (0,20 m de altura), sete dias após o despejo inicial. ....	119
<b>Figura 5.21</b> – Ensaio 01 - Lodo desaguado no leito de drenagem sem cobertura, sete dias após o despejo inicial.....	119

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

<b>Quadro 3.1</b> – Legislações vigentes sobre resíduos de ETAs.....	35
<b>Quadro 3.2</b> – Vantagens e desvantagens do uso de leitos de secagem. ....	45
<b>Tabela 3.1</b> – Características dos lodos gerados em ETAs. ....	36
<b>Tabela 3.2</b> – Características dos resíduos de decantadores de diferentes ETAs do Estado de São Paulo.....	37
<b>Tabela 3.3</b> – Características do lodo de decantador e drenado do leito de drenagem de resíduos da ETA Cardoso. ....	58
<b>Tabela 3.4</b> – Características do lodo de decantador da ETA Cardoso e do drenado resultante da aplicação no protótipo leito de drenagem.....	58
<b>Tabela 3.5</b> – Características da manta geotêxtil utilizada. ....	77
<b>Tabela 3.6</b> – Características das mantas geotêxteis tecidas utilizadas nos ensaios. ....	78
<b>Tabela 5.1</b> – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 2,5 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero.....	98
<b>Tabela 5.2</b> – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 5,0 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero. ....	98
<b>Tabela 5.3</b> – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 7,5 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero. ....	99
<b>Tabela 5.4</b> – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 10,0 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero. ....	99
<b>Tabela 5.5</b> – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 15,0 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero. ....	99
<b>Tabela 5.6</b> – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 20,0 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero. ....	99
<b>Tabela 5.7</b> – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil verde, não-tecida, 150 g/m <sup>2</sup> .....	104
<b>Tabela 5.8</b> – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil cinza, não-tecida, 200 g/m <sup>2</sup> .....	104
<b>Tabela 5.9</b> – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil marrom, não-tecida, 300 g/m <sup>2</sup> .....	105

---

<b>Tabela 5.10</b> – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil verde, não-tecida, 400 g/m <sup>2</sup> .....	105
<b>Tabela 5.11</b> – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil cinza, tecida, 600 g/m <sup>2</sup> .....	105
<b>Tabela 5.12</b> – Análises do lodo bruto e da água drenada em cada ensaio (E), variando a altura da cobertura plástica em relação à borda do protótipo de leito de drenagem. ....	109
<b>Tabela 5.13</b> – Análises de metais da amostra da pesquisa e da água bruta da ETA. .	110
<b>Tabela 5.14</b> – Análises diárias de Sólidos Totais por leito de drenagem e por ensaio.	111
<b>Tabela 5.15</b> – Dados climáticos médios diários por ensaio. ....	113



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ALF	Água de lavagem de filtro
AT	Água Tratada
AWWA	American Water Works Association
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAAE	Departamento Autônomo de Água e Esgotos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DEAGUA	Departamento de Esgoto e Água de Guaíra
DECiv	Departamento de Engenharia Civil (UFSCar)
DQO	Demanda Química de Oxigênio
E-01	Ensaio Efetivo 01
E-02	Ensaio Efetivo 02
E-03	Ensaio Efetivo 03
E-04	Ensaio Efetivo 04
E-05	Ensaio Efetivo 05
E-06	Ensaio Efetivo 06
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
NBR	Denominação de Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas
PQ	Produtos Químicos
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
PVC	Cloreto de Polivinila
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
SDF	Sólidos Dissolvidos Fixos
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SDV	Sólidos Dissolvidos Voláteis

SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
uC	Unidade de Cor
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
uT	Unidade de Turbidez

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>21</b>
<b>3. EMBASAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs) .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2. ORIGEM, CARACTERÍSTICAS E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETAs.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3. GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA ....</b>	<b>30</b>
<b>3.4. ASPECTOS LEGAIS SOBRE RESÍDUOS DE ETAs E SUA DISPOSIÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>3.5. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS DE ETAs, SEUS IMPACTOS AO MEIO AMBIENTE E TOXICIDADE .....</b>	<b>35</b>
<b>3.6. MÉTODOS DE DESAGUAMENTO DOS RESÍDUOS DE ETAs .....</b>	<b>39</b>
<b>3.7. SISTEMAS NATURAIS.....</b>	<b>43</b>
3.7.1 Leito de secagem.....	43
3.7.2 Lagoas de lodo .....	46
3.7.3 “Bags” .....	49
3.7.4 Leito de drenagem.....	53
3.7.4.1 Experiências de implantação de leito de drenagem em escala real.....	56
3.7.4.1.1 ETA Cardoso-SP .....	56
3.7.4.1.2 ETA Guanhães-MG .....	59
3.7.4.1.3 ETA Guáira-SP.....	61
<b>3.8. DESAGUAMENTO DE LODO POR SISTEMA COBERTO .....</b>	<b>64</b>
<b>3.9. ALTERNATIVAS DE DESTINAÇÃO FINAL DE LODOS DE ETAs.....</b>	<b>67</b>
<b>3.10. COBERTURAS PLÁSTICAS.....</b>	<b>70</b>
<b>3.11. MANTAS GEOTÊXTEIS .....</b>	<b>76</b>
<b>3.12. UTILIZAÇÃO DE POLÍMEROS PARA CONDICIONAMENTO/ADENSAMENTO DE RESÍDUOS DE ETAs.....</b>	<b>79</b>
<b>3.13. ANÁLISE CRÍTICA DA BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>80</b>

---

<b>4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>82</b>
<b>4.1. MATERIAIS NECESSÁRIOS .....</b>	<b>82</b>
<b>4.2. MÉTODOS.....</b>	<b>83</b>
4.2.1 Métodos para ensaios preliminares (etapa de drenagem) .....	84
4.2.2 Métodos para ensaios efetivos (etapa de evaporação e drenagem) .....	90
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>98</b>
<b>5.1. INTERVENÇÕES NA ETAPA DE DRENAGEM DO LEITO DE DRENAGEM (ENSAIOS PRELIMINARES).....</b>	<b>98</b>
5.1.1. Ensaios com polímero catiônico.....	98
5.1.2. Ensaios com mantas geotêxteis.....	104
<b>5.2. INTERVENÇÕES NA ETAPA DE EVAPORAÇÃO DO LEITO DE DRENAGEM (ENSAIOS EFETIVOS) .....</b>	<b>108</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>120</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>122</b>
<b>8. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>124</b>
<b>9. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>130</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Os sistemas de tratamento de água para abastecimento público no Brasil, na sua grande maioria, utilizam captação de águas superficiais. Para que ocorra o tratamento da água captada em um manancial, alguns procedimentos devem ser seguidos. Em geral, os procedimentos de tratamento em Estações de Tratamento de Água (ETAs) de ciclo completo são compostos de etapas conhecidas como coagulação, floculação, decantação ou flotação e filtração. Para que ocorra a coagulação e posterior floculação, produtos químicos (sais de ferro e de alumínio, cal, cloro, polímeros, entre outros) são adicionados à água bruta, facilitando as etapas posteriores. Nos decantadores, parte das partículas presentes sedimenta-se, resultando em água mais clarificada na camada superior do tanque. Após isso, nos filtros, ocorre a remoção de impurezas menores, permitindo que se atinja um resultado de água com qualidade tal que, para que ocorra sua distribuição à população, geralmente necessita apenas de desinfecção, correção de pH e fluoretação, sendo, esta última, uma das necessidades regida pela Portaria nº 518 de 2004 do Ministério da Saúde.

Uma vez em funcionamento, ETAs são geradoras de resíduos e, no caso das de ciclo completo convencional, estes se fazem presentes principalmente nos decantadores (devido à sedimentação dos flocos) e na água de lavagem dos filtros (lavagem geralmente realizada com ar e água em fluxo ascendente).

Estes resíduos possuem características variadas (dependendo basicamente da qualidade da água captada e dos produtos químicos adicionados) e geralmente se apresentam na forma fluida e com concentração de sólidos menor que 3%. Portanto,

tratar estes resíduos consiste em buscar soluções para diminuição de seu volume (remoção da parte líquida), para que se possa dar destinação final adequada.

A grande maioria das ETAs existentes no Brasil lança seus resíduos em corpos d'água sem nenhuma forma prévia de tratamento. A Lei Federal nº 9.605 de 1998, conhecida como "Lei dos Crimes Ambientais", no seu art. 54, § 2º, V, tipifica tal conduta como crime, sujeitando o autor do delito às respectivas sanções cominadas.

Dessa forma, como contribuição para evitar a prática do crime ambiental citado, tem-se desenvolvido tecnologias para remoção de água dos resíduos de ETAs e consequente redução de volume para facilitar a disposição ambientalmente adequada. Neste sentido, a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, define os termos rejeito e resíduo, o que claramente permite classificar o lodo retido nos decantadores e a água de lavagem dos filtros como resíduos e não rejeitos, pois, segundo a referenciada Lei, rejeitos são subprodutos em que, esgotadas todas as possibilidades de tratamento, a única alternativa é a disposição final ambientalmente adequada, enquanto resíduos consistem em subprodutos passíveis de intervenções tecnológicas possibilitando tratamento e posterior reutilização, reciclagem ou simplesmente disposição ambientalmente adequada. Uma das tecnologias para intervenção em resíduos de ETAs consiste no método não mecanizado denominado *leito de drenagem*. Este método foi estudado e proposto por Cordeiro (1993 e 2001), e pesquisas recentes comprovaram que após desaguamento destes resíduos, além da possibilidade de reciclagem da água drenada e reutilização do resíduo "seco" como submatéria-prima na produção de materiais cerâmicos e outros, cerca de 98% de seu volume é reduzido.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Esta pesquisa teve como objetivo geral estudar a influência de cobertura plástica na remoção de água de lodos de decantadores de ETAs de ciclo completo em leitos de drenagem.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos desta proposta foram:

- Para ensaios preliminares (etapa de drenagem):
  - realizar ensaios em minileitos de drenagem com mantas geotêxteis de características variadas buscando resultados referentes à drenagem inicial do lodo; e
  - realizar ensaios em minileitos de drenagem com condicionamento com polímero catiônico buscando resultados referentes à drenagem inicial do lodo.
- Para ensaios efetivos (etapa de evaporação e drenagem):
  - realizar ensaios em protótipos alocados na ETA de São Carlos-SP para analisar o posicionamento (altura, inclinação e orientação) da cobertura em relação à taxa de remoção de água do lodo por evaporação.

### **3. EMBASAMENTO TEÓRICO**

#### **3.1 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs)**

Existem dois tipos de captação de água para tratamento: captação superficial e subterrânea. Quando captada em rios, lagos ou represas, por gravidade ou bombeamento, tem-se a superficial. Quando captada dos lençóis subterrâneos (poços artesianos – perfurações feitas no terreno), tem-se a subterrânea. Obviamente, devido às distintas características gerais dessas duas fontes de água, seus processos de tratamento são diferenciados. Em linhas gerais, afirma-se que o tratamento realizado para águas de captação subterrânea é mais simplificado que o realizado para águas de captação superficial.

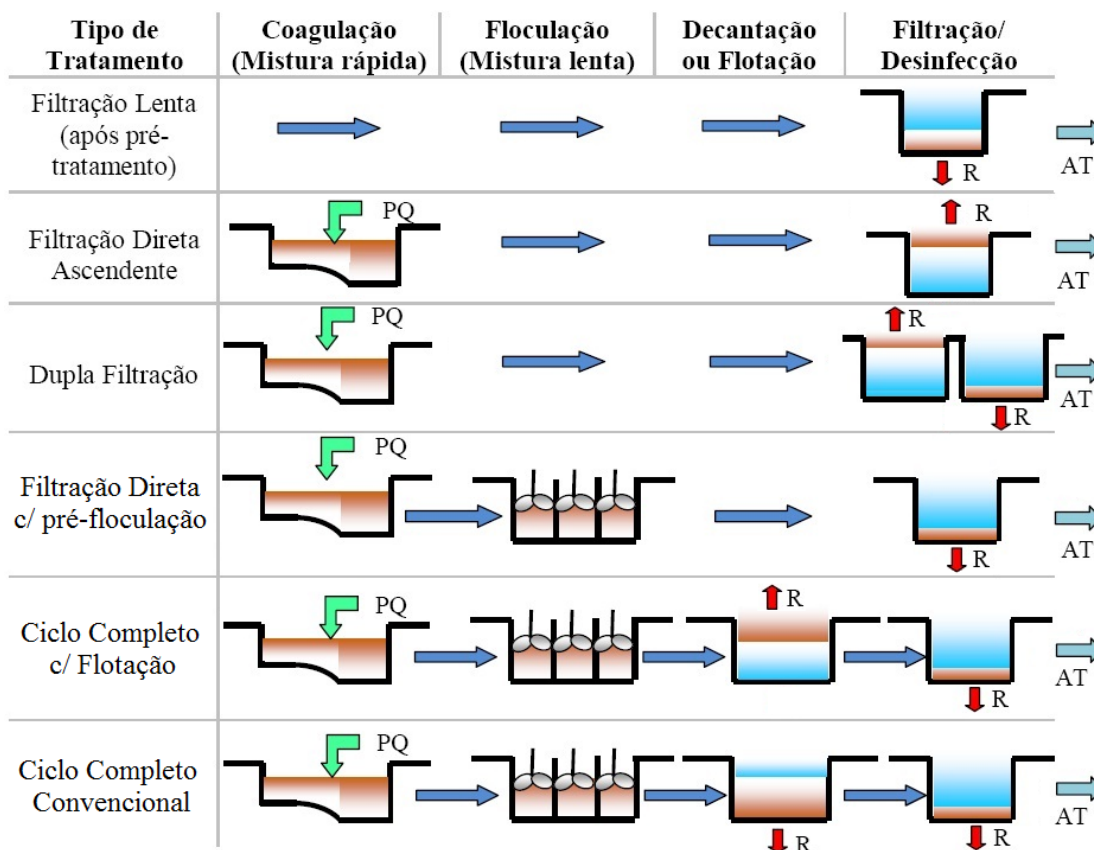
A Estação de Tratamento de Água é responsável pela transformação da água bruta captada em água potável, de acordo com o padrão de potabilidade vigente no País, estabelecido pela Portaria 518/2004. Para tanto, faz-se necessário o emprego de diversos métodos e técnicas. Algumas tipologias de tratamento de água encontradas nas estações encontram-se simplificadas na representação da Figura 3.1 (PAPANI, 2009).

Observa-se que, apesar das diferenças entre as tipologias de tratamento, há entre estas características semelhantes e relevantes, tais como a necessidade de análise da qualidade da água bruta, tratada e distribuída, escolha e dosagem de produtos químicos, manutenção e operação de equipamentos, e gerenciamento de resíduos gerados (PAPANI, 2009).

Baseando-se em dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE (2008), dentre as tipologias de tratamento de água que constam na Figura 3.1, 65% do



volume de água (superficial e subterrânea) tratada e distribuída no País por dia é obtido por meio do tratamento de ciclo completo convencional, o que configura esta tipologia como a mais comumente empregada no Brasil. Tal tipologia se faz presente principalmente nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul.



**Figura 3.1** – Representação das principais tipologias de tratamento de água.

Fonte: Adaptado de Papani (2009).

Em complemento à Figura 3.1, de maneira simplificada, as etapas básicas presentes nos tratamentos de águas para abastecimento de ciclo completo são:

- **Coagulação:** ocorre a partir da mistura rápida do coagulante utilizado, cujo resultado é a desestabilização das partículas (colóides). A adição do coagulante pode alterar o valor de pH, o que demanda sua correção

(geralmente realizada pela adição de cal hidratada), visando à otimização do processo.

- **Floculação:** ocorre com a movimentação da água já coagulada dentro dos tanques com gradientes de velocidade previamente definidos (mistura lenta), possibilitando a formação de flocos mais densos e volumosos.
- **Decantação ou sedimentação:** devido à formação dos flocos, nesta etapa ocorre a sedimentação destes para o fundo dos tanques.
- **Flotação:** em linhas gerais, consiste no processo inverso ao da decantação. Certos flocos podem manifestar baixa velocidade de sedimentação, inviabilizando tal procedimento. Geralmente, para melhorar o rendimento do processo de flotação, agregam-se aos flocos microbolhas de ar que aumentam a força de empuxo sobre os mesmos, facilitando sua ascensão.
- **Filtração:** ainda com impurezas não sedimentadas, nos filtros a água passa por camadas de areia ou areia e antracito suportadas por cascalho de diversas dimensões, cujo objetivo é a retenção das partículas ou sólidos ainda presentes.
- **Desinfecção:** nesta etapa, a água tratada recebe o cloro, que elimina os patógenos, garantindo também a qualidade da água nas redes de distribuição e nos reservatórios.
- **Correção de pH:** o objetivo principal da correção de pH é a proteção das canalizações das redes e das casas contra corrosão ou incrustação, o que geralmente ocorre pela adição de cal.

- Fluoretação: consiste na aplicação de uma dosagem de composto de flúor (ácido fluossilícico), que reduz a incidência da cárie dentária, especialmente no período de formação dos dentes. Esta etapa é realizada em atendimento à uma das exigências da Portaria nº 518 de 2004 do Ministério da Saúde.

### **3.2. ORIGEM, CARACTERÍSTICAS E QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS EM ETAs**

Os resíduos gerados no tratamento de água são formados basicamente por impurezas contidas na água bruta e compostos químicos resultantes da adição de alcalinizante (ou acidificante), coagulante e condicionantes necessários ao tratamento. Portanto, dependendo das características da água bruta, pode-se ter maior ou menor presença de material orgânico e inorgânico, sendo a maior parcela de natureza inorgânica, formada por areia, argilas e siltes, e menor parte de origem orgânica e organismos como plâncton, bactérias, vírus, protozoários entre outros. (Di BERNARDO *et al.*, 2002).

Os lodos gerados nos decantadores das ETAs podem ser classificados como resultado dos processos e operação das etapas de coagulação/floculação e sedimentação das partículas presentes na água bruta. Essas partículas sofrem ação de reações químicas e operação física para formação de flocos que se tornam propícios para a operação de sedimentação ou de flotação. Esse material removido da água bruta fica retido em tanques durante certo tempo e é disposto, quase sempre, em cursos d'água (CORDEIRO, 2001).

As lavagens de filtros de ETAs também geram resíduos: águas de lavagem de filtros (ALF). Estes, para que possam ser dispostos de forma adequada no meio ambiente ou reutilizados no início do tratamento, devem ser submetidos a operações

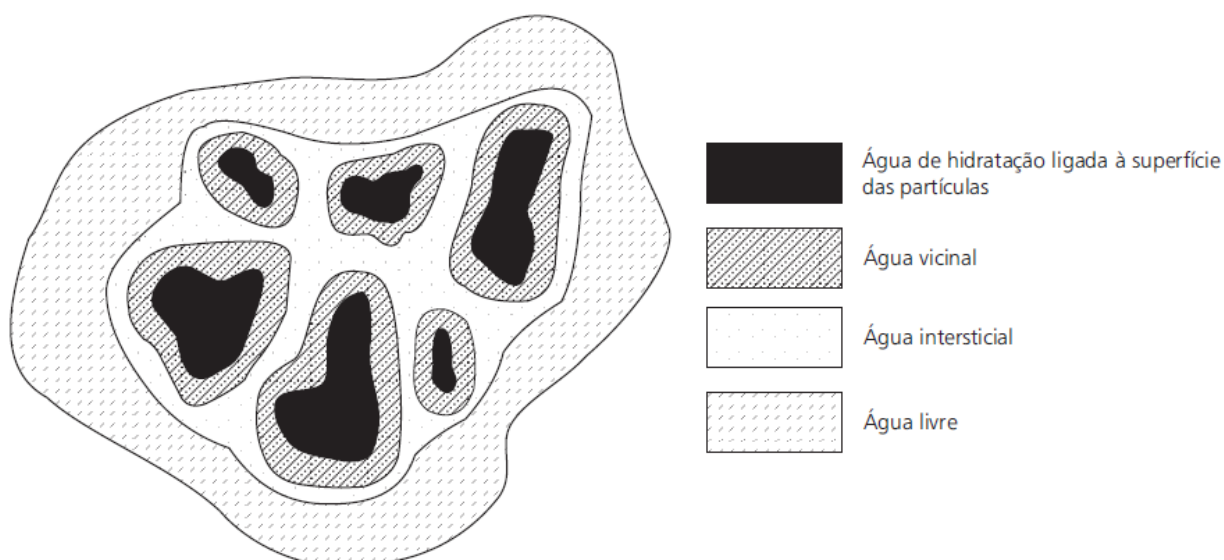
e/ou processos que assim os qualifiquem, ou seja, devem apresentar características físicas, químicas e biológicas que atendam aos devidos parâmetros: quando da reutilização da água, devem ser submetidos a análises conforme se realiza com a água bruta captada no manancial e, quando da disposição no meio ambiente ou da utilização do resíduo seco, devem atender critérios do local de disposição ou atender critérios segundo a finalidade a que forem sujeitados (exemplo: disposição em aterros sanitários e utilização em fabricação de tijolos).

Como já discorrido, a composição básica dos resíduos de ETAs é essencialmente partículas do solo, material orgânico carregado para água bruta, subprodutos gerados devido à adição de produtos químicos e água. As partículas presentes na água a ser tratada são basicamente colóides que conferem cor e turbidez à mesma. Os colóides têm tamanhos que variam de 1 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm}$ ) a  $1 \mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$ ). Essa característica faz com que o processo de remoção da água livre dos lodos seja dificultado (CORDEIRO, 2001).

Existem alguns modelos que apresentam e classificam as águas presentes nos resíduos de ETAs. Segundo o modelo geral apresentado por Vesilind e Hsu (1997) e Smollen e Kafaar (1994), as águas presentes nos resíduos de ETAs possuem distintos estados físicos, os quais são (Figura 3.2):

- *Água livre* – fração de água que se move livremente, não associada aos sólidos. Essa água pode ser removida com relativa facilidade através de sedimentação gravitacional simples;

- *Água intersticial ou capilar* – essa fração está intimamente ligada à partícula floculada. Para remoção dessa fração existe a necessidade de aplicação de força mecânica, provocando a quebra do floco;
- *Água vicinal* – a água vicinal está fortemente ligada à partícula sólida devido à estrutura molecular da água: pontes de hidrogênio. A diferença entre essa fração e a intersticial é, simplificada, a quantidade de energia necessária para liberá-la, ou seja, necessita-se maior quantidade de energia para liberar a água vicinal em relação à intersticial;
- *Água de hidratação* – fração ligada quimicamente à partícula sólida coloidal. A remoção dessa água só é possível com aplicação de altas temperaturas ou com aplicação de elevada quantidade de energia elétrica, ou seja, somente por destruição termoquímica das partículas.



**Figura 3.2** – Representação ilustrativa de classificação de águas presentes em lodos de ETAs.

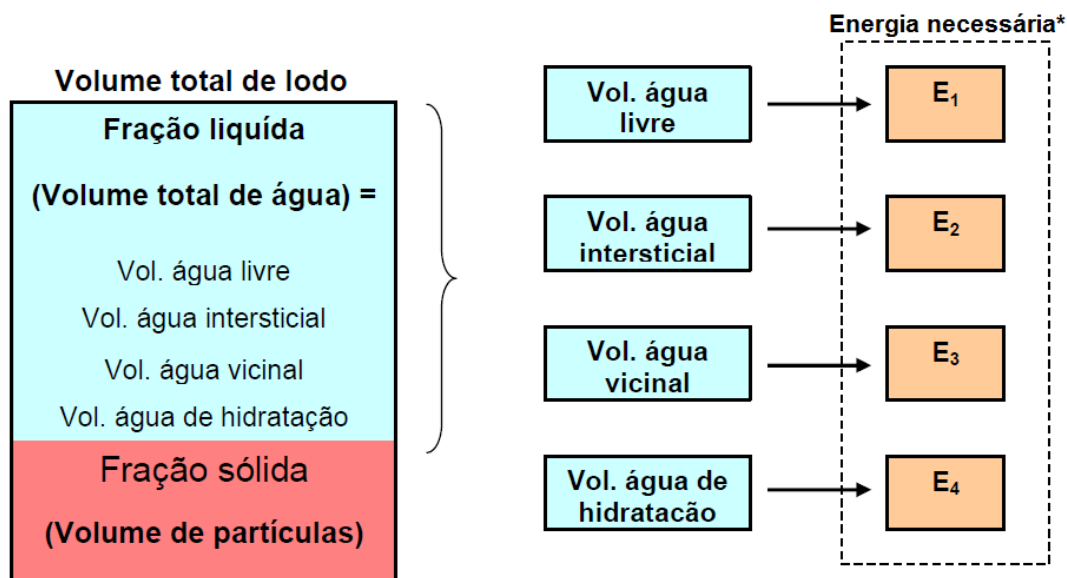
Fonte: Realí<sup>1</sup> (1999 *apud* Smollen & Kafaar, 1994).

<sup>1</sup> REALI, M. A. P. **Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs.** In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.* Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.

Barroso (2007), discutindo a energia requerida ( $E_i$ ) para remoção de cada fração de água apresentou um esquema ilustrativo identificando cada fração (Figura 3.3).

Assim, a energia  $E_1$ , que consiste na energia necessária para remoção da água livre, é menor que a energia  $E_2$ , que é menor que  $E_3$ , que é menor que  $E_4$ . Logo, é possível afirmar que  $E_4$  é muitas vezes maior que  $E_1$ , o que pode conseqüentemente implicar em maiores custos envolvidos para remoção desta fração de água que demanda maior quantidade de energia (BARROSO, 2007).

Em relação a parâmetros quantitativos, a quantidade de lodo produzida em determinada ETA depende de fatores como partículas suspensas e dissolvidas presentes na água bruta, que lhe conferem turbidez e cor; concentração de produtos químicos aplicados ao tratamento; tempo de permanência do lodo nos tanques; forma de limpeza dos mesmos; eficiência da sedimentação; entre outros (CORDEIRO, 2001).



**Figura 3.3** – Ilustração esquemática de energia requerida ( $E_i$ ) para remoção dos diferentes volumes de frações de água constituintes de lodo de ETAs.

Fonte: Barroso (2007).

Conforme já mencionado, a entrada de sólidos no sistema é fornecida pelas partículas presentes na água bruta e nos produtos químicos adicionados ao processo. Assim, segundo Cordeiro (2001), os parâmetros determinantes para quantificação dos resíduos de uma ETA são:

- vazão de entrada (L/s);
- turbidez (uT);
- cor (uC);
- dosagem de coagulante (mg/L);
- dosagem de cal (mg/L); e
- dosagem de auxiliares de coagulação/floculação (mg/L).

Cornwell *et al.* (1987) apresentaram duas formulações relativas aos parâmetros quantitativos de produção de resíduos em decantadores de ETAs de ciclo completo convencional. A primeira delas (Eq. 3.1) relaciona a concentração de sólidos que entra no decantador com valores de turbidez, a partir de um coeficiente que pode variar de 1,5 a 2,2. Ou seja,

$$C_e = 1,5.T \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde,

$C_e$ : concentração de partículas que entra no decantador;

$T$ : turbidez da água bruta.

Quanto à segunda formulação, considerando-se que seja aplicado o sulfato de alumínio, o que estequiometricamente corresponde a cerca de 44% da dosagem utilizada em forma de sólido, Cornwell *et al.* (1987) apresentaram equação que melhor representa o balanço de produção de sólidos em decantadores (Eq. 3.2):

$$W = 0,0864.Q.(0,44.D+1,5.T+A) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

onde,

$W$  = quantidade de lodo (kg/dia);

$Q$  = vazão de adução de água (L/s);

$D$  = dosagem de sulfato de alumínio (mg/L);

$T$  = turbidez da água bruta (uT);

$A$  = dosagem de “auxiliares” ou outros produtos adicionados (mg/L).

### **3.3. GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

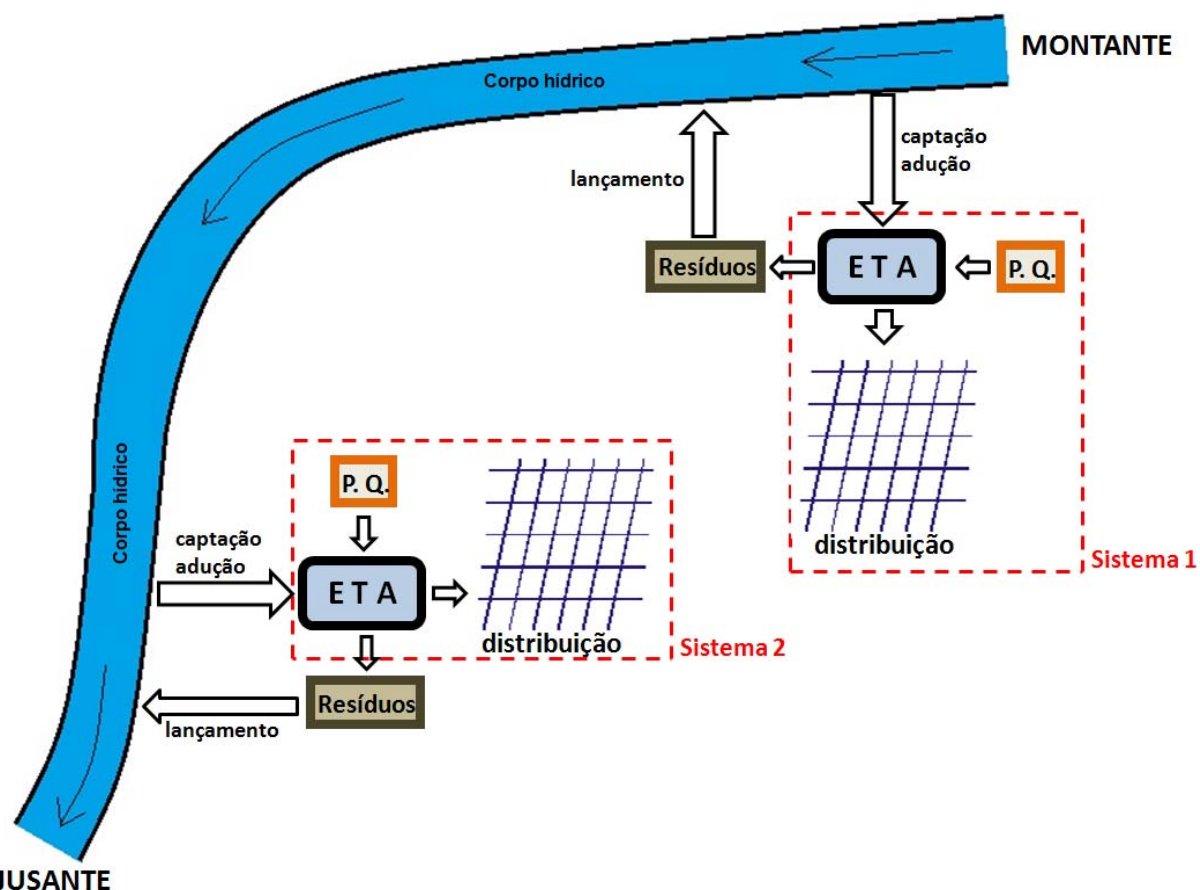
As Estações de Tratamento de Água, até recentemente, desconsideravam o fato de gerarem resíduos, ou seja, a visão gerencial era limitada, atendo-se apenas ao produto final a ser distribuído à população. Indubitavelmente, este é o objetivo do tratamento, todavia, uma visão gerencial abrangente não se abstém aos subprodutos indesejáveis gerados, mas além de destacá-los na planta do projeto, busca formas de minimizar impactos adversos ao meio ambiente, ao passo que estuda maneiras de se beneficiar através destes resíduos.

Segundo Grandin (1992), os resíduos gerados em ETAs de ciclo completo convencional são essencialmente provenientes das lavagens dos filtros e descargas dos decantadores, sendo que flocladores e tanques de preparo de soluções e suspensões de produtos químicos produzem lodos por ocasião das lavagens periódicas, porém em volumes não significativos.

Infelizmente, os mananciais superficiais ainda têm sido “castigados” com lançamentos de despejos diversos decorrentes do crescimento populacional e da ocupação desordenada das áreas de proteção, o que torna pior a qualidade da água bruta captada e exige que concentrações maiores de produtos químicos sejam aplicadas no tratamento. Como conseqüência, observa-se que pode ocorrer um acréscimo na geração e retenção de lodo nos decantadores, requerendo também maior



periodicidade na limpeza destes e na lavagem dos filtros das ETAs (CORDEIRO, 2001), como ilustra a Figura 3.4.



**Figura 3.4** – Aumento na adição de produtos químicos (P.Q.) e, possivelmente, quantidade proporcional de resíduos (lodo).

### 3.4. ASPECTOS LEGAIS SOBRE RESÍDUOS DE ETAs E SUA DISPOSIÇÃO

Aspectos legais vigentes para a questão dos lodos de ETAs devem ser criteriosamente analisados, uma vez que infelizmente as características desses resíduos são ainda pouco conhecidas e difundidas. Posto isto, segue apresentação de alguns aspectos que direta e indiretamente estão relacionados com este tema, e que devem ser verificados.

A Constituição Federal de 1988, em seu art. 225, caput, diz que *“todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”*. No art. 23, IV, a mesma Carta Magna dita que *“é competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios: (...) VI - proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas (...)”*.

A Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe acerca da Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) traz a seguinte redação em seu art. 2º: *“...tem por objetivo a preservação, melhoria, e recuperação da qualidade ambiental própria à vida, visando assegurar ao País condições de desenvolvimento sócio-econômico, aos interesses de segurança nacional e de proteção da dignidade da vida humana”*. Através desta Lei, criou-se o Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA e os órgãos estaduais e municipais de meio ambiente.

A Lei 9.605, chamada “Lei da Vida” ou “Lei dos Crimes Ambientais”, promulgada em 12 de fevereiro de 1998, em seu Capítulo V – “Dos Crimes Contra o Meio Ambiente”, na Seção III – “Da Poluição e outros Crimes Ambientais”, no art. 54, rege que se constitui crime: *“causar poluição de qualquer natureza que resultem ou possam resultar danos à saúde humana, ou que provoque a morte de animais ou a destruição significativa da flora.”* No § 2º, inciso V, traz uma das condicionais com sua respectiva sanção: *“se o crime: (...) ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos (...) em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos. A pena prevista é de reclusão de um a cinco anos”*.

Tendo em vista esses aspectos, se não considerados pelos responsáveis por serviços de água, tais gestores poderão, em um futuro próximo, ser enquadrados no crime citado e ter que responder criminalmente pelo lançamento de resíduos em “coleções” de água.

A Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010, Lei que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em um primeiro momento, no art. 3º, inciso XVI, define resíduos sólidos como *“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”* (destaque do autor).

Posteriormente, no art. 13, inciso I, alínea “e” esta Lei enuncia como classificação de resíduos sólidos quanto à origem, os resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, o que permite a inclusão de resíduos de ETA e, no inciso II do mesmo artigo, quanto à periculosidade, abre caminhos para classificação deste como resíduo perigoso: *“aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica”*.

Para reforçar o argumento até então mencionado, pode-se citar a Lei Estadual Paulista 997, de 31 de maio de 1976, que nas questões de poluição, em seu Capítulo I, diz: *“fica proibido o lançamento ou liberação de poluentes nas águas, no ar ou solo”*. No

mesmo seguimento, o Decreto-Lei 8.468, de 08 de setembro de 1976, estabelece as condições gerais sobre poluição nos arts. 3º e 4º. Já o art. 19-B, parágrafo único, deste Decreto, rege que: *“os lodos provenientes do tratamento das fontes de poluição industrial, bem como o material proveniente de limpezas de fossas sépticas, poderão, a critério e mediante a autorização expressa da entidade responsável pela operação do sistema, ser recebido pelo sistema público de esgotos, proibida sua disposição em galerias de águas pluviais ou em corpos de água”*.

Em se tratando de atos normativos brasileiros, por exemplo, a norma NBR 10.004 de 2004, os resíduos provenientes dos decantadores são definidos como *resíduos sólidos* e, portanto, devem estar sujeitos a todas as regulamentações especificadas na sobredita norma.

De acordo com Cordeiro (2001), analisando-se o que ocorre em outros países com relação a esses resíduos, percebeu-se que nos EUA, o vigoramento do “Clean Water Act” Lei (P.L. 92-500) estabeleceu que Estações de Tratamento de Água para abastecimento enquadram-se na classificação de indústrias e, portanto, devem ter seus resíduos tratados e dispostos convenientemente. Após essa definição, várias outras regulamentações surgiram, estabelecendo condições de tratamento e disposição de resíduos de ETAs em coleções de águas e no solo.

O Quadro 3.1 apresenta sinteticamente as legislações vigentes apontadas neste tópico, que se relacionam à questão dos lodos de ETAs.

**Quadro 3.1** – Legislações vigentes sobre resíduos de ETAs.

LEGISLAÇÃO	ÂMBITO	CAP./ART./PAR./INC.	ASSUNTO
Constituição 1988	Federal	Art. 225, caput	Direito ao meio ambiente equilibrado.
Constituição 1988	Federal	Art. 23, VI	Proteger o meio ambiente.
Lei 6.938 de 1981	Federal	Art. 2º	Manutenção da qualidade ambiental (PNMA).
Lei 9.605 de 1998	Federal	Art. 54, § 2º, V	Crime por lançamento de resíduos sólidos.
Lei 12.305 de 2010	Federal	Art. 3º, XVI	Definição de resíduos sólidos.
Lei 12.305 de 2010	Federal	Art. 13, I, “a” e II	Classificação de resíduos sólidos quanto à origem e periculosidade.
NBR 10.004/2004	Federal	-	Consideração de lodo como resíduo sólido.
Lei 997 de 1976	Estadual	Capítulo I	Proibição do lançamento de poluentes.
Decreto-Lei 8.468 de 1976	Estadual	Arts. 3º, 4º e 19-B	Condições gerais sobre poluição e a questão do lodo.
"Clean Water Act" Lei (P.L. 92-500)	Estrangeiro	-	Classificação de ETAs como indústrias.

### 3.5. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS DE ETAs, SEUS IMPACTOS AO MEIO AMBIENTE E TOXICIDADE

O lodo de ETA, assim como demais substâncias fluidas, obviamente é passível de análises físico-químicas. Contudo, devido à grande diferença de resultados apresentados em análises deste resíduo, existe a necessidade de se equacionar o problema de caracterização de forma quase individualizada. A Tabela 3.1 traz um resumo de alguns parâmetros registrados na bibliografia consultada.

Um dos parâmetros fundamentais na caracterização de lodo de decantador consiste na *resistência específica* deste resíduo, ou seja, resistência oferecida pelo lodo à passagem de água por ele. Segundo Cordeiro (1999), devido ao pequeno tamanho das partículas do lodo de decantador, a remoção da água livre é dificultada e, quanto maior a resistência específica, menor a capacidade de filtração da água.

Em relação à presença de metais nos lodos de ETAs, a Tabela 3.2 traz resultados para ETAs distintas que utilizam diferentes coagulantes. Os resultados apresentados para as ETAs de Rio Claro, Araraquara e São Carlos (todas localizadas

no Estado de São Paulo), foram obtidos por Barroso & Cordeiro (2001). Já os resultados apresentados para a ETA de Cardoso-SP foram obtidos por Fontana (2004). Por meio destes resultados, é possível notar, também para os metais, a heterogeneidade nas características dos resíduos gerados nas estações em questão, principalmente quando se trata de distintos coagulantes.

**Tabela 3.1** – Características dos lodos gerados em ETAs.

Autor/Ano	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	ST (mg/L)	SV (%ST)	SS (%ST)
Neubauer (1968)	30 a 150	500 a 15.000	6,0 a 7,6	1.100 a 16.000	20% a 30%	-
Sutherland (1969)	100 a 232	669 a 1.100	7,0	4.300 a 14.000	25%	80%
Bugg <i>et al.</i> (1970)	380	1.162 a 15.800	6,5 a 6,7	4.380 a 28.580	20%	-
Albrecht (1972)	30 a 100	500 a 10.000	5,0 a 7,0	3.000 a 15.000	20%	75%
Culp & Culp (1974)	40 a 150	340 a 5.000	7,0	-	-	-
Nilsen <i>et al.</i> (1974)	100	2.300	-	10.000	30%	-
Singer (1974)	30 a 300	30 a 5.000	-	-	-	-
Cordeiro (1981)	320	5.150	6,5	81.575	20,70%	-
Vidal & Pereira (1990)	449	3.487	6,0 a 7,4	21.972	15%	-
Vidal & Pereira (1990)	173	1.776	6,7 a 7,1	6.300	73%	-
Cordeiro (1993)	-	5.600	6,4	30.275	26,3	-
Patrizze (1998)	-	-	5,55	6.112	19%	-
Patrizze (1998)	-	-	6,8	6.281	-	-
Barroso & Cordeiro (2001)	-	4.800	7,2	26.520	-	-
Barroso & Cordeiro (2001)	-	5.450	7,4	15.330	-	-
Barroso & Cordeiro (2001)	-	140	8,93	775	-	-
Di Bernardo <i>et al.</i> (2002)	-	1.670	8,3	9.180	-	-
Fontana (2004)	-	-	6,6	98.397	-	-
Fontana (2004)	-	-	7,0	28.263	-	-

Fonte: Adaptado de Cordeiro (1999).

**Tabela 3.2** – Características dos resíduos de decantadores de diferentes ETAs do Estado de São Paulo.

Parâmetros	Unidade	ETA - Rio Claro <sup>(a)</sup>	ETA – Araraquara <sup>(b)</sup>	ETA - São Carlos <sup>(c)</sup>	ETA – Cardoso <sup>(d)</sup>
DQO	mg/L	5.450	140	4.800	7.500
Alumínio	mg/L	30	2,16	11.100	1.700
Cádmio	mg/L	0,27	ND	0,02	0,12
Chumbo	mg/L	1,06	ND	1,6	2,66
Cobalto	mg/L	-	-	-	-
Cobre	mg/L	0,91	1,7	2,06	1,39
Cromo III	mg/L	0,86 <sup>(1)</sup>	0,19 <sup>(1)</sup>	1,58 <sup>(1)</sup>	2,7
Ferro Solúvel	mg/L	4.200	214	5.000	3.014 <sup>(2)</sup>
Fosfato Total	mg/L	-	-	-	33,72
Manganês Total	mg/L	-	-	-	101
Mercurio	mg/L	-	-	-	0,1
Níquel	mg/L	1,16	ND	1,8	-
Sulfato	mg/L	-	-	-	1010
Zinco	mg/L	48,53	0,1	4,25	3,18

(a): Lodo de decantador convencional - utiliza cloreto férrico como coagulante.

(b): Lodo de decantador de alta taxa - utiliza cloreto férrico como coagulante.

(c): Lodo de decantador convencional - utiliza sulfato de alumínio como coagulante.

(d): Lodo de decantador convencional - utiliza sulfato de alumínio (ferroso) como coagulante.

(1): Cromo total.

(2): Ferro total.

(-): Não determinado.

ND: Não detectado.

Fonte: Barroso & Cordeiro (2001); Fontana (2004).

Quanto aos impactos ao meio ambiente e capacidade tóxica do lodo, pode-se afirmar que variam de acordo com características do manancial de captação de água bruta, tipologia de tratamento e produtos químicos utilizados na ETA. Quando o sulfato de alumínio é utilizado como coagulante primário, certamente os resíduos dos decantadores possuem em sua composição grandes concentrações de alumínio e, de acordo com Cordeiro (1999), nestas circunstâncias, quando este fluido é disposto em rios com baixa velocidade ou lagos, podem ser causados problemas principalmente na camada bentônica destes locais.

Vários experimentos realizados no Brasil e em outros países mostraram que a presença do alumínio em determinadas concentrações pode causar efeitos agudos, crônicos ou até a mortandade em *T. dissimilis*, em trutas e comunidades que vivem na camada macrobentônica (CORDEIRO, 1999).

Segundo resultados de trabalho desenvolvido por Miller *et al.* (1984), as concentrações de alumínio nas águas de abastecimento podem aumentar com a utilização de sulfato de alumínio como coagulante. Este trabalho foi desenvolvido considerando 186 ETAs localizadas nos EUA e, em suas considerações foi ressaltado que existe cerca de 40 a 50% de chance de haver concentrações mais elevadas de alumínio efluente que afluente à ETA.

Miller *et al.*<sup>2</sup> (1984 *apud* Davidson *et al.*, 1982), detectaram que pacientes submetidos à diálise sofriam de demência quando a água utilizada possuía concentração de alumínio acima de 0,08 mg/L. Assim, além dos aspectos relativos à saúde, concentrações de alumínio podem, de acordo com Miller *et al.* (1984):

- reduzir a efetividade da desinfecção da água;
- aumentar a turbidez da água tratada; e
- provocar a deposição de alumínio nas tubulações.

Em 1991, estudos realizados pela Universidade Tecnológica de Tennessee, cujo objetivo geral foi determinar o efeito das descargas de lodos de sulfato de alumínio no meio ambiente (particularmente no meio aquático), revelaram, entre outros aspectos, que:

---

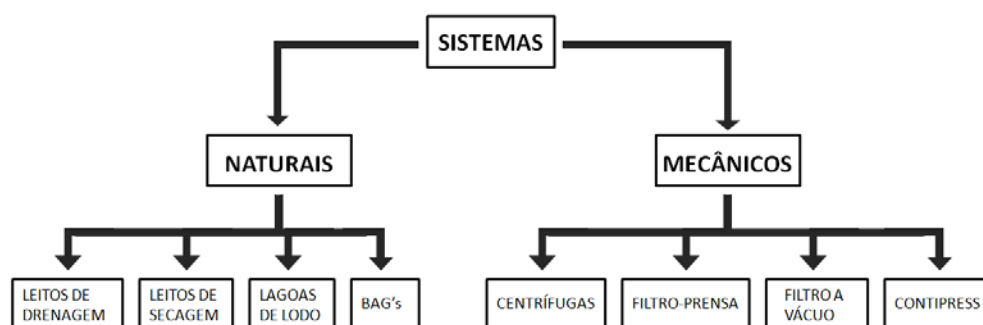
<sup>2</sup> MILLER, R. G. *et al.* **The occurrence of aluminum in drinking water**. Denver: Journal AWWA, v. 76, n. 1, jan. 1984, 84-91 p.



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

### 3.6. MÉTODOS DE DESAGUAMENTO DOS RESÍDUOS DE ETAS

O objetivo do desaguamento ou remoção de parcela de água dos resíduos consiste na redução de seu volume. A Figura 3.5 ilustra, esquematicamente, algumas formas de redução de volume, classificando-as de acordo com os sistemas: natural e mecânico.



**Figura 3.5** – Formas de redução de volume de resíduo de ETA.

Fonte: Adaptado de Cordeiro (1999).

Segundo Cordeiro (1999), num caso real de definição e implantação de um tipo de sistema de desaguamento do resíduo de ETA, vários fatores devem ser considerados, podendo ser citados: área necessária para implantação e seu custo, distância da estação até o destino final, condições climáticas, custo dos equipamentos,

operação, preparo de recursos humanos para operação, necessidade de condicionamento, entre outros.

Num sistema de desaguamento é importante que a água livre do lodo seja removida de forma rápida para que se atinja um tempo mínimo de operação. Uma vez removida, essa água pode ser reciclada no início do processo ou reutilizada sem causar grandes prejuízos, merecendo, obviamente, atenção especial, pois no caso de desaguamento de resíduos provenientes dos filtros, deve-se atentar para a qualidade microbiológica da água, caso em que, se o sistema de tratamento da ETA for de filtração direta, essa atitude pode afetar seriamente a qualidade da água afluyente aos filtros. Vale lembrar que para a obtenção dos sólidos finais resultantes da operação de desaguamento certa quantidade de energia é necessária, sendo esta natural (solar) e/ou mecânica (elétrica). Uma vez atingido o produto final (resíduo desaguado), este pode ser disposto em aterros ou utilizado em sistemas de codisposição como matriz de cimento ou entulhos, sendo esta última alternativa, objeto de estudos já concluídos e em andamento.

Como a redução do volume dos resíduos das ETAs consiste no produto final dos sistemas de secagem, esta redução pode ser realizada com a remoção da água livre e nos interstícios dos sólidos. Assim sendo, várias podem ser as alternativas para remoção de água, merecendo destaque:

A. Sistemas naturais (Figura 3.6):

- Leitos de drenagem
- Leitos de secagem (tradicionais, à vácuo, de tela em cunha e leitos solares)

- Lagoas de lodo

- “Bags”

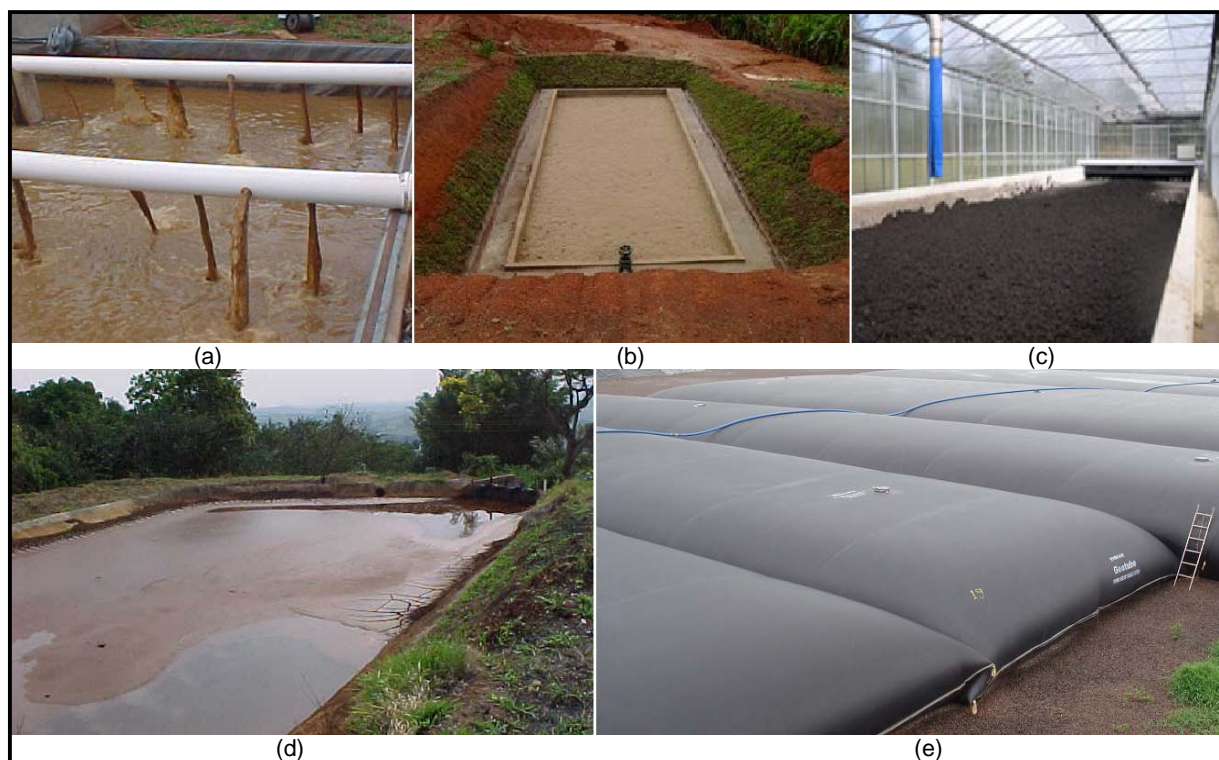
B. Sistemas mecânicos (Figura 3.7):

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

C. Secagem térmica.

Sistemas que se utilizam da pressão como ponto fundamental na operação têm sido desenvolvidos em países como Bélgica, Holanda, Alemanha, Estados Unidos e África do Sul e, segundo Cornwell & Koopers (1990), podem se tornar significativas alternativas de remoção de águas de lodos de ETAs. Dentre estes podem ser citados:

- filtro-prensa de diafragma;
- filtro-prensa tubular;
- sistema Hi-compact;
- sistema compactador;
- microfiltração;
- sistema de aquecimento-degelo; e
- filtro-prensa contínuo de alta pressão.



**Figura 3.6** – Sistemas naturais para desaguamento de lodo: (a) leito de drenagem, ETA de Cardoso (SP); (b) leito de secagem, ETE de São Domingos das Dores (MG); (c) leito solar coberto, series HELIOBOLT®, ESTRUAGUA Technology For Life<sup>3</sup>, Espanha; (d) lagoa de lodo, ETA de Rio Claro (SP); (e) Bags, ETE de Presidente Prudente (SP).

Existem também outras possibilidades de utilização/destinação de resíduos de ETAs que não sejam alternativas de remoção de água, como, por exemplo, sistemas de recuperação de produtos químicos e descargas em sistemas de esgotos sanitários, como já tem ocorrido no município de Araraquara-SP, serviço de saneamento municipal gerenciado pelo DAAE (Departamento Autônomo de Água e Esgotos).

<sup>3</sup> ESTRUAGUA Technology For Life. Disponível em: <<http://en.estrugua.com/products/solar-drying.html>>. Acesso em: 15 fev. 2011.



**Figura 3.7** – Sistemas mecânicos para desidratação de lodo: (a) filtro-prensa em operação – São Bernardo do Campo (SP); (b) prensa desidratadora, VLC Indústria e Comércio Ltda.<sup>4</sup>; (c) Centrífuga, ETE de Araçatuba (SP) – DAEA<sup>5</sup>; (d) filtro à vácuo, MAUSA S/A<sup>6</sup>; (e) contipress, M-TEC CONTIPRESS<sup>7</sup>.

### 3.7. SISTEMAS NATURAIS

#### 3.7.1 Leito de secagem

Leitos de secagem consistem em tanques rasos compostos de duas ou três camadas de areia com granulometria variável e cerca de 30 cm de espessura. A Figura 3.8 representa o sistema completo: camada suporte, meio filtrante e sistema drenante.

A camada suporte do leito de secagem possui uma espessura aproximada de 0,3 m de areia com tamanho efetivo de 0,3 a 0,5 mm e coeficiente de não-uniformidade

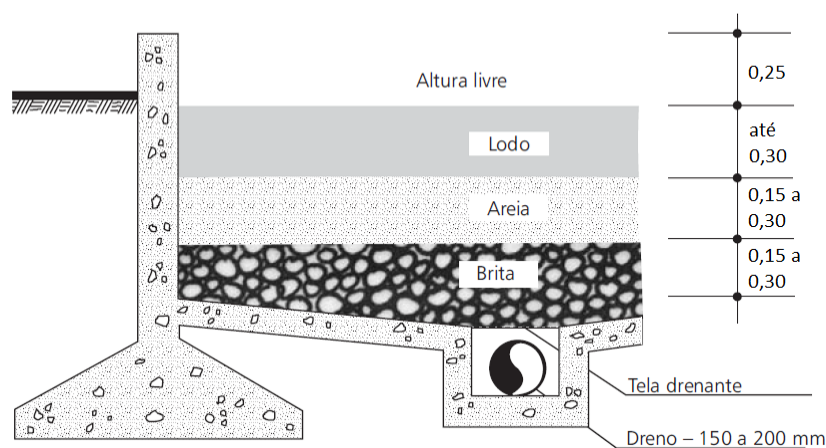
<sup>4</sup> VCL Indústria e Comércio Ltda. Disponível em: <<http://www.vlc.com.br/prensa-desaguadora.php>>. Acesso em: 15 fev. 2011.

<sup>5</sup> DAEA – Departamento de Água e Esgoto de Araçatuba. Disponível em: <[http://www.daea.com.br/fotos\\_view.php?id=20](http://www.daea.com.br/fotos_view.php?id=20)>. Acesso em: 16 fev. 2011.

<sup>6</sup> MAUSA S/A. Disponível em: <<http://www.mausa.com.br/portugues/default.htm>>. Acesso em: 16 fev. 2011.

<sup>7</sup> M-TEC CONTIPRESS. Disponível em: <[http://www.exapro.com/m-tec-contipress-gpp400-1998-pt9791/?counter=31&ce\\_norms=False&product\\_category=555&currency\\_best=EUR](http://www.exapro.com/m-tec-contipress-gpp400-1998-pt9791/?counter=31&ce_norms=False&product_category=555&currency_best=EUR)>. Acesso em 16 fev. 2011.

menor que 5,0. Sua finalidade consiste basicamente em manter a uniformidade da espessura do lodo, permitir remoção manual facilitada do lodo, e evitar que ocorram perturbações no nível e declividade do fundo devido à movimentação de funcionários sobre o leito.



**Figura 3.8** – Representação esquemática de leito de secagem (corte).  
Fonte: Cordeiro (1999).

O meio filtrante é composto por britas graduadas de 1/8" a 1/4", com variação de espessura entre 0,15 e 0,3 m e, por fim, o sistema drenante é composto por tubos perfurados de 150 ou 200 mm de diâmetro (CORDEIRO, 1999).

Existem ocasiões em que o fundo do leito de secagem recebe uma camada impermeabilizante, contudo, tradicionalmente, o fundo é o próprio solo. A operação destes leitos deve ser realizada de forma que, entre um despejo e outro, seja observada a secagem total do lodo, bem como a altura da camada despejada que, após ser espalhada uniformemente, é importante respeitar a altura máxima de 30 cm.

O Quadro 3.2 aponta de maneira resumida algumas vantagens e desvantagens da utilização de leitos de secagem tradicionais.

**Quadro 3.2** – Vantagens e desvantagens do uso de leitos de secagem.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Baixo custo inicial quando o custo da terra é baixo.</li><li>• Pequena necessidade de operação.</li><li>• Baixo consumo de energia.</li><li>• Pouca necessidade de utilização de condicionantes químicos.</li><li>• Alta concentração de sólidos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Necessidade de maior área.</li><li>• Necessidade de trabalhar com lodo estabilizado.</li><li>• Na concepção do projeto é fundamental que sejam consideradas variáveis climáticas, ou seja, requer conhecimentos de climatologia.</li><li>• Remoção de lodo seco exige trabalho intensivo.</li></ul>

Fonte: Water Pollution Control Federation (1983).

Embora este sistema possua várias desvantagens, devido ao baixo custo inicial e operacional, trata-se de uma alternativa de remoção de água de lodos de ETAs muito empregada. Exemplos de implantações de leitos de secagem foram relatados no trabalho desenvolvido nos Estados Unidos da América por Murray & Dillon (1994). Foram visitados 469 sistemas de remoção de água de lodos de ETAs, dos quais 47 se utilizavam de leitos de secagem, ou seja, mais de 10% adotavam tal alternativa para redução de volume dos resíduos produzidos no tratamento.

De acordo com levantamentos de Villela (2010), um exemplo de utilização de leito de secagem é a ETA de Nova Odessa-SP na qual, segundo estudos realizados por Pessoa (2007), o lodo gerado nos decantadores da ETA apresenta umidade de aproximadamente 95% e, após um período aproximado de 30 dias de exposição do lodo no leito de secagem, este atinge cerca de 30 a 40% de umidade. A Figura 3.9 ilustra os leitos de secagem da ETA citada.



**Figura 3.9** – Leitos de secagem – ETA de Nova Odessa-SP.  
*Fonte: Pessoa (2007).*

### 3.7.2 Lagoas de lodo

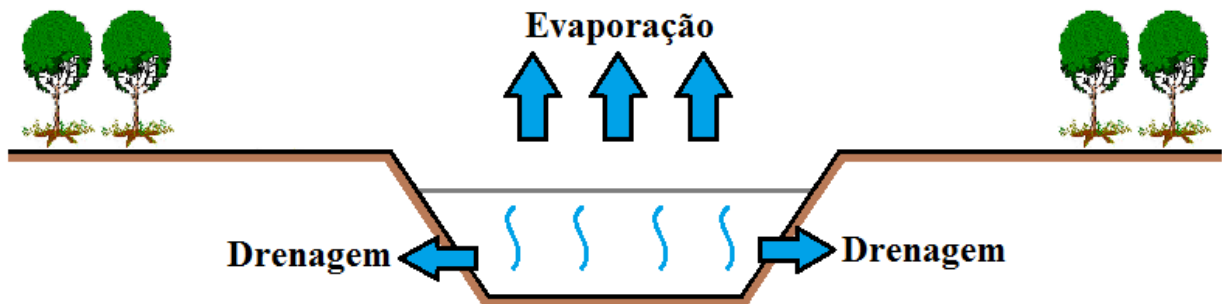
No mesmo segmento que os leitos de secagem tradicionais, as lagoas de lodo consistem em alternativa de remoção de água de lodo que também demanda disponibilidade de área para implantação e, por ser sistema que depende principalmente da evaporação, necessita de condições climáticas favoráveis para obtenção de sucesso em sua operação.

Neste método em questão, segundo Cordeiro (1999), o desaguamento também ocorre em duas etapas: drenagem e evaporação. A Figura 3.10 ilustra os mecanismos de remoção de água em lagoas.

Alguns aspectos de extrema importância a ser observado na implantação de lagoas de lodo são:

- cercamento do entorno para proteção contra entrada de pessoas não autorizadas como medida preventiva a ocorrências danosas;





**Figura 3.10** – Mecanismos de remoção de água em lagoas.

Fonte: Adaptado de Cordeiro (1999).

- profundidade das lagoas (recomenda-se 0,7 a 1,4 m), atentando-se para a profundidade do lençol freático;
- permeabilidade do subsolo;
- local escolhido devido à possibilidade de proliferação de insetos e ocorrência de maus odores (recomenda-se estudos de comportamento dos ventos por meio de rosa dos ventos);
- necessidade de limpezas periódicas;
- condições climáticas da região (índices pluviométricos, distribuição anual e sazonal; temperaturas extremas; e taxa de evaporação, média anual e flutuações anuais e sazonais); e
- estudo de viabilidade de bombeamento de lodo quando se necessitar implantar a lagoa em local distante do ponto de geração de lodo.

Quanto à operação deste sistema é recomendável que o sobrenadante decantado seja removido continuamente ou de forma intermitente, podendo, inclusive, ser passível de retorno ao sistema de tratamento.

Duas experiências brasileiras com lagoas para remoção de água de lodos de ETAs que podem ser citadas são os casos da ETA Alto Tietê, Taiçopeba, Região Metropolitana de São Paulo, e da ETA de Rio Claro, interior do Estado de São Paulo. Infelizmente, os resultados que se tem obtido com essas aplicações são insatisfatórios. Em relação à primeira ETA, o sistema não funcionou adequadamente em função das características do tamanho das partículas do lodo e do clima da região, que desfavorece a evaporação da água decantada (ACHON & CORDEIRO, 2003).

Quanto à ETA de Rio Claro, segundo estudos realizados por Achon & Cordeiro (2003), a remoção de água do lodo foi tachada como deficitária, com estimativa de dois meses de duração para se obter um resíduo praticamente seco. Ocorre que, além do período estendido necessário, na ocorrência de chuvas, a água pluvial fica acumulada na superfície, infiltrando através do lodo ou pelas rachaduras que se formam neste ao secar, formando uma camada de água sobre o lodo, o que dificilmente é eliminado (Figura 3.11). Devido à inexistência de impermeabilização de fundo na maioria destas lagoas, outro aspecto apontado pelos pesquisadores foi o crescimento de vegetação, que pode causar contaminação no solo e até mesmo no lençol freático, dependendo do nível deste e das características do lodo.



**Figura 3.11** – Lagoa de lodo da ETA de Rio Claro-SP, após 45 dias do despejo.  
*Fonte: Achon & Cordeiro (2003).*

### 3.7.3 “Bags”

Esta tecnologia consiste no armazenamento de lodo em grandes unidades que possuem a forma de saco, constituídas por geotêxtil tecido de polipropileno de alta resistência, que exercem simultaneamente funções de contenção da massa de sólidos e de drenagem dos líquidos presentes no lodo. Esta drenagem ocorre através de pequenos poros, permitindo a redução de volume do resíduo e, obviamente, diminuindo o percentual de líquidos presentes no lodo. Conforme ocorre a redução de volume em uma determinada unidade, esta pode ser preenchida por enchimentos sucessivos até que o volume disponível seja quase inteiramente ocupado pela fração sólida existente no resíduo.

Assim, após a consolidação do material contido no interior do bag, este é aberto para que o lodo possa ser disposto adequadamente ou reutilizado em composição de outros produtos.

Dois casos de aplicação deste sistema para remoção de água de lodo de ETAs ocorrem na ETA Curitibanos-SC (Figura 3.12) e na ETA Santo Antônio do Jardim-SP (Figura 3.13).



**Figura 3.12** – Bags instalados na ETA Curitibanos-SC.  
*Fonte:* Tencate Geotube ([www.allonda.com/geotube](http://www.allonda.com/geotube)).



**Figura 3.13** – Bag instalado na ETA Santo Antônio do Jardim-SP.  
*Fonte:* Tencate Geotube ([www.allonda.com/geotube](http://www.allonda.com/geotube)).

A ETA Curitibanos-SC, por tratar aproximadamente 90 L/s de água captada no manancial denominado rio Maronhas, gera maior volume de lodo em relação à ETA Santo Antônio do Jardim-SP, que trata aproximadamente 15 L/s e, por isso, instalaram-se duas unidades em Santa Catarina e apenas uma em São Paulo.

Outro exemplo de utilização de bags como alternativa para desagüamento de lodo é o caso da ETE de Presidente Prudente-SP (Figura 3.14). Segundo dados de

operadores do sistema, no início de 2010 a ETE já contava com 23 unidades completamente cheias e uma em enchimento. Infelizmente, devido ao custo relativamente alto, necessidade de longos períodos para consolidação dos sólidos no interior de cada bag, e necessidade de disponibilidade de espaço físico para alocação das unidades, a tentativa de solução para o lodo gerado na estação em questão tem sido encarada como insatisfatória. Operadores desta ETE afirmaram que uma unidade é cheia a cada dois meses, resultado que, aliado à ineficiência apresentada pela alternativa adotada, ilustra uma oportunidade de revisão do sistema de gerenciamento desta estação.



**Figura 3.14** – Bags ETE de Presidente Prudente-SP.

Uma nova concepção de bags foi visualizada por Villela (2010) na ETA de Nova Odessa-SP, a qual pode ser classificada como mais uma alternativa para remoção de água de lodo de ETA (Figura 3.15 e 4.16). Neste caso, os bags são abertos e possuem capacidade volumétrica muito menor em relação à tecnologia de utilização de bags

ilustrada anteriormente. Segundo Pessoa (2007), o acondicionamento e adensamento do lodo neste tipo de bag é recomendado para espaços reduzidos, já que apresenta maior dimensão vertical. Neste sistema, após a drenagem, o bag com o lodo é facilmente transportado para local de “secagem” final através de suas alças de sustentação e, uma vez vazio novamente, o bag pode receber novo despejo de lodo bruto. Os resultados desta aplicação para a ETA em questão apresentaram um resíduo com umidade em torno de 35%, após aproximadamente 30 dias de exposição.



**Figura 3.15** – Bags após despejo de lodo bruto ( ETA de Nova Odessa-SP).  
*Fonte:* Pessoa (2007).



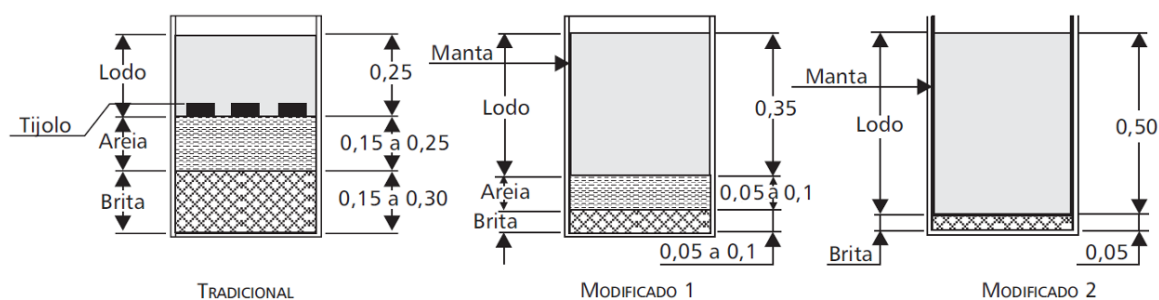
**Figura 3.16** – Bags preparados para receber novo despejo de lodo bruto (ETA de Nova Odessa-SP).  
*Fonte:* Pessoa (2007).

### **3.7.4 Leito de drenagem**

Os leitos de drenagem consistem em uma modificação dos tradicionais leitos de secagem. Uma análise histórica da tecnologia natural dos tradicionais leitos de secagem revela algumas evoluções ocorridas neste sistema, como, por exemplo, os leitos de secagem a vácuo, leitos de secagem de tela em cunha, leitos pavimentados, e mais recentemente os leitos solares mostrados por Cornwell e Vandermeijden (1998), utilizados no sul e sudoeste dos EUA.

Cordeiro (1993 e 2001), estudando a possibilidade de modificação da estrutura dos leitos de secagem tradicionais, observou que a colocação de manta geotêxtil sobre a camada filtrante do leito possibilitava remoção mais efetiva da água livre dos lodos, mesmo utilizando como meio filtrante areias de construção (grossa e fina) adquiridas no mercado. Nesta primeira modificação a areia era lavada e utilizada nos leitos com espessuras de 5 e 10 cm, porém os resultados dos ensaios evidenciaram que a areia e a espessura da camada filtrante não eram decisivos na remoção de água livre.

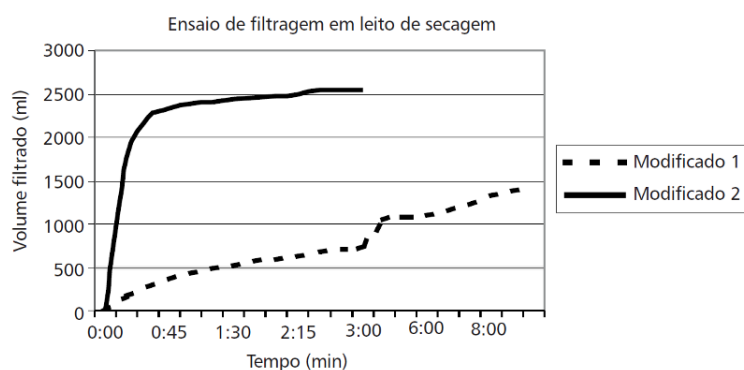
Os estudos evoluíram e Cordeiro desenvolveu uma nova proposta de leito modificado (leito modificado 2), publicada em 2001 através do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico 2 (PROSAB 2) – Tema 4, na qual a camada de areia foi removida e o leito passou a ser constituído de uma camada de brita 01 com 5 cm e, sobre ela, manta geotêxtil, com a camada de lodo atingindo até 50 cm. A Figura 3.17 ilustra as evoluções dos sistemas de leitos de secagem estudadas por Cordeiro.



**Figura 3.17** – Esquemas ilustrativos dos sistemas de leitos de secagem tradicionais e modificados por Cordeiro (1993) e (2000).

Fonte: Cordeiro (2001).

A proposta do leito modificado 2 permitiu significativa diminuição no tempo de drenagem de água livre presente no lodo. Para melhor ilustrar esta comparação, a Figura 3.18 ilustra o comportamento do leito de secagem tradicional modificado por Cordeiro em 1993 (modificado 1), e o remodelado em 2000 (modificado 2), relacionando o fator tempo (minutos) com o volume filtrado (mililitros).



**Figura 3.18** – Curvas de remoção de água de sistema modificado por Cordeiro (1993) e remodelado em 2000.

Fonte: Cordeiro (2001).

Nesse sentido, Achon & Cordeiro (2003) desenvolveram pesquisas no âmbito do PROSAB (1999), com uso do leito de secagem modificado 2, conforme Figura 3.17. Tais pesquisas objetivaram a comparação com lagoas de lodo, que apresentavam inúmeros problemas. Os resultados obtidos comprovaram a diminuição do tempo de remoção de água livre nos leitos de secagem modificados 2 e ainda a obtenção de



drenado de boa qualidade, passível de reutilização ou recuperação. Dessa forma, o leito modificado 2, isto é, o leito de secagem modificado conforme Cordeiro (2001) recebeu a denominação de *leito de drenagem*.

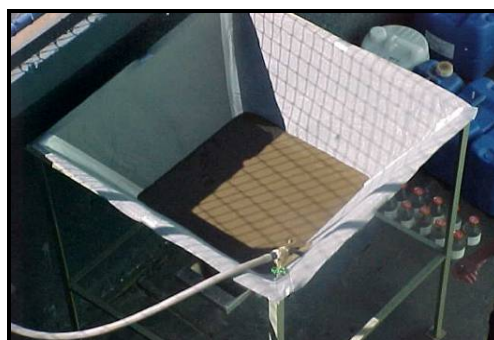
O leito de drenagem foi utilizado em algumas pesquisas, podendo ser citadas a realizada por Fontana em 2004 (dissertação de Mestrado – protótipos e escala real) e a realizada por Barroso em 2007 (tese de Doutorado). Para realizarem as pesquisas, Fontana e Barroso se utilizaram de protótipos de leito de drenagem em seus ensaios, que apresentaram resultados satisfatórios de funcionamento.

As Figuras 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22 consistem em uma sequência de ilustrações do protótipo de leito de drenagem utilizado em pesquisas do PROSAB (1999).

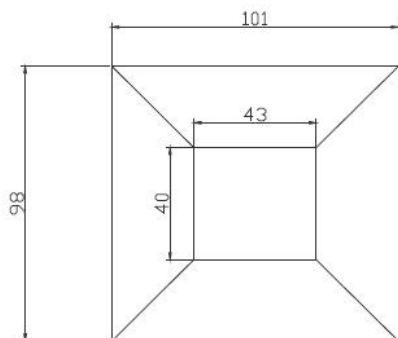
Por fim, como observado através das figuras dos protótipos, o sistema proposto por Cordeiro, num primeiro momento, foi utilizado em escala piloto, necessitando de avaliações mais aprofundadas quanto ao seu funcionamento em escala real. Tendo isso em vista, Fontana (2004) desenvolveu estudos, observações e análises sobre este sistema em escala real, através da implantação do leito de drenagem na ETA Cardoso-SP.



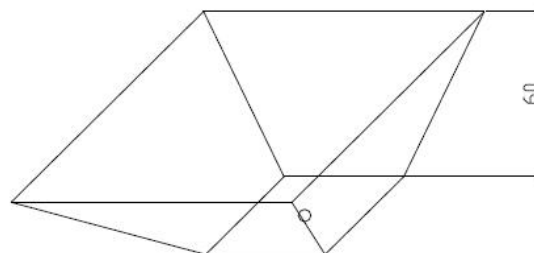
**Figura 3.19** – Protótipo leito de drenagem – Vista frontal.  
*Fonte:* Cordeiro.



**Figura 3.20** – Protótipo leito de drenagem.  
*Fonte:* Cordeiro.



**Figura 3.21** – Planta baixa do protótipo leito de drenagem.  
Fonte: Cordeiro.



**Figura 3.22** – Vista perspectiva do protótipo leito de drenagem.  
Fonte: Cordeiro.

### 3.7.4.1 Experiências de implantação de leito de drenagem em escala real

#### 3.7.4.1.1 ETA Cardoso-SP

Fontana (2004) implantou o sistema de leito de drenagem na ETA do município de Cardoso – SP, cujo gerenciamento é de responsabilidade da Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (Sabesp). A ETA Cardoso é do tipo ciclo completo convencional e sua capacidade nominal de tratamento é de 25 L/s. Assim, baseando-se em valores médios apresentados por Fontana (2004),

$Q$  (vazão de adução de água) = 25 L/s;

$D$  (dosagem de coagulante) = 1 mg/L de Sulfato de Alumínio (ferroso);

$T$  (turbidez da água bruta) = 35 uT;

$A$  (dosagem de auxiliares adicionados) = 0,44 mg/L;

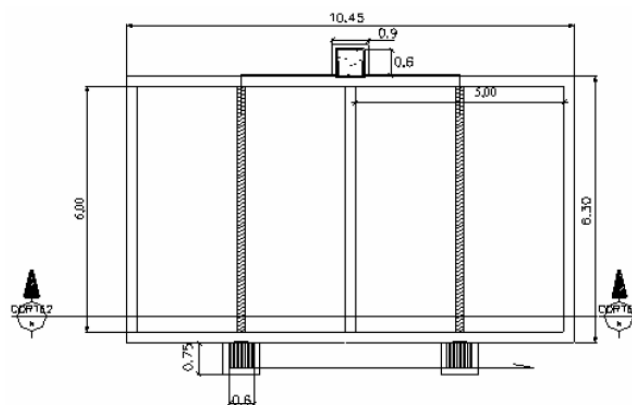
e valendo-se da Eq. 3.2 (página 29 desta dissertação), apresentada por Cornwell *et al.* (1987), a estimativa de quantidade de lodo produzido pelo tratamento é de aproximadamente 115,3 kg/dia.

O leito de drenagem construído possui área de 60 m<sup>2</sup> e altura de 0,50 m, conforme pode ser observado em planta (Figura 3.23) e corte (Figura 3.24), e é precedido por um sedimentador. Na concepção construída, a manta geotêxtil usada foi

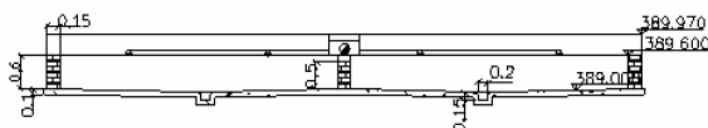
do tipo tecida de poliéster, de referência comercial MT 600 da Maccaferri, com densidade superficial de 600 g/m<sup>2</sup>, abertura de 0,06 a 0,13 µm e espessura de 4,4 mm.

Uma vez em funcionamento na ETA Cardoso, os leitos de drenagem demonstraram elevado desempenho no desaguamento com redução de 98% do volume de resíduos e qualidade do drenado quanto à turbidez, pH, série de sólidos e DQO, conforme Tabela 3.3.

Os valores de concentração de metais no lodo do decantador e na água livre drenada no protótipo de leito de drenagem obtidos por Fontana (2004) estão apresentados na Tabela 3.4. Tais dados permitem verificar que o leito de drenagem foi efetivo para a remoção dos metais e obedeceu alguns parâmetros de lançamento de efluentes líquidos estabelecidos na Resolução CONAMA 357/2005.



**Figura 3.23** – Planta dos módulos do leito de drenagem.  
*Fonte:* Fontana (2004).



**Figura 3.24** – Corte da estrutura do leito de drenagem.  
*Fonte:* Fontana (2004).

**Tabela 3.3** – Características do lodo de decantador e drenado do leito de drenagem de resíduos da ETA Cardoso.

PARÂMETROS	DECANTADOR		DRENADO	
	16/12/03	01/06/2004	16/12/03	01/06/2004
Turbidez (uT)	-	-	0,7	0,9
pH	6,6	7,0	6,6	6,8
Sólido sedimentável (mg/L)	860	850	0,08	0,03
Sólido total (mg/L)	98397	28263	261	285
Sólido fixo (mg/L)	30368	20032	102	107
Sólido volátil (mg/L)	68029	8231	159	178
Sólido suspenso total (mg/L)	25150	28400	18	14
Sólido suspenso fixo (mg/L)	1200	5350	5	4
Sólido suspenso volátil (mg/L)	23950	23050	13	10

(-) Não determinado

Fonte: Barroso (2007).

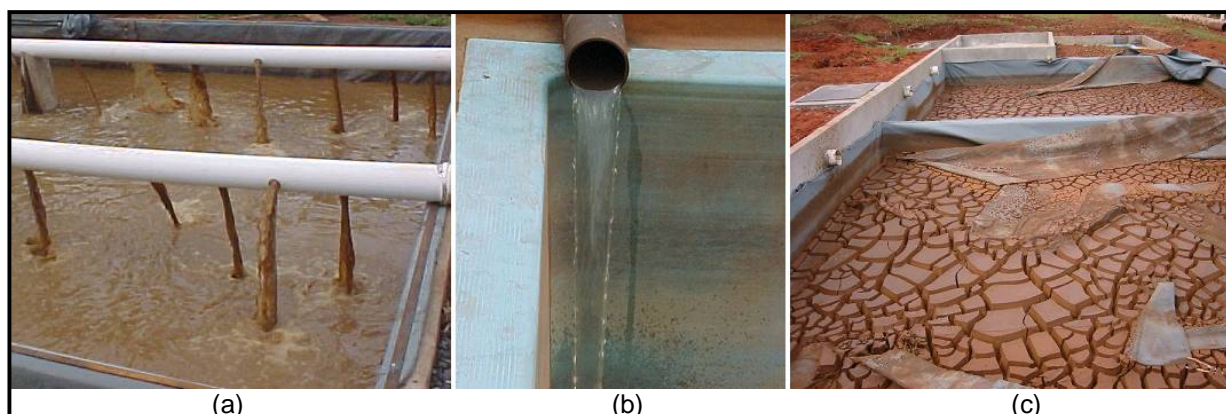
**Tabela 3.4** – Características do lodo de decantador da ETA Cardoso e do drenado resultante da aplicação no protótipo leito de drenagem.

PARÂMETROS	CONAMA 357	LODO DE DECANTADOR 06/2003.	DRENADO DO PROTÓTIPO
SST (mg/L)	500	22200	176
DQO (mg/L)	-	7500	26
Alumínio (mg/L)	0,1	1700	0,13
Cádmio (mg/L)	0,001	0,12	0,0081
Chumbo (mg/L)	0,03	2,66	0,021
Cobre (mg/L)	0,02	1,39	0,008
Cromo total (mg/L)	0,05	2,7	0,005
Ferro total (mg/L)	0,3	3014	0,77
Manganês (mg/L)	0,1	101	23,7
Mercúrio (mg/L)	0,0002	0,1	<0,001
Zinco (mg/L)	0,18	3,18	0,99
Fosfato total (mg/L)	0,025	33,72	0,09

(-) Não determinado

Fonte: Barroso (2007).

A Figura 3.25 apresenta uma sequência de fotos do leito de drenagem construído em Cardoso-SP, ilustrando o despejo do lodo no leito, a água livre drenada no momento inicial, e o lodo “seco” no fim das operações.



**Figura 3.25** – Leito de drenagem construído na ETA-Cardoso. Sequência ilustrando (a) o despejo do lodo no leito; (b) a água livre drenada; (c) o lodo “seco”.

Por fim, vale ressaltar que a pesquisa desenvolvida por Fontana demonstrou o potencial do uso do leito de drenagem para desaguamento de resíduos de ETAs, contudo, suas contribuições não avaliaram a influência das variáveis climáticas e não permitiram uma compreensão mais detalhada do comportamento dos resíduos de ETAs durante as fases de drenagem (filtração) e de secagem (evaporação).

Dentre suas considerações, Fontana (2004) ressaltou que as precipitações ocorridas nos períodos de secagem somente interferem se ocorrerem nos primeiros dias após o lançamento do lodo no leito. Apontou também que logo depois da retração dos sólidos, expondo a manta, as precipitações não mais interferem, fazendo com que essas águas sejam encaminhadas ao sedimentador e recuperadas.

#### **3.7.4.1.2 ETA Guanhães-MG**

A ETA de Guanhães<sup>8</sup> é do tipo convencional e seu manancial de captação é o ribeirão Graipu. Esta estação é gerenciada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) e utiliza sulfato de alumínio líquido (isento de ferro) como coagulante, cuja

<sup>8</sup> Exceto os valores estimados, todos os dados referentes à ETA de Guanhães-MG foram informados pela Supervisora de Tratamento e Controle de Qualidade: Viviane Queiroz Coelho.

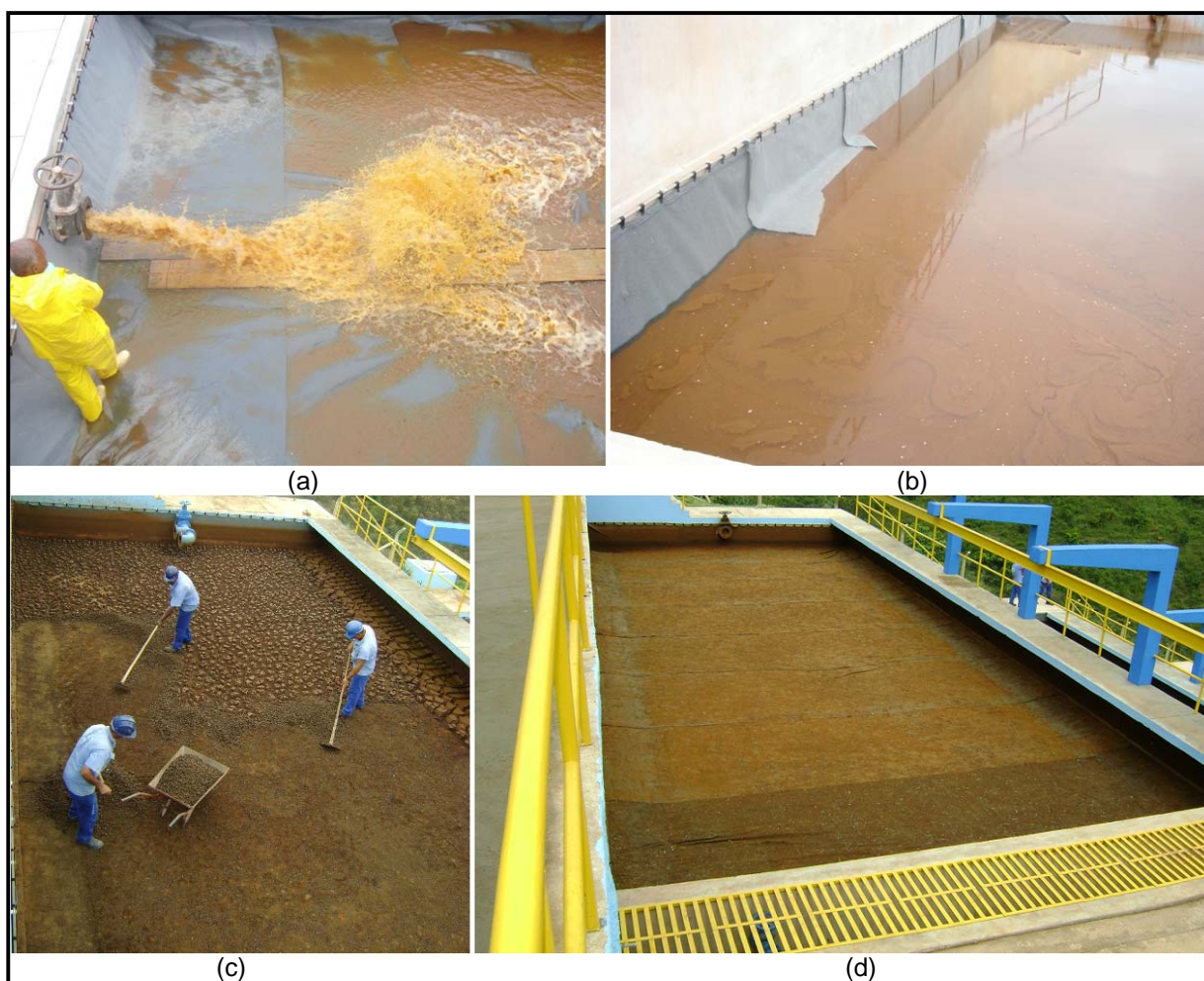
dosagem varia em função da época do ano (períodos secos e chuvosos), caracterizando uma média de 8,0 mg/L. Sua capacidade média de tratamento é de 60 L/s e, segundo análises de 2010, a turbidez da água bruta captada apresentou valor mínimo de 9,7 uT, máximo de 30,0 uT e médio de 15 uT Assim sendo, segundo Eq. 3.2 (página 29 desta dissertação – Cornwell *et al.*, 1987), o valor estimado de produção de lodo devido ao tratamento é de aproximadamente 134,8 kg/dia.

A ETA Guanhães possui quatro unidades de leito de drenagem instaladas e em funcionamento, cujas dimensões são 7,5 m de largura, 16,0 m de comprimento e aproximadamente 1,0 m de profundidade, resultando numa capacidade volumétrica total de 120 m<sup>3</sup>, cada. Os leitos de drenagem recebem lodo apenas dos decantadores e a água drenada em sua operação não é reciclada para o início do tratamento. Em épocas secas o tempo de exposição do lodo nos leitos de drenagem é de aproximadamente 30 a 45 dias para que este possa ser removido e, então, ser iniciada nova operação.

De acordo com supervisora do tratamento e da qualidade da ETA, as épocas chuvosas são as grandes “vilãs” dos leitos de drenagem, pois, segundo ela, durante as primeiras chuvas e até que haja estabilização climática, a turbidez da água bruta aumenta consideravelmente e conseqüentemente o volume de lodo depositado nos decantadores também aumenta. Associado a isso, tem-se, muitas vezes, o aumento considerável de algas no manancial de captação por se tratar de uma represa, o que favorece também o aumento do acúmulo de lodo nos decantadores. Verifica-se que principalmente no período de dezembro a março, a necessidade de limpeza dos decantadores aumenta. Assim, devido ao aumento da produção de lodo e ocorrência frequente de chuvas, neste período não é possível ocorrer o desaguamento total do

lodo entre uma e outra operação da tecnologia natural utilizada, obrigando a remoção do resíduo ainda úmido ou o despejo de resíduo bruto sobre o já em exposição no leito.

A sequência de fotos da Figura 3.26 ilustra o despejo do lodo em um dos leitos de drenagem, o leito de drenagem com lodo bruto, o lodo desaguado (“seco”), e o leito de drenagem preparado para receber novo despejo de lodo.



**Figura 3.26** – ETA Guanhães: (a) despejo de lodo em leito de drenagem; (b) leito de drenagem com lodo bruto; (c) remoção de lodo desaguado; (d) leito de drenagem pronto para receber novo despejo.  
Fonte: Coelho.

#### **3.7.4.1.3 ETA Guaira-SP**

A ETA de Guaíra-SP<sup>9</sup> é do tipo ciclo completo convencional, seu manancial de captação superficial é denominado ribeirão do Jardim (localizado na UGRHI 08 Sapucaí/Grande), e sua capacidade média de tratamento atualmente é de cerca de 130 L/s (BORBA *et al.*, 2011). O coagulante utilizado na mistura rápida é o sulfato férrico com dosagem que varia entre 5,0 e 7,0 mg/L. A água bruta captada apresenta valores médios de turbidez e cor de aproximadamente 16 uT e 90 uC, respectivamente. Assim, segundo Eq. 3.2 (página 29 desta dissertação – Cornwell *et al.*, 1987), o valor estimado de produção de lodo devido ao tratamento é de aproximadamente 299,22 kg/dia, o que se aproxima do valor estimado pela supervisora de controle de qualidade da estação, que foi de 95 t/ano. Esta ETA é gerenciada pelo Departamento de Esgoto e Água de Guaíra (DEAGUA) e possui quatro módulos de leito de drenagem implantados e em operação, cada um com capacidade volumétrica de 130 m<sup>3</sup> (dimensões igual a 20,0 x 13,0 x 0,5 m). Neste sistema de desaguamento implantado, assim como em Cardoso, a água drenada é reciclada para o início do tratamento, cujo despejo ocorre logo após a mistura rápida. Quando o lodo bruto do decantador e a água de lavagem do filtro (ALF) são despejados nos leitos de drenagem, a altura máxima que a massa de resíduo alcança dentro dos leitos é de 40,0 cm, contudo, após serem desaguados, esta altura corresponde a aproximadamente 2,0 a 3,0 cm. O resíduo bruto despejado nos leitos geralmente apresenta percentual de Sólidos Totais entre 1 e 2%, e o tempo médio de exposição do lodo no leito de drenagem para remoção de água varia entre 40 e 45 dias.

Diferentemente da ETA de Guanhães, segundo Borba, devido ao fato da capacidade volumétrica dos leitos de drenagem terem sido superdimensionada, não é

---

<sup>9</sup> Exceto os valores estimados, todos os dados referentes à ETA de Guaíra-SP foram informados pela Supervisora de Controle de Qualidade: Adriana Martins Peres Borba.



possível afirmar com propriedade a respeito de alteração na eficiência do sistema em períodos sazonais chuvosos, embora ela tenha afirmado que a remoção de água do resíduo nestes períodos varia entre 60 a 80 dias. Acrescentando, Borba afirmou que o “problema” que tiveram até o presente momento foi adiar a limpeza dos decantadores por no máximo 15 dias, e uma única vez.

A Figura 3.27 ilustra o leito de drenagem instalado na referida ETA.



**Figura 3.27** – Leito de drenagem ETA Guaíra: (a) disposição da manta geotêxtil; (b) leitos cheios; (c) leito de drenagem com lodo desaguado; (d) lodo “seco”.

Fonte: Borba.

### **3.8. DESAGUAMENTO DE LODO POR SISTEMA COBERTO**

Como na bibliografia consultada não foi encontrada aplicação de cobertura plástica em sistemas naturais de desaguamento de lodo de ETA, apresentam-se algumas aplicações destas estruturas em sistemas de desaguamento de lodo de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs).

Uma destas aplicações ocorreu na ETE Lavapés, gerenciada pela Sabesp e localizada em São José dos Campos-SP. Seu tratamento se utiliza de sistema de lodos ativados de alta taxa e possui uma taxa média de geração diária de lodo de esgoto de 30 toneladas (OLIVEIRA, 2008).

Nesta estação, a utilização de cobertura plástica para auxiliar no processo de remoção de água do lodo se deu devido à busca de alternativa para destinação final do lodo de esgoto. Segundo Oliveira (2008), uma primeira alternativa adotada pela ETE, antes da utilização de cobertura plástica, foi o processo de estabilização cálcica e posterior disposição em aterro sanitário. Contudo, devido ao oportunismo advindo com o processo de compostagem, já que este, além de permitir solução para o resíduo, pode resultar em produção de fertilizante agrícola e dispensa de disposição em aterros, a referida ETE passou a adotar esta alternativa, se utilizando também de coberturas plásticas para auxiliar na operação de secagem e manutenção de sólidos “secos”, conforme ilustra a Figura 3.28.

A adoção desta alternativa resultou na produção de fertilizante orgânico composto classe D<sup>10</sup>, que em 2008 possibilitou o registro da referida ETE no MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento).

Outras utilizações de cobertura plástica em ETEs para auxiliar na remoção de água de lodo que podem ser citadas são os casos da ETE São Luiz do Paraitinga-SP (Figuras 3.29 e 3.30) e ETE Embaú, em Cacheira Paulista-SP (Figura 3.31). Estes dois casos, conforme ilustram as Figuras 3.29, 3.30 e 3.31, tratam-se de aplicações de coberturas plásticas em leitos de secagem tradicionais.



**Figura 3.28** – Disposição do lodo de ETE em leiras de compostagem.  
Fonte: Oliveira (2008).

<sup>10</sup> *Fertilizante orgânico composto classe D*: “fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura” (MAPA – Instrução Normativa 23 de 31/08/2005).



**Figura 3.29** – Interior do leito de secagem coberto da ETE São Luiz do Paraitinga.  
*Fonte:* Van der Hoeven.



**Figura 3.30** – Leitos de secagem cobertos (ETE São Luiz do Paraitinga).  
*Fonte:* Van der Hoeven.



**Figura 3.31** – Leito de secagem coberto (ETE Embaú).  
Fonte: Van der Hoeven.

### 3.9. ALTERNATIVAS DE DESTINAÇÃO FINAL DE LODOS DE ETAS

Já existem várias opções para destinação final de lodos de ETAs em aplicação, em fase de estudos preliminares, bem como estudos consolidados, passíveis de aplicação. No entanto, recomenda-se que cada caso seja estudado de forma individualizada, confrontando análises de viabilidade técnica, econômica, ambiental e física. Algumas alternativas que podem ser citadas são:

- *Disposição em rede de esgoto*: esta alternativa, legislada pelo Decreto-Lei 8.468/76, do Estado de São Paulo, conforme aponta Reali (1999), consiste em uma das maneiras “mais baratas” de disposição final de lodos gerados em ETAs, já que não demanda nenhum tipo de tratamento, mas apenas tanque de equalização para diluição do lodo (sólidos dissolvidos < 20 mL/L). Entretanto, esta alternativa, segundo Dione Morita (2008), além de não ser uma prática legal

no Estado São Paulo (Lei 12.300/06 do Estado de São Paulo – nenhum resíduo sólido pode ser lançado no sistema público de esgoto), é considerada por muitos pesquisadores como simples transferência de problema de competência da ETA para ETE que, por sua vez, para receber e tratar este resíduo deve se adaptar cuidadosamente devido à distinção de características entre o lodo de ETA e o esgoto sanitário.

- *Disposição em aterros sanitários*: quando se tratar de lodo gerado a partir da coagulação química com sulfato de alumínio, segundo Doe (1990), recomenda-se que a torta final atinja concentrações de sólidos superiores a 25%. Logo, para que se adote esta alternativa, é necessário sistema prévio de adensamento do lodo.
- *Disposição controlada no solo*: previamente a esta ação estudos de caracterização do solo e do resíduo devem ser realizados cuidadosamente, ou seja, deve-se constatar que dispor o lodo no solo não ocorrerão impactos negativos a este solo receptor. Estudos realizados por Vandermeijden e Cornwell (1994) exemplificaram a disposição de lodos de ETAs em fazendas de cultivo de gramíneas. Outra constatação apontada por eles é que, com presença de alumínio no lodo, devido à grande afinidade de ligação deste elemento com o fósforo (que se faz presente no solo), pode ocorrer a indisponibilidade deste último para as plantas, inibindo seu desenvolvimento.
- *Co-disposição com biossólidos*: segundo Vandermeijden e Cornwell (1994), por geralmente apresentar menores teores de metais, o gerenciamento conjunto dos lodos de ETAs e dos biossólidos gerados em ETEs pode ser bastante vantajoso

do ponto de vista operacional, pois, uma vez constatada a diminuição nos teores de metais, a comercialização deste produto se tornaria ainda mais aceitável. A Resolução CONAMA 375/06 discute este assunto para o lodo de ETE.

- *Aplicações industriais:* existem vários exemplos desta alternativa já sendo aplicados e em estudos principalmente na fabricação de materiais utilizados na construção civil. Alguns exemplos podem ser a utilização na fabricação de materiais cerâmicos (tijolos, telhas, entre outros) e a utilização na construção de bases de certos tipos de pavimentos (Reali, 1999). A Figura 3.32 ilustra bloco cerâmico sem adição de lodo e bloco cerâmico com adição de lodo gerado na ETA de Nova Odessa-SP.
- *Incineração:* devido aos custos elevados e geração de cinzas que também necessitam de disposição adequada ou incorporação em algum tipo de produto, esta opção não é tachada como atrativa para a solução do problema.



**Figura 3.32** – Frente: bloco cerâmico sem adição de lodo; fundo: bloco cerâmico com adição de lodo da ETA de Nova Odessa-SP.

Fonte: Pessoa (2007).

Neste contexto, segundo Villela (2010), devido à disponibilidade de áreas economicamente acessíveis nas cidades de pequeno e médio porte, o aterro sanitário pode se apresentar como uma alternativa razoável para disposição final de lodos de ETAs no Brasil. Todavia, atentando-se para o custo de implantação e a vida útil de um aterro sanitário, cada metro cúbico poupado é indubitavelmente bem-vindo.

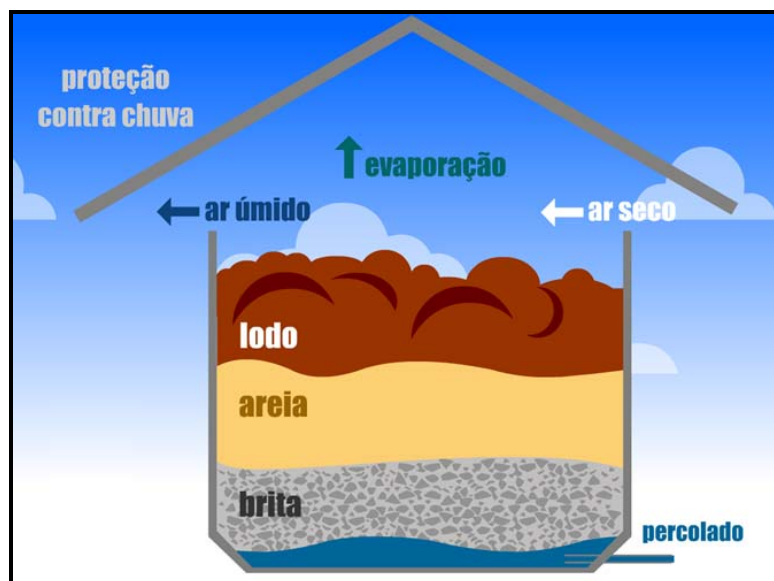
Segundo estudos realizados por Murray & Dillon (1994), nos Estados Unidos, dentre as práticas de disposição de lodos de ETAs, o aterro municipal é adotado em 20,7% das cidades com até 100 mil habitantes.

### **3.10. COBERTURAS PLÁSTICAS**

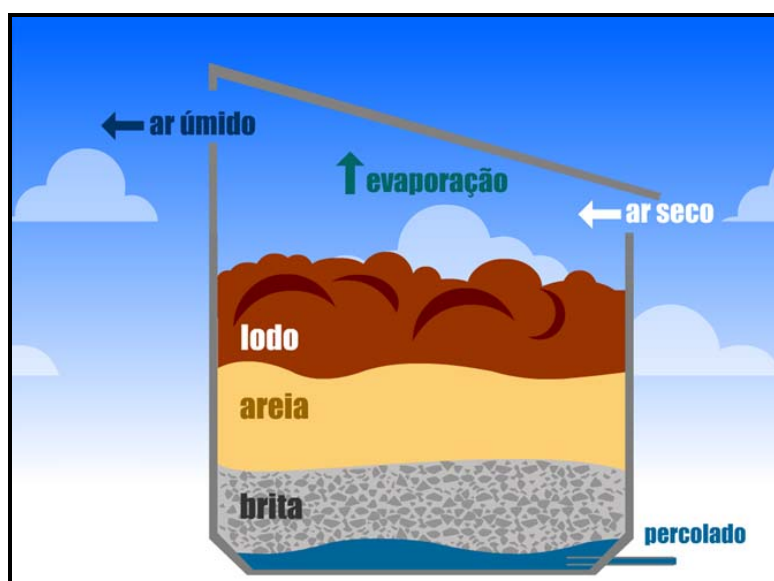
De acordo com pesquisas em andamento do PROSAB (2009) – Tema 4 (Subprojeto 2: Uso de energia solar para secagem e higienização), pesquisas referentes à aceleração no processo de secagem de lodos em leitos de secagem cobertos têm sido desenvolvidas. Segundo considerações de trabalhos desenvolvidos até o momento, dois tipos de coberturas têm se destacado: cobertura com renovação de ar ilimitada (Figura 3.33) e cobertura com renovação de ar limitada (Figura 3.34).

Qualquer processo de secagem se baseia no fato de que moléculas de água passem do estado líquido para o gasoso, transformando-se no chamado vapor. Entretanto, para que isso ocorra, certa quantidade de energia é requerida, podendo esta ser fornecida pelo Sol.





**Figura 3.33** – Esquema simplificado ilustrando a cobertura com renovação de ar ilimitada em leito de secagem tradicional.  
*Fonte:* <<http://www.finep.gov.br/Prosab/videos/6.swf>>. Acesso em: 17 set. 2009.



**Figura 3.34** – Esquema simplificado ilustrando a cobertura com renovação de ar limitada em leito de secagem tradicional.  
*Fonte:* <<http://www.finep.gov.br/Prosab/videos/6.swf>>. Acesso em: 17 set. 2009.

As formas de transmissão de calor, fundamentalmente diferentes e regidas por leis próprias, devem ser criteriosamente consideradas na concepção de estufas para

auxiliar na etapa de evaporação de água presente nos resíduos do saneamento. Estas formas de transmissão de calor são conhecidas como condução, convecção e radiação.

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura elevada para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato físico direto. Na transmissão de calor por condução, a energia é transmitida por meio de comunicação molecular direta, sem apreciável deslocamento das moléculas. De acordo com a teoria cinética, a temperatura de um elemento de matéria é proporcional à energia cinética média de suas moléculas constituintes. A energia intrínseca de um elemento de matéria, em virtude da velocidade e da posição relativa das moléculas, é chamada de energia interna. Assim, quanto mais rápido se movem as moléculas, maiores serão a temperatura e a energia interna do elemento da matéria. Quando as moléculas em uma região adquirem uma energia cinética média maior do que a das moléculas da região adjacente, o que se manifesta por uma diferença de temperatura, as moléculas possuidoras de maior energia transmitirão parte de sua energia para as moléculas da região de temperatura mais baixa, tendendo à uniformidade térmica de toda a região (KREITH, 1977).

Em se tratando de convecção, esta forma de transmissão de calor pode ser dita como uma operação de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. Se uma partícula fluida tiver contato com uma superfície aquecida, dilatar-se-á, isto é, aumentará seu volume mantendo o peso e tornando-se menos densa. Sendo assim, afastar-se-á da superfície quente, fazendo com que uma partícula mais densa, por estar fria, aproxime-se da superfície, propiciando, portanto, um autêntico trânsito de partículas, umas se afastando e outras se aproximando da fonte quente, são as chamadas correntes de convecção.

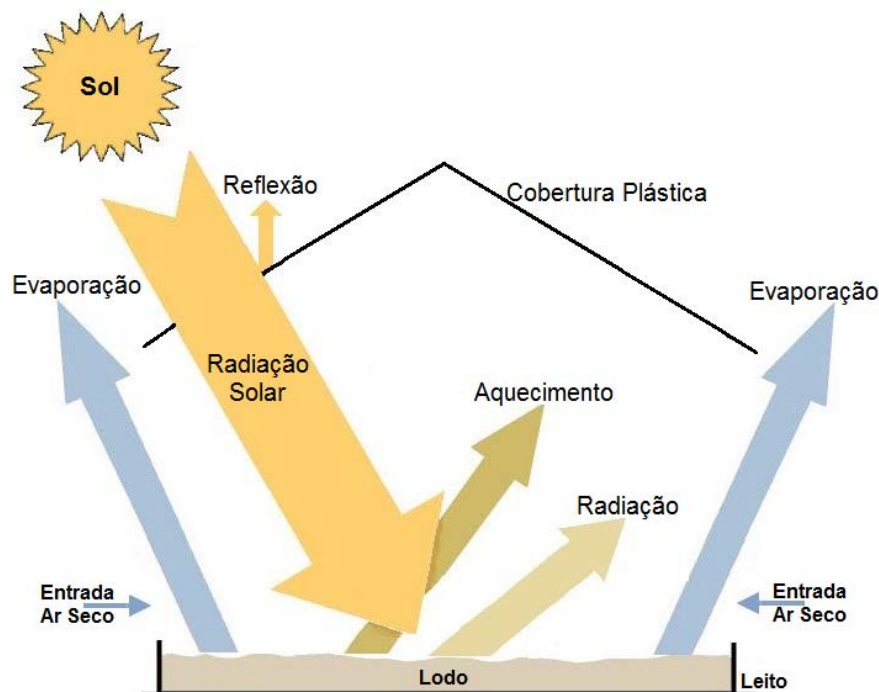
Como se observa, ocorre, de fato, um transporte de massa, mas, como a massa transportada altera o estado térmico, não se pode também deixar de caracterizar um transporte de calor. Essa convecção, unicamente comandada pela diferença de densidade de partículas, é chamada convecção livre ou convecção natural. Existe também a convecção forçada ou convecção artificial, que pressupõe a necessidade de emprego de elementos mecânicos responsáveis por circulação de fluidos, tais como ventiladores, exaustores, compressores, bombas, etc. (ARAÚJO, 1978).

A transmissão de calor por radiação ocorre quando o calor se transmite de uma região à outra, sem que o meio intermediário se aqueça. Na realidade são ondas eletromagnéticas de determinada faixa de comprimento de onda que, emitidas por um corpo, se caracterizam por atravessar um meio transparente e, ao encontrarem um meio que lhes seja opaco, são absorvidas, ocorrendo conseqüentemente uma transformação de energia radiante em energia térmica (ARAÚJO, 1978).

Uma vez conhecidas as três formas de transmissão de calor (condução, convecção e radiação) e as premissas consideradas para concepção de estufas tradicionais para cultivo de alimentos foram adaptados sistemas com coberturas plásticas (espécies de estufas) para aumentar a eficiência no desaguamento de resíduos dos serviços de saneamento (lodos). Entretanto, como, neste caso, o intuito é criar uma atmosfera artificial estritamente para secagem do lodo, a umidade gerada internamente à estufa deve ser liberada, ou seja, a fim de se evitar um equilíbrio entre a pressão de vapor dentro e fora do lodo, o ar deve ser liberado para fora da estufa. Esta liberação pode ser considerada como natural, já que existem aberturas laterais e o vapor d'água é menos denso que o ar seco (correntes convectivas: ar menos denso sobe e ar mais denso permanece nas camadas inferiores). Dessa forma, sintetizando-

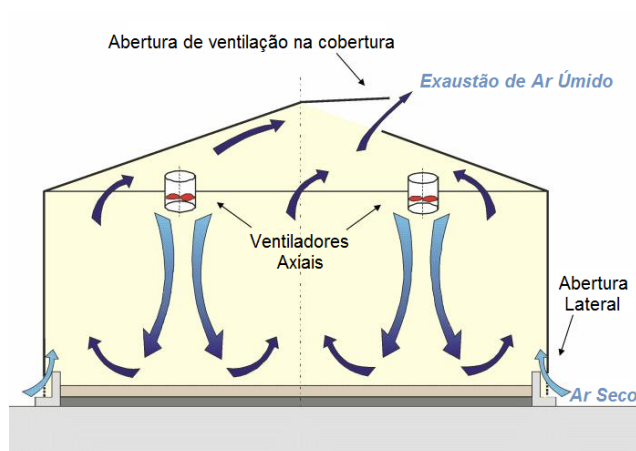
se a idéia, neste caso, o intuito não é prender o ar úmido (vapor d'água) internamente à cobertura, mas sim liberá-lo para o ambiente externo, de forma que se permita continuamente a entrada de ar seco na estrutura. A Figura 3.35 ilustra o esquema de funcionamento de uma estufa para desagramento de lodo em meio não mecanizado.

Existe também concepção de cobertura plástica para aceleração da operação de remoção de água de lodo possuindo abertura superior para ventilação e ventiladores axiais para auxiliar a evasão de ar úmido. A Figura 3.36 ilustra uma concepção como esta.



**Figura 3.35** – Esquema de funcionamento de desagramento de lodo em estufas.

Fonte: Adaptado de <<http://www.wendewolf.com/klssystem.php?lang=en>>. Acesso em: 6 out. 2009.



**Figura 3.36** – Esquema de funcionamento de desaguamento de lodo em estufas.

Fonte: Adaptado de <<http://www.wendewolf.com/klssystem.php?lang=en>>. Acesso em: 6 out. 2009.

As coberturas plásticas, assim como as placas solares devem possuir inclinação e orientação adequadas conforme região onde estiverem localizadas para que exista maior aproveitamento da radiação incidente, resultando em melhor direcionamento dos raios refratados e maior aquecimento interno.

Em se tratando de ângulo de inclinação da cobertura em relação ao solo, é importante que este seja igual ou mais próximo possível da latitude do local de instalação. Normalmente, adiciona-se  $10^\circ$  a este ângulo, para compensar a variação anual da declinação solar.

Quanto à orientação, é imprescindível que pelo menos um dos lados da cobertura (preferência para o lado de maior área, quando ocorrer) esteja voltado para o hemisfério oposto ao que se localiza, ou seja, se a cobertura for instalada em um leito no Brasil, um dos lados deve estar voltado para o Norte, já que o Brasil situa-se no hemisfério Sul.

### **3.11. MANTAS GEOTÊXTEIS**

A remoção de água por leito de drenagem consiste em duas etapas interdependentes, sendo uma delas a drenagem e outra, a evaporação. A primeira utiliza mantas geotêxteis, que são elementos filtrantes para remoção de água livre, enquanto a segunda, depende de fatores climáticos.

Simplificadamente, para que um elemento filtrante realmente atue com esta função, dois requisitos básicos devem ser atendidos: a capacidade drenante deve ser mantida eficiente (possuir eficiência hidráulica) e a retenção de partículas deve ser proporcionada. Portanto, para que o material constituído pelas mantas geotêxteis atue como elemento filtrante, este deve apresentar um coeficiente de permeabilidade elevado, para promover a capacidade drenante da água livre e uma distribuição de tamanho de poros que seja capaz de reter partículas floculentas ou sólidas.

Os filtros sintéticos, também denominados geotêxteis, são mantas permeáveis, flexíveis e finas produzidas a partir de fibras sintéticas e são produtos manufaturados a partir de diferentes polímeros e de variadas formas de fabricação (FREITAS, 2003).

A técnica utilizada na fabricação é que determina a estrutura do geotêxtil, ou seja, a estrutura de um geotêxtil é resultado do processo de combinação das fibras. Este processo pode dar origem aos geotêxteis conhecidos como tecidos, não-tecidos e tricotados.

Os geotêxteis tecidos possuem arranjo de fios ordenados, com entrelaçamento dos mesmos em duas direções, sendo fabricados pelo processo de tecelagem. Os geotêxteis não-tecidos possuem distribuição aleatória de fibras (monofilamentos constituídos ou cortados) sem direções preferenciais, sendo interligados por processos que envolvem ação mecânica/agulhagem, térmica ou química. Este tipo de geotêxtil,

devido a sua estrutura mais complexa em relação aos tecidos, quando utilizados como filtros, não atua com uma simples face, e sim como um meio tridimensional, já que a espessura torna a ser um parâmetro adicional. Por fim, os geotêxteis tricotados são obtidos pela associação de técnicas de tricotagem e tecelagem na urdidura (FREITAS, 2003).

Uma condição fundamental para a utilização de geotêxtil consiste na avaliação das propriedades essenciais para que o tipo escolhido suporte a fase de instalação, bem como demonstre desempenho satisfatório no que se refere à sua vida útil. Uma vez em uso, os geotêxteis encontram-se sujeitos a diversos processos de degradação, com destaque para os de origem mecânica e química.

A manta geotêxtil escolhida para a realização dos ensaios nas pesquisas de leito de drenagem já citadas – Fontana (2004) e Barroso (2007) – possuíam densidade superficial de 600 g/m<sup>2</sup> e suas características estão apresentadas na Tabela 3.5. Esta escolha se deu, pois, nesta condição, experimentos realizados por Cordeiro (2001) e Achon & Cordeiro (2003) apresentaram melhores desempenhos de drenagem.

**Tabela 3.5** – Características da manta geotêxtil utilizada.

<b>CARACTERÍSTICAS DA MANTA</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>600g/m<sup>2</sup></b>
Espessura	mm	4,5
Porosidade	%	> 90
Permeabilidade normal	cm/s	3 x 10 <sup>-1</sup>
Abertura	µm	60

*Fonte:* Barroso (2007).

Ensaio realizado por Cordeiro (2001) em leitos de drenagem apontaram que ao remover os sólidos desaguados da manta geotêxtil para aplicação de nova carga de lodo no leito, algumas mantas testadas apresentaram pontos acentuados de

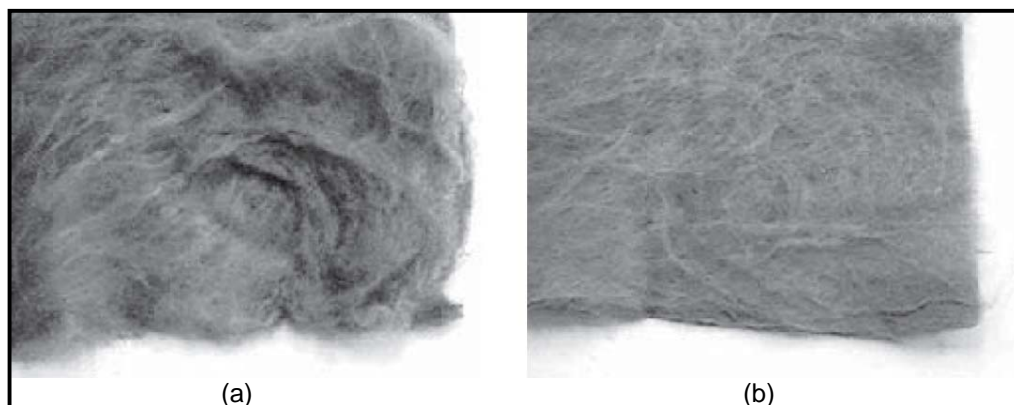
degradação. Tais mantas são de características tecidas de baixa densidade (150, 200 e 500 g/m<sup>2</sup>), conforme apresentado na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6** – Características das mantas geotêxteis tecidas utilizadas nos ensaios.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	OP-15	OP-20	OP-50	OP-60
Espessura	mm	1,5	2	4,1	4,5
Densidade Superficial	g/m <sup>2</sup>	150	200	500	600
Porosidade	%	>90	>90	>90	>90
Permeabilidade normal	cm/s	3 x 10 <sup>-1</sup>	3 x 10 <sup>-1</sup>	3 x 10 <sup>-1</sup>	3 x 10 <sup>-1</sup>
Abertura	μm	150	130	70	60
Peso	kg/m <sup>2</sup>	0,15	0,20	0,50	0,40

Fonte: Cordeiro (2001).

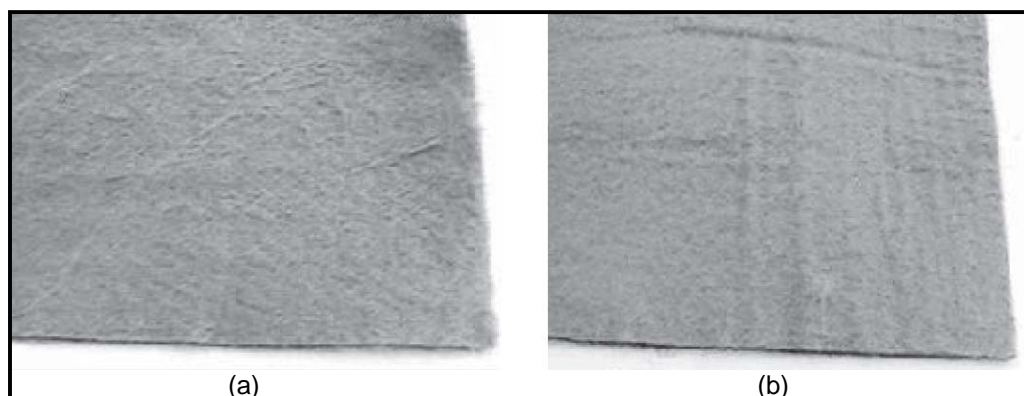
As Figuras 3.37 e 3.38 ilustram resultados de ensaios realizados por Cordeiro (2001) com mantas tecidas OP-15, OP-20, OP-30 e OP-60 após remoção dos sólidos desaguados e lavagem com hidrojateamento, por meio de máquinas domésticas existentes no mercado.



**Figura 3.37** – Resultado da ação do jato de água sobre as mantas de pequena espessura: (a) manta OP-15; (b) manta OP-20.

Fonte: Cordeiro (2001).





**Figura 3.38** – Resultado da ação do jato de água sobre as mantas de grande espessura: (a) manta OP-30; (b) manta OP-60.  
*Fonte:* Cordeiro (2001).

Assim, as conclusões obtidas com estes ensaios foram no sentido de que a utilização destas mantas mais finas e menos densas (OP-15, OP-20 e OP-30) não é eficiente se o tipo de limpeza utilizado for por meio de jatos de água de alta pressão.

### **3.12. UTILIZAÇÃO DE POLÍMEROS PARA CONDICIONAMENTO/ADENSAMENTO DE RESÍDUOS DE ETAs**

De maneira geral, o método de tratamento do resíduo de uma ETA atua sobre algumas características principais do lodo, sendo elas, a forma, o tamanho e a distribuição do tamanho das partículas, a carga superficial e o grau de hidratação das partículas.

Tendo isso em vista, juntamente com o fato da resistência específica dos lodos adensados ser um fator importante para a determinação prévia de seu grau de desaguamento, Di Bernardo *et al.* (2002) apontam que, quanto menor a resistência específica mais fácil o desaguamento e, para reduzi-la, torna-se necessário seu condicionamento, que pode ser químico, físico ou biológico.

O uso de polímeros pode ser classificado como um condicionamento/adensamento químico. Dentre os polímeros empregados existem o natural (amidos em geral) e o sintético, e, dependendo da carga elétrica que possuem em solução aquosa, podem ser classificados como catiônicos, aniônicos ou não-iônicos. Por serem solúveis em água, a viscosidade resultante da solução com polímeros depende do peso molecular e da carga iônica deles. Os polímeros podem ser usados na clarificação e adensamento por gravidade e por flotação. Eles aderem às superfícies das partículas e causam a dessorção de água superficial quimicamente ligada a elas, a neutralização da carga e a aglomeração entre pequenas partículas. Assim, o resultado de sua utilização é a produção de um lodo mais facilmente desaguado (Di BERNARDO *et al.*, 2002).

O tipo de polímero a ser empregado depende do pH do resíduo. De acordo com Reali (1999), geralmente os polímeros catiônicos são mais eficientes em valores de pH abaixo de 7,0 e os não-iônicos e aniônicos funcionam satisfatoriamente em valores de pH entre 6,5 e 8,5. Já resíduos com pH acima de 8,5, o recomendado seria o aniônico.

### **3.13. ANÁLISE CRÍTICA DA BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

Por se tratar de uma pesquisa cujo objeto de estudo consiste numa tecnologia relativamente recente (desenvolvida e estudada por alguns pesquisadores a partir de 2001), deparou-se com muita dificuldade para se encontrar referências bibliográficas capazes de contribuir especificamente com o assunto leito de drenagem.

Muitas referências citadas e encontradas enfocam apenas a eficiência dos processos de tratamento de água e, principalmente, a qualidade do produto final: a água tratada. Indubitavelmente isto é muito importante, entretanto, é fundamental que trabalhos abordem cada vez mais uma visão gerencial abrangente. Ou seja, no caso do

tratamento de água, os resíduos gerados, seu tratamento e disposição final devem ser sempre considerados.

Algumas informações conceituais e princípios físicos essenciais para justificar alguns dos assuntos envolvidos na proposta em questão tiveram que ser estudados separadamente, sendo, num segundo momento, sintetizados para argumentar e expor idéias que despertaram interesse para se buscar aceleração na operação de remoção de água dos lodos de ETAs em leitos de drenagem.

Por outro lado, vale ressaltar que, embora quase sempre com co-autoria, orientação ou referências de Cordeiro, recentemente, muitos artigos científicos, alguns capítulos de livros, dissertações e teses tem abordado assuntos ligados ao presente trabalho de maneira a contribuir efetivamente com a evolução do conhecimento sobre o tema.

## 4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 4.1. MATERIAIS NECESSÁRIOS

Os materiais utilizados para realização da pesquisa foram:

- 2 protótipos de leitos de drenagem construídos em chapa galvanizada, barras de aço, grelha, entre outros (Figura 4.1);



Figura 4.1 – Protótipo de leito de drenagem.

- 2 “minileitos” de drenagem em escala de laboratório construídos em madeira (Figura 4.2);

- Tubos de aço e aproximadamente 5m<sup>2</sup> de tecido plástico do tipo PVC 0,30mm para a construção da cobertura;

- Mantas geotêxteis tecidas e não-tecidas de 150, 200, 300, 400 e 600 g/m<sup>2</sup>;

- Polímero catiônico (Praestol 853 BC) para preparação das soluções;



Figura 4.2 – Minileito de drenagem.

- Tubos em PVC e registros para construção de um sistema sifão para coleta do lodo do fundo do decantador; e
- Materiais e equipamentos necessários para realização das análises laboratoriais.

#### 4.2. MÉTODOS

Num primeiro momento, o plano de pesquisa inicial visava à construção de dois leitos de drenagem em alvenaria na ETA de São Carlos-SP. Foi elaborado um projeto de construção e encaminhado à direção da ETA em questão que, mesmo aprovando a construção e se comprometendo em executar a obra, por motivos internos, não pôde executá-la efetivamente, restando apenas a alternativa de realização de ensaios em protótipos de leito de drenagem.

Os métodos aplicados podem ser divididos em métodos para realização de ensaios preliminares e métodos para realização de ensaios efetivos. Os primeiros se

referem à execução dos ensaios em minileito em escala de laboratório, enquanto os últimos, em protótipo de leito de drenagem colocados na ETA de São Carlos-SP.

A Figura 4.3 contém um fluxograma resumido dos métodos adotados para o desenvolvimento da pesquisa.

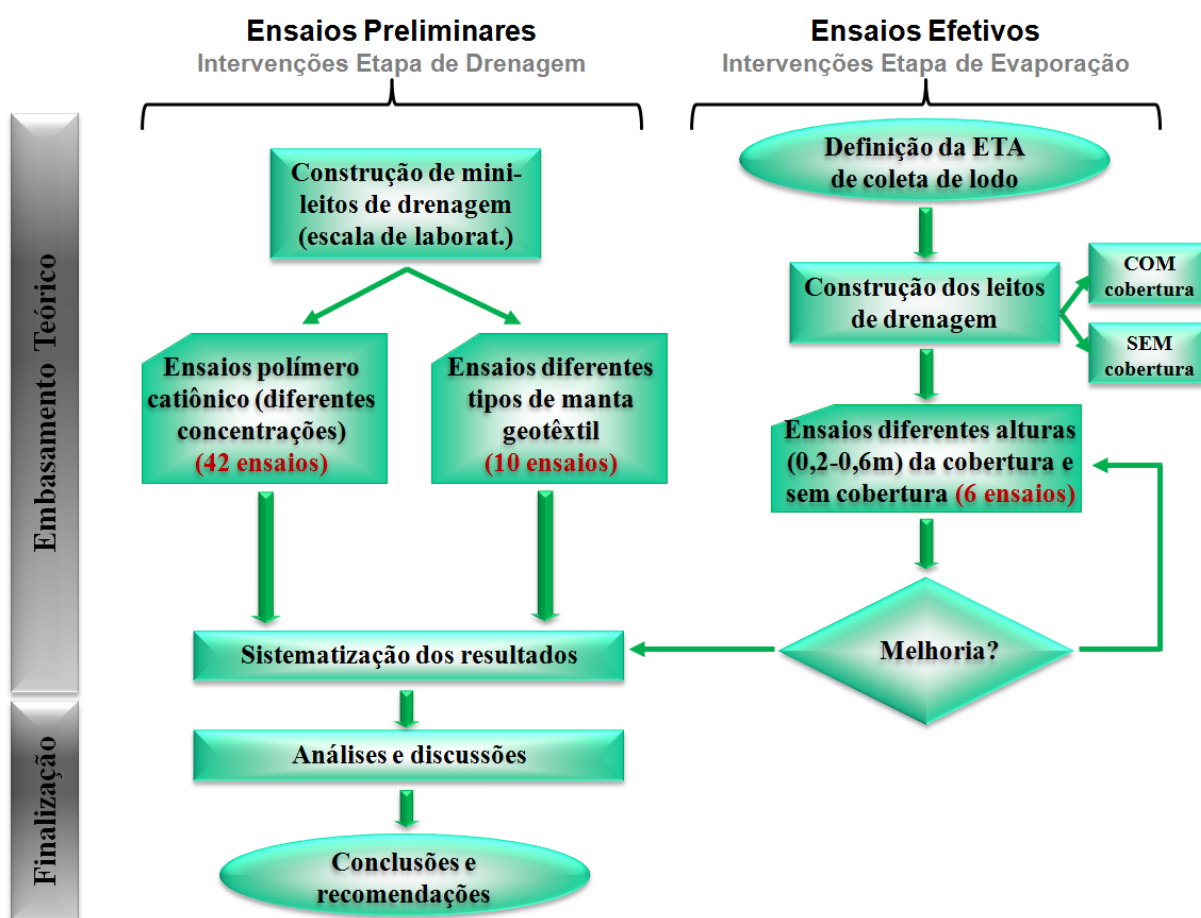


Figura 4.3 – Fluxograma resumido dos métodos de pesquisa.

#### 4.2.1 Métodos para ensaios preliminares (etapa de drenagem)

Estes métodos podem ser divididos em duas ações:

**Ação 1.** - Ensaios com polímero catiônico em “minileito” em escala de laboratório.

Com o intuito de buscar resultados para a etapa de drenagem do leito, foi construído sistema simplificado em escala de laboratório para serem realizados ensaios de duração de 1 (um) minuto utilizando polímero catiônico (Praestol 853 BC). Este tempo foi definido a partir da realização de ensaios prévios com volumes de lodo bruto de 280 mL, onde se observou que, geralmente, na ausência de polímero, após 1 (um) minuto a vazão drenada diminuía drasticamente, passando a gotejar.

Foram preparadas soluções de polímero com concentrações de 1,0 (0,10%), 2,0 (0,20%), 2,5 (0,25%), 3,0 (0,30%), 4,0 (0,40%) e 5,0 g/L (0,50%), e de cada uma dessas soluções foram adicionados volumes de 2,5, 5,0, 7,5, 10,0, 15,0 e 20,0 mL a 280 mL de lodo bruto, conforme esquema representativo mostrado pela Figura 4.4. Estes ensaios também foram realizados com amostras de lodo sem adição do referido polímero catiônico para comparação dos resultados. Assim, em todos os ensaios despejou-se a mistura (polímero catiônico e lodo bruto) e também apenas o lodo bruto no minileito de drenagem constituído de meio filtrante (manta geotêxtil), o que resultou na realização de 42 ensaios. Nestes ensaios a manta geotêxtil utilizada foi do tipo tecida de densidade superficial 600 g/m<sup>2</sup>.

As sete amostras preparadas para realização dos ensaios foram nomeadas da seguinte forma:

*Amostra 1:* 280 mL de lodo de decantador + “X” mL de polímero catiônico a 0,10%

*Amostra 2:* 280 mL de lodo de decantador + “X” mL de polímero catiônico a 0,20%

*Amostra 2,5:* 280 mL de lodo de decantador + “X” mL de polímero catiônico a 0,25%

*Amostra 3:* 280 mL de lodo de decantador + “X” mL de polímero catiônico a 0,30%

*Amostra 4:* 280 mL de lodo de decantador + “X” mL de polímero catiônico a 0,40%

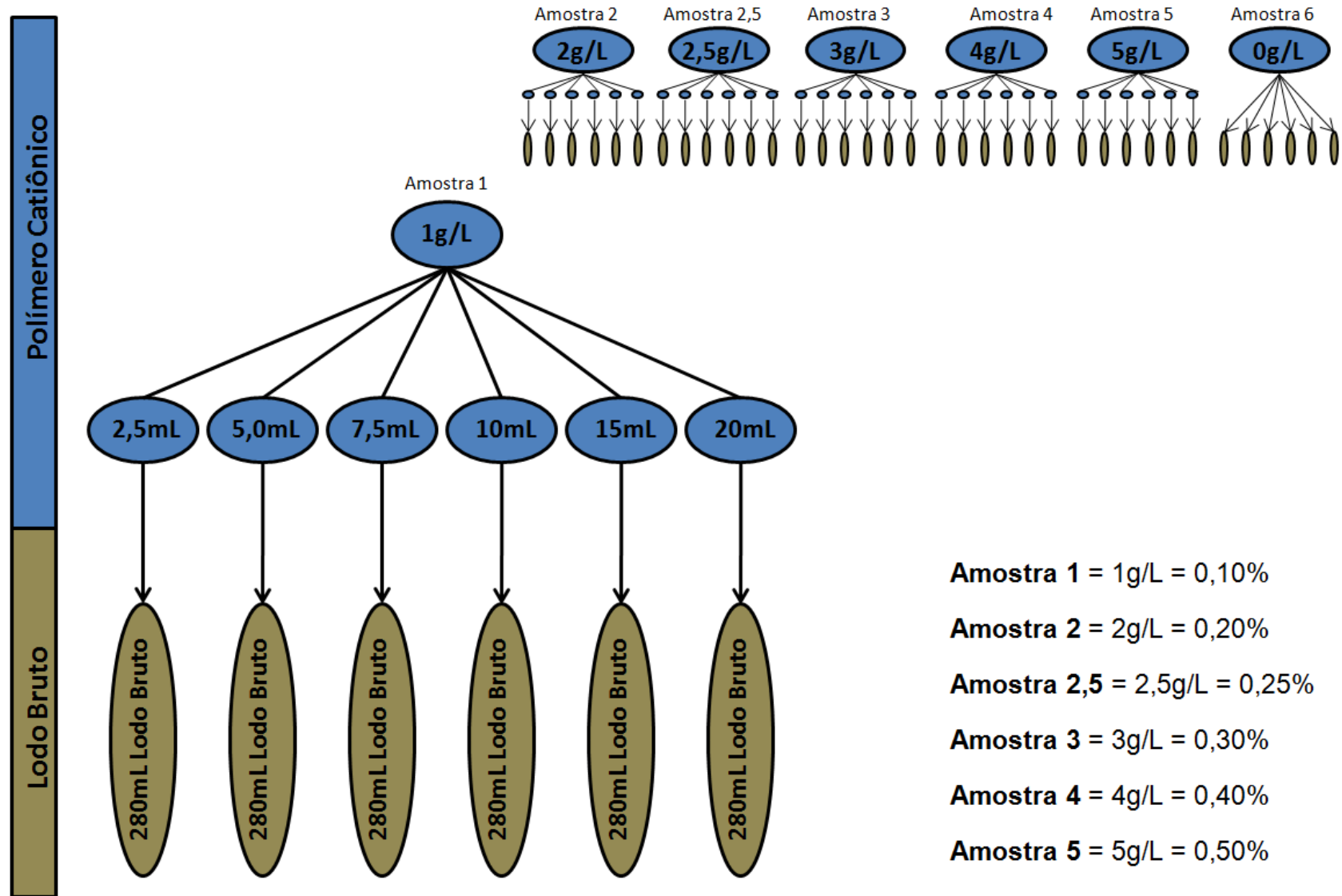


Figura 4.4 – Esquema representativo dos ensaios com polímero catiônico.



Amostra 5: 280 mL de lodo de decantador + "X" mL de polímero catiônico a 0,50%

Amostra 6: 280 mL de lodo de decantador SEM utilização de polímero catiônico sendo, "X" os volumes variáveis de 2,5 mL a 20,0 mL.

A Figura 4.5 ilustra a realização de um ensaio utilizando polímero catiônico (10 mL a 0,25%).



Figura 4.5 – Etapas de ensaio com polímero catiônico: (a) preparação de solução e mistura com lodo bruto; (b) despejo no minileito de drenagem; (c) drenagem da água livre; (d) amostras de água drenada.

**Ação 2.** - *Ensaio com mantas geotêxteis de diferentes características em minileito de drenagem em escala de laboratório.*

O mesmo minileito de drenagem utilizado nos ensaios anteriores foi também utilizado para realização de ensaios com mantas geotêxteis de diferentes características. As mantas utilizadas nesta ação comparativa foram do tipo tecida e não-tecida. Dentre as não-tecidas foram realizados ensaios com mantas de 150, 200, 300 e 400 g/m<sup>2</sup>, e, para o tipo tecido, realizaram-se ensaios apenas com manta de 600 g/m<sup>2</sup>. O tipo tecido já havia sido usado em pesquisas anteriores, portanto, este procedimento consistiu num comparativo de possível melhoria ao se utilizar outros geotêxteis ou de confirmação do geotêxtil comumente utilizado em pesquisas anteriores (600 g/m<sup>2</sup>). Os tipos de geossintéticos não-tecidos não foram criteriosamente escolhidos, mas por possuírem características diferentes e existir disponibilidade, foram utilizados. Para cada tipo de manta foram realizados dois ensaios: um com duração de 1,5 minutos e outro com duração de 1,0 minuto, totalizando 10 ensaios. Estes tempos, assim como na ação anterior, foram definidos a partir da realização de ensaios prévios e, neste caso, por existir maior variação de tempo para que a vazão drenada diminuísse ao ponto de gotejar, definiu-se estes dois períodos: 1,0 e 1,5 minutos. Em cada um dos ensaios foi utilizada uma amostra de 250 mL de lodo bruto de decantador e, após finalização, realizada análise de cor, turbidez e medição do volume drenado. Realizou-se também medição do valor de pH da amostra bruta, baseando-se, em todas as análises, em metodologias do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 21<sup>st</sup> edition*. A Figura 4.6 representa esquematicamente os ensaios realizados nesta ação.

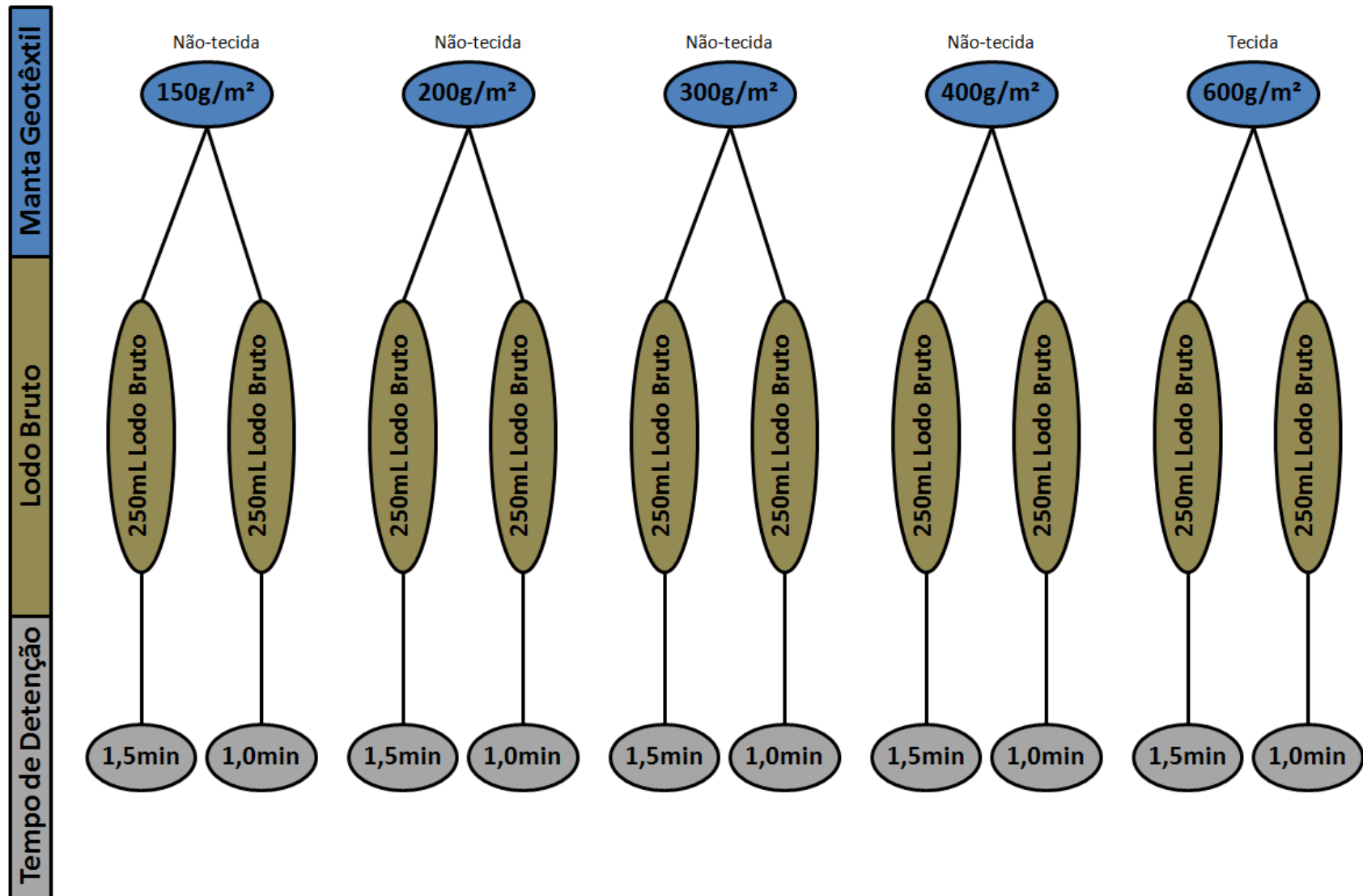
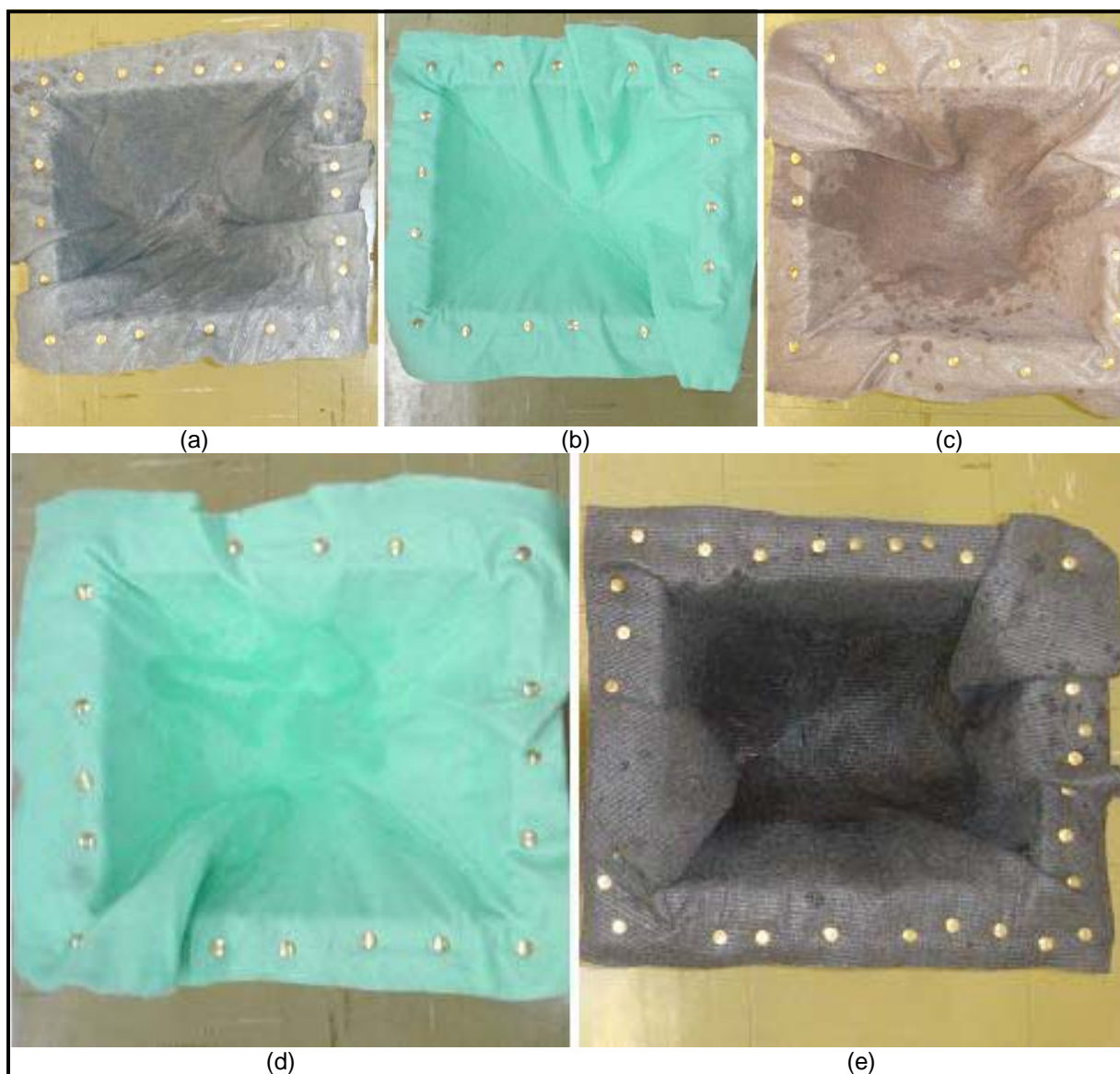


Figura 4.6 – Esquema representativo dos ensaios com mantas geotêxteis.

Para efetuar a troca da manta geotêxtil removia-se a manta anterior da estrutura de madeira e, com o auxílio de tarraxas e pregos, fixava-se a nova manta. A Figura 4.7 ilustra os tipos de mantas geotêxteis utilizados.



**Figura 4.7** – Mantas geotêxteis utilizadas nos ensaios em minileito de drenagem: (a) não-tecida 150 g/m<sup>2</sup>; (b) não-tecida 200 g/m<sup>2</sup>; (c) não-tecida 300 g/m<sup>2</sup>; (d) não-tecida 400 g/m<sup>2</sup>; (e) tecida 600 g/m<sup>2</sup>.

#### 4.2.2 Métodos para ensaios efetivos (etapa de evaporação e drenagem)

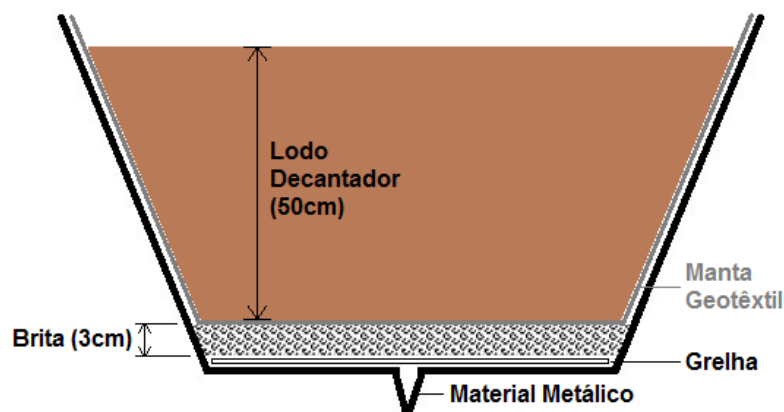
Estes métodos podem ser divididos em sete ações:

**Ação 1.** - Reforma e reajustes realizados em dois protótipos de leito de drenagem.

Foi realizada a reforma e alguns reajustes em dois protótipos de leito de drenagem idênticos existentes construídos em material metálico galvanizado (Figura 4.8). Estes protótipos foram transportados para a ETA do município de São Carlos-SP, onde foi adicionada uma grelha, uma camada de aproximadamente 3 cm de brita 01, e manta geotêxtil tecida com densidade superficial de 600 g/m<sup>2</sup>, conforme esquema representativo (Figura 4.9). Cada um destes leitos possui uma capacidade volumétrica máxima aproximada de 260 litros.



**Figura 4.8** – Protótipo de leito de drenagem utilizado nos ensaios.



**Figura 4.9** – Esquema representativo do protótipo de leito de drenagem utilizado nos ensaios.

**Ação 2.** - Estudo da melhor conformação e construção de cobertura para ser utilizada em um dos leitos de drenagem.

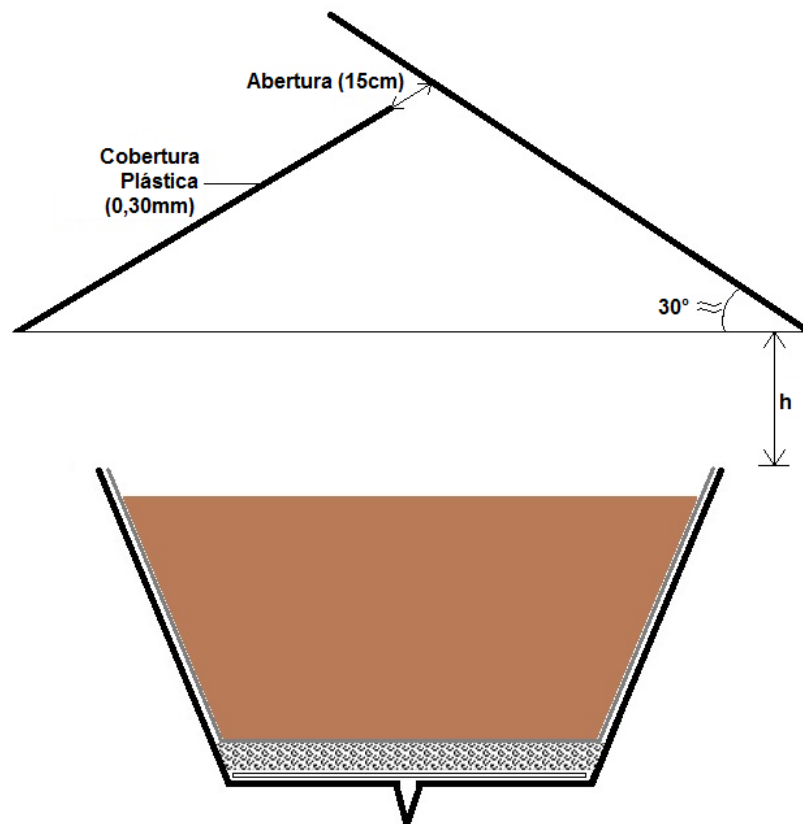
Objetivando-se melhorias principalmente na etapa de evaporação do leito de drenagem, foi estudada a melhor conformação para se construir a cobertura a ser utilizada em um dos protótipos de leito de drenagem. Esta cobertura foi construída em tubos de aço de tal forma que sua área de projeção horizontal ultrapassa em 20% a área superficial do leito, possuindo uma abertura superior para facilitar a ventilação (Figuras 4.10 e 4.11). A mesma possui um sistema ajustável de mudança de altura, com cinco ajustes. Tais ajustes variam de 10 em 10 cm iniciando em 20 cm (na posição mais baixa) e finalizando em 60 cm (na posição mais alta) em relação à borda do leito. O material utilizado para envolver a estrutura da cobertura é de referência comercial plástico PVC 0,30 mm transparente.



**Figura 4.10** – Protótipo de leito de drenagem com cobertura plástica e ajuste de altura utilizado nos ensaios.

**Ação 3.** - *Construção de sistema sifão para coleta do lodo diretamente do decantador.*

Para facilitar a coleta e permitir coletas de lodo mais homogêneas, foi construído um sistema sifão de tubos de PVC que permite a captação do lodo do fundo de um dos decantadores da ETA para local próximo dos protótipos coberto e sem cobertura, utilizados para realização dos ensaios. Este sistema sifão construído possui registros nas extremidades para facilitar o manuseio (Figura 4.12).



**Figura 4.11** – Esquema representativo do protótipo de leito de drenagem com cobertura plástica e ajuste de altura utilizado nos ensaios.



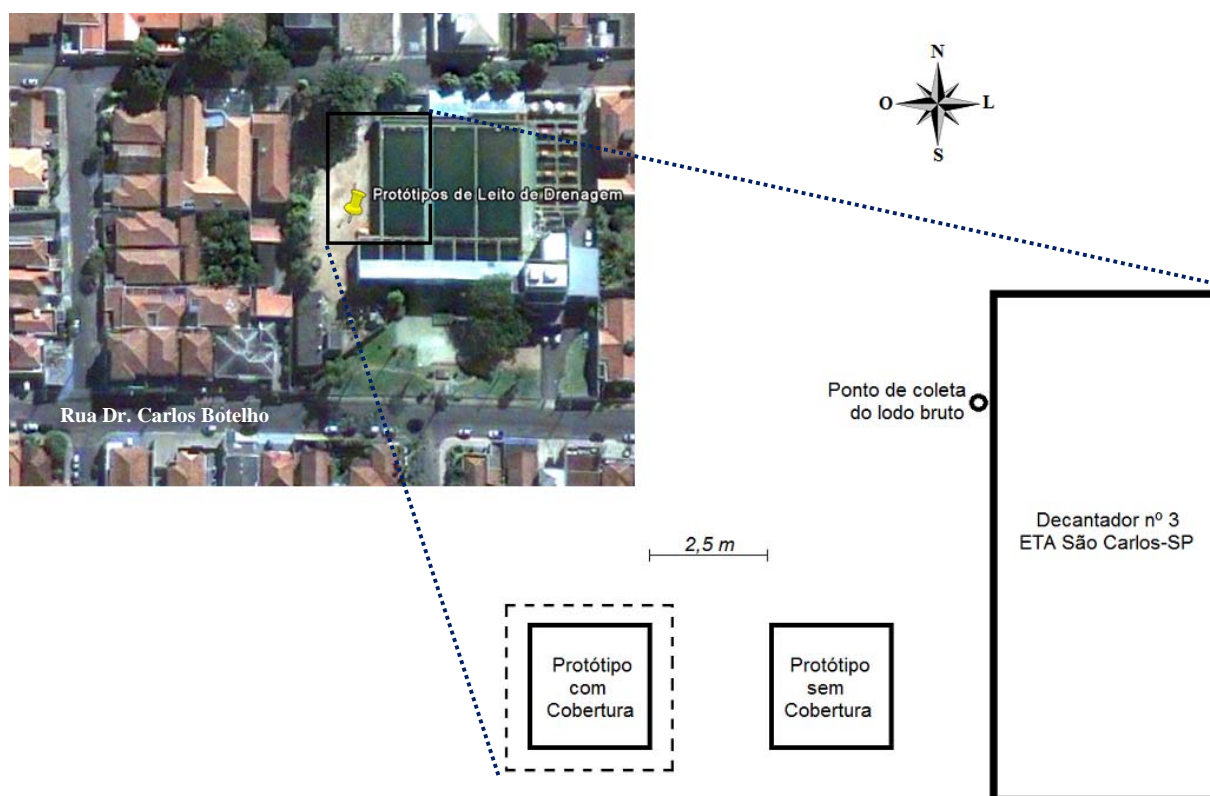
**Figura 4.12** – Sistema sifão para coleta de lodo bruto: decantador, à direita; coleta, à esquerda.



**Ação 4.** - Ensaio testes iniciais nos leitos de drenagem com e sem cobertura.

Em um primeiro momento foram realizados ensaios testes iniciais nos protótipos para se verificar possíveis ajustes no posicionamento dos leitos e na cobertura para viabilizar os objetivos propostos nesta pesquisa.

A Figura 4.13 ilustra o local definido para se alocar os protótipos de leito de drenagem na ETA de São Carlos.



**Figura 4.13** – Localização dos protótipos de leito de drenagem na ETA de São Carlos-SP.

**Ação 5.** - Ensaio realizados nos leitos de drenagem com e sem cobertura.

Foram realizados seis ensaios efetivos simultâneos nos leitos de drenagem com e sem cobertura, sendo, nos com cobertura, dois realizados com cobertura a 20 cm de altura em relação ao leito e os outros quatro nas demais alturas: 30, 40, 50 e 60 cm

(conforme representado na Figura 4.11). Cada um destes ensaios se iniciou no mesmo dia e horário (início simultâneo no leito com e sem cobertura) para se verificar provável melhoria na remoção de água devido à utilização de cobertura em um dos protótipos, bem como obter uma curva temporal de remoção de água do lodo comparando resultados para o leito coberto e sem cobertura. A altura média atingida pelo lodo bruto despejado nos protótipos foi de aproximadamente 50 cm, ou seja, o volume de lodo despejado nos protótipos foi de aproximadamente 220 litros. O período médio de duração de cada ensaio foi de sete dias. As realizações dos ensaios se concentraram no fim do inverno e início da primavera do ano de 2010. A Figura 4.14 ilustra parte da realização de um ensaio.



**Figura 4.14** – Drenagem inicial do lodo bruto de decantador coletado.

**Ação 6.** - *Coletas diárias de amostras no leito com e sem cobertura e coleta de dados climáticos.*

As amostras de lodo em cada um dos ensaios foram coletadas diariamente e em frascos de vidro, e, no dia de início dos ensaios, era coletada amostra de lodo bruto. Dados climáticos (temperatura, umidade relativa, horas de brilho solar, nebulosidade e velocidade do vento) referentes aos dias de realização dos ensaios foram coletados na Estação Meteorológica da UFSCar/INMET (estação automática de superfície).

**Ação 7.** - *Análises laboratoriais das amostras coletadas, separadamente.*

As análises realizadas para o lodo bruto foram pH e sólidos (Sólidos Totais, sólidos suspensos totais, sólidos suspensos fixos, sólidos suspensos voláteis, sólidos dissolvidos totais, sólidos dissolvidos fixos, sólidos dissolvidos voláteis). Para monitoramento do aumento do percentual de Sólidos Totais no tempo nos protótipos coberto e sem cobertura, foram realizadas análises diárias de Sólidos Totais existentes nas amostras coletadas diariamente. Em relação à água drenada, as análises realizadas foram pH, cor, turbidez e metais (alumínio, ferro, cromo, manganês, fósforo, fosfato e cobre). As análises de metais foram realizadas através de método Hach (2008) para todos os metais. As metodologias utilizadas se basearam no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 21<sup>st</sup> edition* e, exceto as análises de metais, que foram realizadas no laboratório da ETA de São Carlos, todas as demais análises foram realizadas no laboratório de Saneamento da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar/DECiv).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como os métodos apresentados para o desenvolvimento da pesquisa apontam intervenções na etapa de drenagem (polímero catiônico e mantas geotêxteis – ensaios preliminares) e de evaporação (cobertura plástica – ensaios efetivos), segue apresentação dos resultados obtidos de acordo com esta lógica.

### 5.1. INTERVENÇÕES NA ETAPA DE DRENAGEM DO LEITO DE DRENAGEM (ENSAIOS PRELIMINARES)

#### 5.1.1. Ensaios com polímero catiônico

Os resultados obtidos para os 42 ensaios realizados com polímero catiônico em “minileito” em escala de laboratório constam nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6. Nas tabelas mencionadas apresentam-se valores referentes às análises de pH, cor, turbidez e volume, todas realizadas a partir do drenado obtido no tempo de 1 (um) minuto do despejo de cada amostra no “minileito”. Para o lodo bruto utilizado em todos os ensaios foi realizada análise prévia de pH, cujo valor obtido foi de 6,6.

**Tabela 5.1** – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 2,5 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero.

AMOSTRAS (pág. 85-87)	pH	COR (uC)	TURBIDEZ (uT)	VOLUME (mL)
Amostra 1	6,4	440	116	100
Amostra 2	6,4	490	130	110
Amostra 2,5	6,4	500	123	114
Amostra 3	6,3	560	99	114
Amostra 4	6,3	580	101	115
Amostra 5	6,3	417	71,4	149
Amostra 6	6,6	239	43,3	83

**Tabela 5.2** – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 5,0 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero.

AMOSTRAS (pág. 85-87)	pH	COR (uC)	TURBIDEZ (uT)	VOLUME (mL)
Amostra 1	6,8	77	13,2	89
Amostra 2	6,7	172	27,7	110
Amostra 2,5	6,6	161	27	147
Amostra 3	6,6	205	36	144
Amostra 4	6,6	435	75,6	147
Amostra 5	6,6	275	49,6	135
Amostra 6	6,8	35	7,27	82

**Tabela 5.3** – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 7,5 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero.

AMOSTRAS (pág. 85-87)	pH	COR (uC)	TURBIDEZ (uT)	VOLUME (mL)
Amostra 1	6,7	1220	210	105
Amostra 2	6,5	810	122	135
Amostra 2,5	6,5	385	73	152
Amostra 3	6,5	535	104	148
Amostra 4	6,5	354	68	146
Amostra 5	6,4	233	40	144
Amostra 6	7,4	535	94,2	80

**Tabela 5.4** – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 10,0 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero.

AMOSTRAS (pág. 85-87)	pH	COR (uC)	TURBIDEZ (uT)	VOLUME (mL)
Amostra 1	6,2	610	95	128
Amostra 2	6,3	516	89	167
Amostra 2,5	6,2	232	37	175
Amostra 3	6,3	123	17	170
Amostra 4	6,4	73	10	170
Amostra 5	6,3	98	14,1	168
Amostra 6	6,4	204	33	80

**Tabela 5.5** – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 15,0 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero.

AMOSTRAS (pág. 85-87)	pH	COR (uC)	TURBIDEZ (uT)	VOLUME (mL)
Amostra 1	6,7	273	43,9	131
Amostra 2	6,6	370	51,6	161
Amostra 2,5	6,7	150	19,8	160
Amostra 3	6,6	106	14,3	162
Amostra 4	6,6	102	13,4	168
Amostra 5	6,7	75	8,34	163
Amostra 6	6,5	42	5,38	83

**Tabela 5.6** – Resultados de análises do drenado para ensaios com adição de 20,0 mL de polímero catiônico em diferentes concentrações e sem adição polímero.

AMOSTRAS (pág. 85-87)	pH	COR (uC)	TURBIDEZ (uT)	VOLUME (mL)
Amostra 1	6,8	389	73,1	150
Amostra 2	6,5	265	41,4	180
Amostra 2,5	6,6	76	7,84	175
Amostra 3	6,7	65	4,59	185
Amostra 4	6,7	60	3,19	180
Amostra 5	6,7	76	4,32	180
Amostra 6	6,8	166	28,8	80

As Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 representam graficamente os volumes drenados em cada ensaio realizado, de acordo com o volume de solução de polímero catiônico adicionado à amostra, ou seja, sem polímero catiônico e com 2,5 mL a 20,0 mL de solução de deste polímero em diferentes concentrações (0,10% a 0,50%).

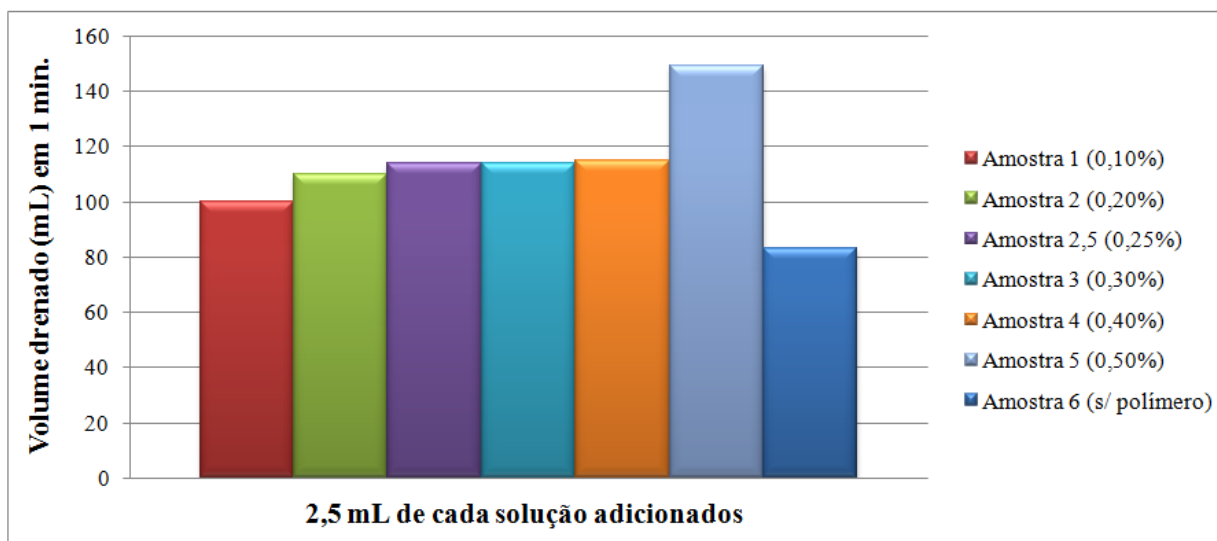


Figura 5.1 – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 2,5 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados.

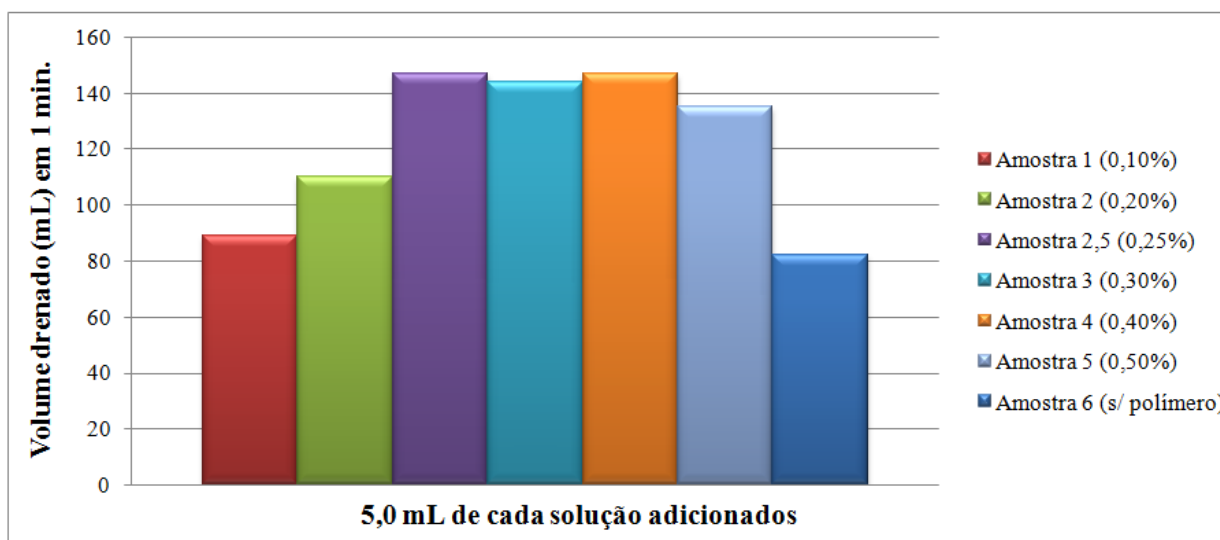
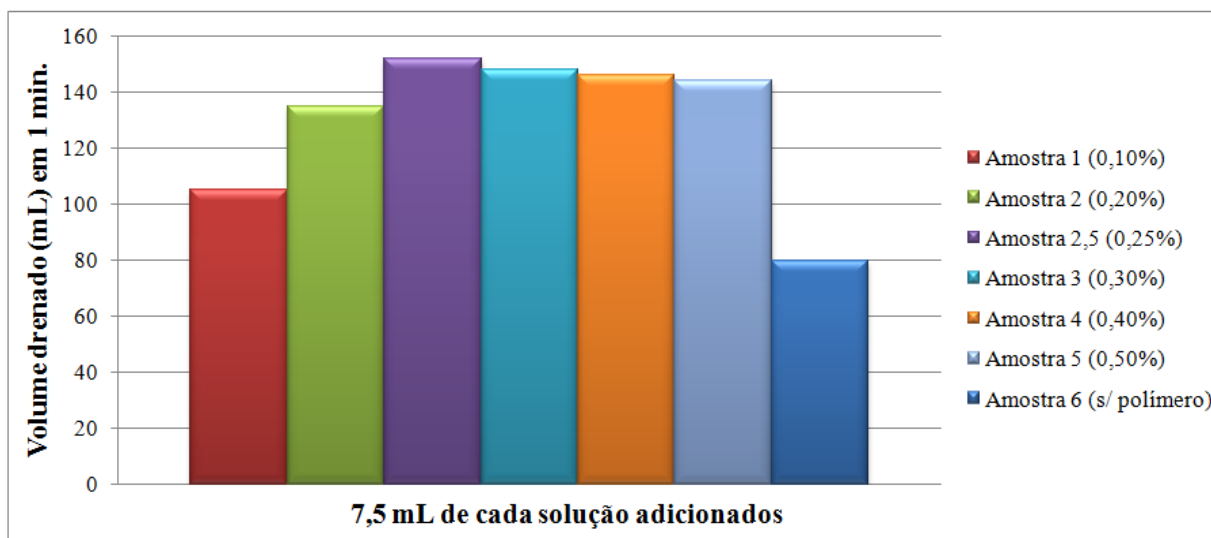
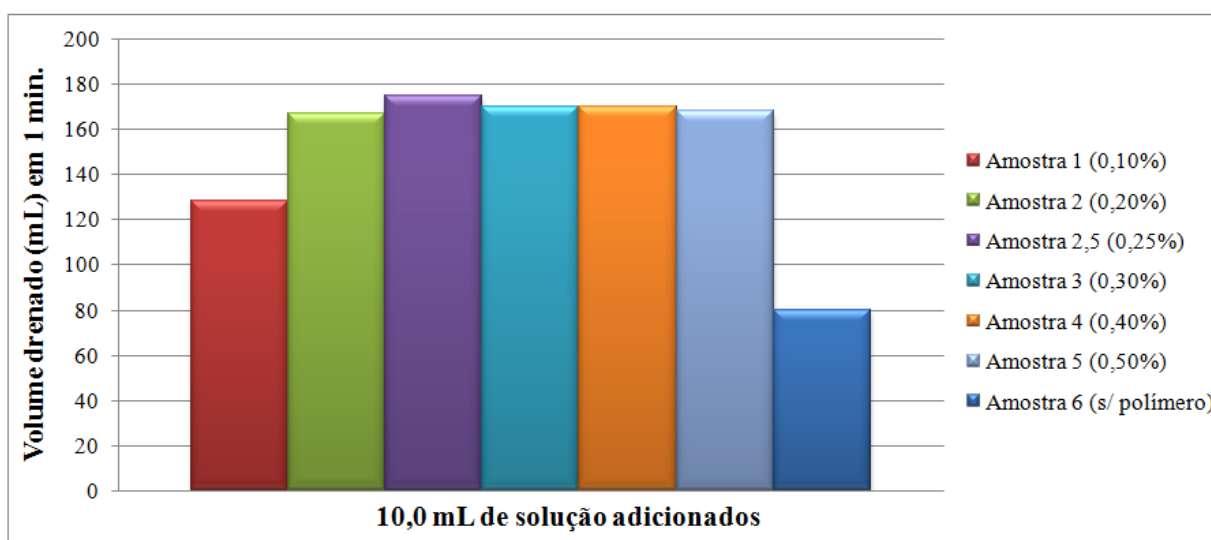


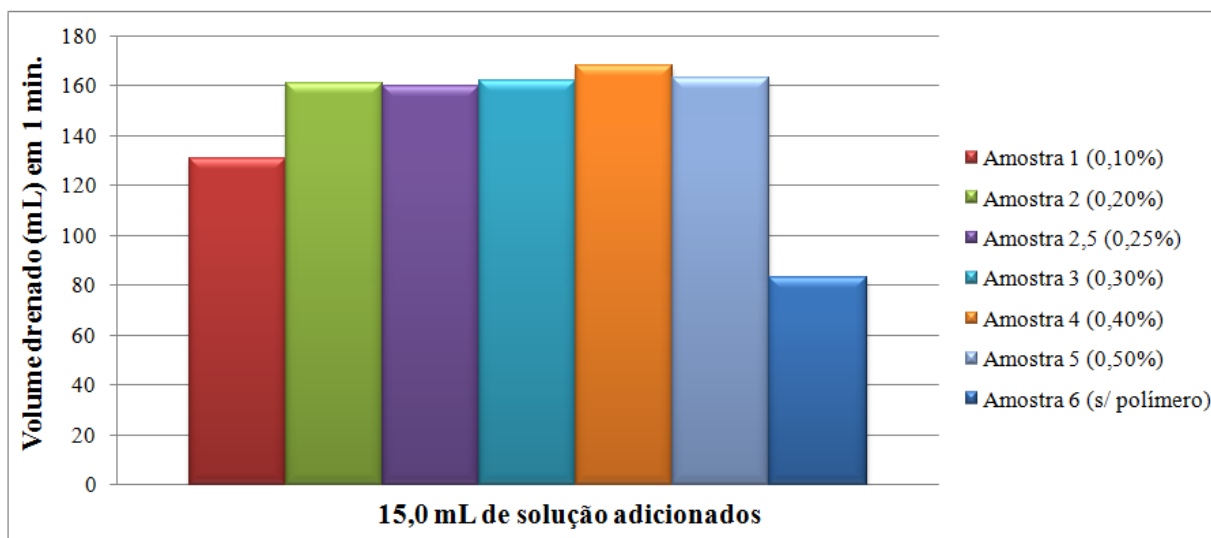
Figura 5.2 – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 5,0 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados.



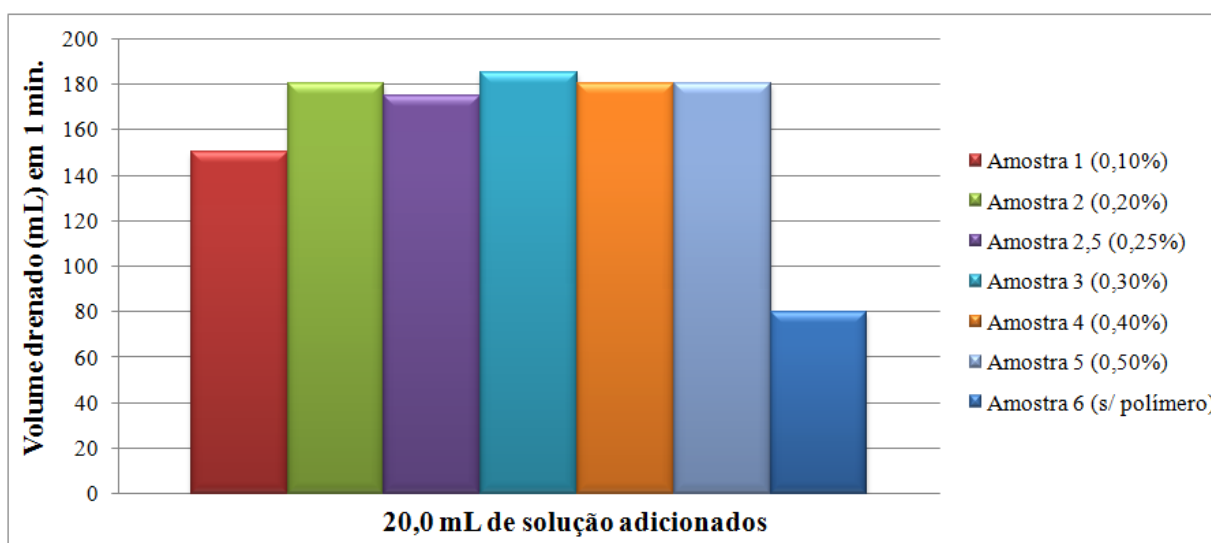
**Figura 5.3** – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 7,5 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados.



**Figura 5.4** – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 10,0 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados.



**Figura 5.5** – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 15,0 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados.



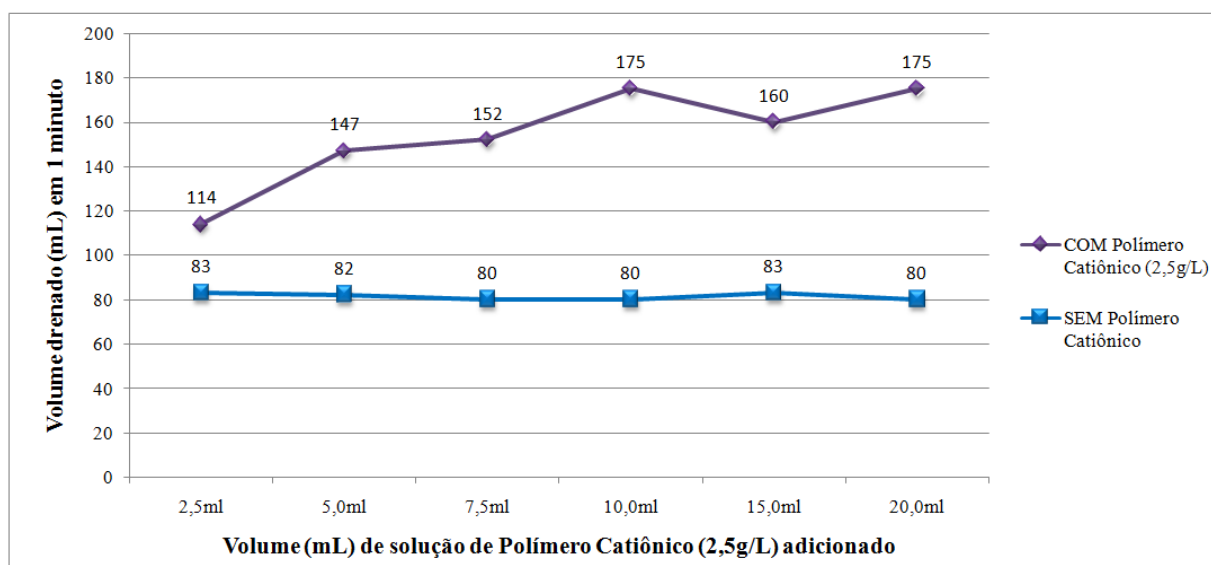
**Figura 5.6** – Volume drenado (mL) em 1 minuto para amostras de lodo (280 mL) sem polímero e com adição de 20,0 mL de solução de polímero catiônico em diferentes concentrações adicionados.

Assim, analisando-se estes resultados com a utilização de polímero catiônico (Amostras 1; 2; 2,5; 3; 4 e 5), de maneira geral e em termos principalmente quantitativos (volume drenado), constatou-se que os resultados obtidos para os ensaios com adição de 10,0 mL de solução na amostra de 280 mL de lodo bruto (Tabela 5.4 e Figura 5.4) foram superiores aos demais, destacando-se entre estes a amostra 2,5 com



adição de 10,0 mL de polímero catiônico com concentração de 0,25% (ou 2,5 g/L). Destaca-se este resultado, pois, além de apresentar valores qualitativos (cor e turbidez) médios, isto é, próximos aos demais (232 uC e 37 uT), apresentou valor de volume drenado (175 mL) próximo ao valor alcançado quando se utiliza soluções mais concentradas e maior volume de solução como, por exemplo, quando se adiciona 20 mL da amostra 3, que obteve o maior volume drenado em 1 minuto: 185 mL.

A Figura 5.7 consiste numa representação gráfica comparando os resultados de volume drenado obtidos para as amostras com adição de solução de polímero catiônico 2,5 g/L em seus diversos volumes adicionados à amostra bruta, e os resultados de volume obtidos para as amostras sem adição do mencionado polímero.



**Figura 5.7** – Comparação entre resultados sem e com polímero catiônico para a amostra 2,5 em concentração 0,25% e diferentes volumes de solução de polímero adicionado.

Optou-se pela representação da amostra de concentração 2,5 g/L, pois, de maneira geral, classificou-se seus resultados como mais vantajosos (benefício/custo/necessidade) quando se leva em consideração parâmetros analisados (pH, cor, turbidez e volume drenado) e quantidade de polímero necessária para

preparação da solução. O gráfico da Figura 5.7 evidencia a superioridade na aceleração de drenagem inicial quando se utiliza 10 mL de solução de 2,5 g/L de polímero catiônico.

Dessa forma, é possível afirmar que, mesmo não sendo realizados ensaios com condicionamento prévio com este polímero catiônico nos protótipos de leito de drenagem localizados na ETA de São Carlos-SP, devido aos resultados promissores obtidos na utilização deste polímero nos minileitos de drenagem, pode ocorrer aceleração na etapa de drenagem inicial do lodo quando utilizado em protótipos de leito de drenagem ou em leitos de drenagem em escala real.

### 5.1.2. Ensaios com mantas geotêxteis

Os resultados obtidos para os 10 ensaios realizados com mantas geotêxteis em minileito de drenagem constam nas Tabelas 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11. Nas tabelas mencionadas apresentam-se valores referentes às análises de cor, turbidez e volume drenado. Apenas os valores de volume foram medidos para cada um dos ensaios (1,5 e 1,0 min.). O valor de pH obtido na amostra bruta foi de 6,7.

**Tabela 5.7** – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil verde, não-tecida, 150 g/m<sup>2</sup>.

1º ENSAIO – 250 mL e 1,5 min		2º ENSAIO – 250 mL e 1,0 min	
<b>Volume Drenado</b>	65 mL	<b>Volume Drenado</b>	55 mL
<b>Cor</b>	1150 uC	<b>Cor*</b>	- uC
<b>Turbidez</b>	206 uT.	<b>Turbidez*</b>	- uT

\*NM: não medido.

**Tabela 5.8** – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil cinza, não-tecida, 200 g/m<sup>2</sup>.

1º ENSAIO – 250 mL e 1,5 min		2º ENSAIO – 250 mL e 1,0 min	
<b>Volume Drenado</b>	75 mL	<b>Volume Drenado</b>	65 mL
<b>Cor</b>	2270 uC	<b>Cor*</b>	- uC
<b>Turbidez</b>	361 uT	<b>Turbidez*</b>	- uT

\*NM: não medido.

**Tabela 5.9** – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil marrom, não-tecida, 300 g/m<sup>2</sup>.

1º ENSAIO – 250 mL e 1,5 min		2º ENSAIO – 250 mL e 1,0 min	
<b>Volume Drenado</b>	70 mL	<b>Volume Drenado</b>	65 mL
<b>Cor</b>	2500 uC	<b>Cor*</b>	- uC
<b>Turbidez</b>	398 uT	<b>Turbidez*</b>	- uT

\*NM: não medido.

**Tabela 5.10** – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil verde, não-tecida, 400 g/m<sup>2</sup>.

1º ENSAIO – 250 mL e 1,5 min		2º ENSAIO – 250 mL e 1,0 min	
<b>Volume Drenado</b>	55 mL	<b>Volume Drenado</b>	40 mL
<b>Cor</b>	930 uC	<b>Cor*</b>	- uC
<b>Turbidez</b>	116 uT	<b>Turbidez*</b>	- uT

\*NM: não medido.

**Tabela 5.11** – Resultados de ensaios (1,0 e 1,5 min.) com manta geotêxtil cinza, tecida, 600 g/m<sup>2</sup>.

1º ENSAIO – 250 mL e 1,5 min		2º ENSAIO – 250 mL e 1,0 min	
<b>Volume Drenado</b>	85 mL	<b>Volume Drenado</b>	80 mL
<b>Cor</b>	203 uC	<b>Cor*</b>	- uC
<b>Turbidez</b>	35,4 uT	<b>Turbidez*</b>	- uT

\*NM: não medido.

As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 representam graficamente um comparativo entre os volumes drenados obtidos no 1º e 2º ensaios, um comparativo entre valores de cor obtidos nos volumes drenados no 1º ensaio, e um comparativo entre valores de turbidez obtidos nos volumes drenados no 1º ensaio, respectivamente.

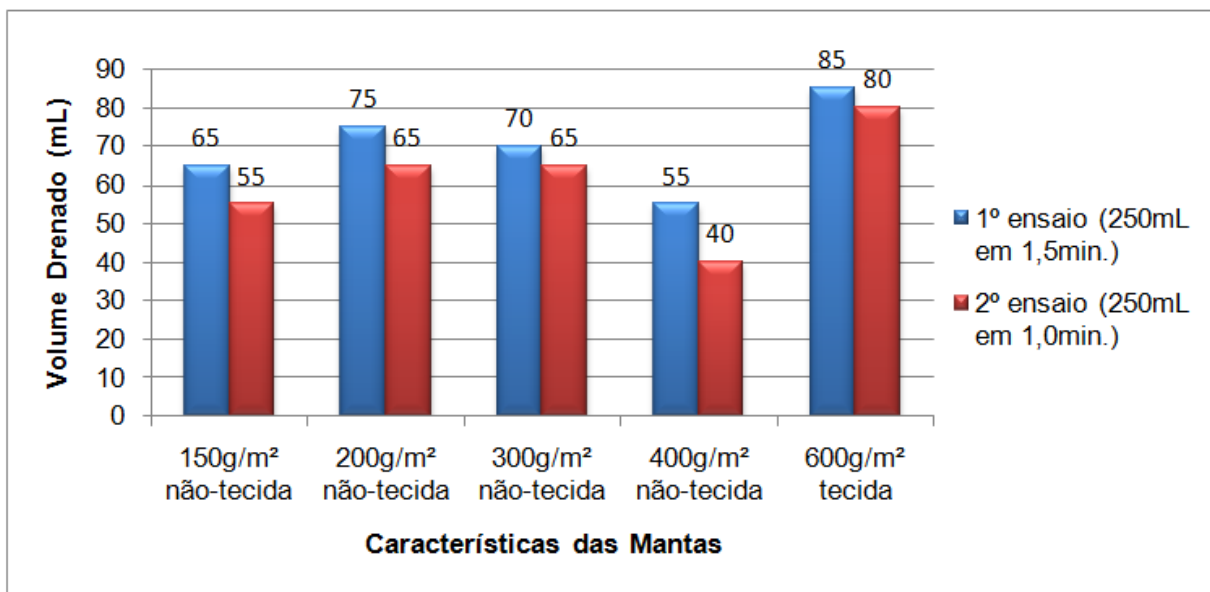


Figura 5.8 – Comparativo entre volumes drenados no 1º e 2º ensaios (1,0 e 1,5 min.) com uso de diferentes mantas geotêxteis.

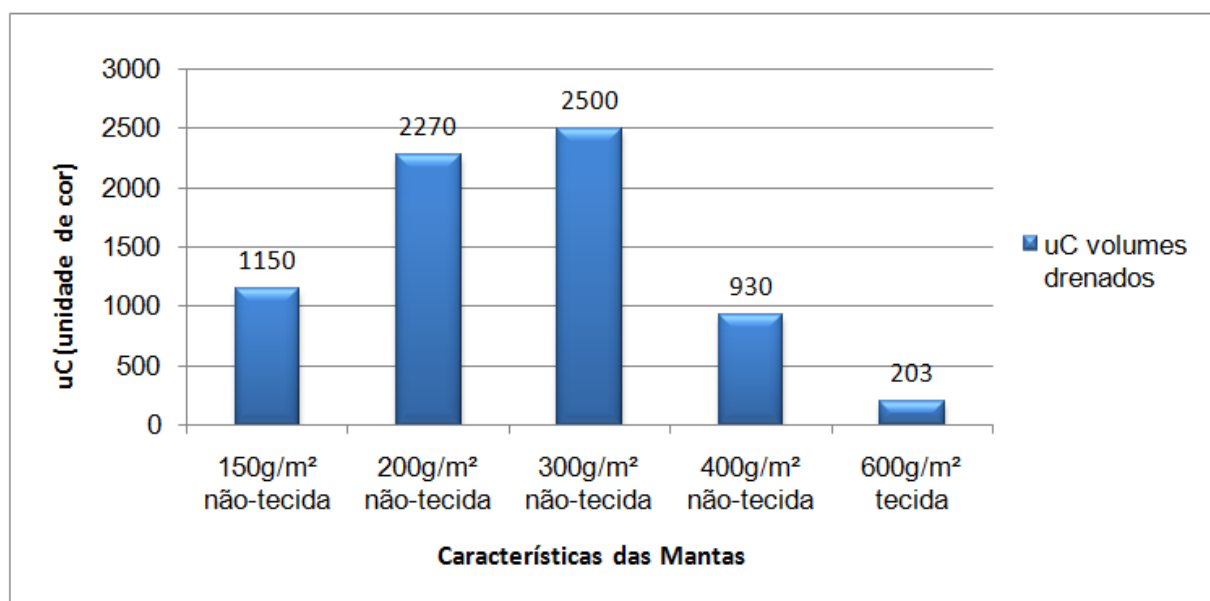
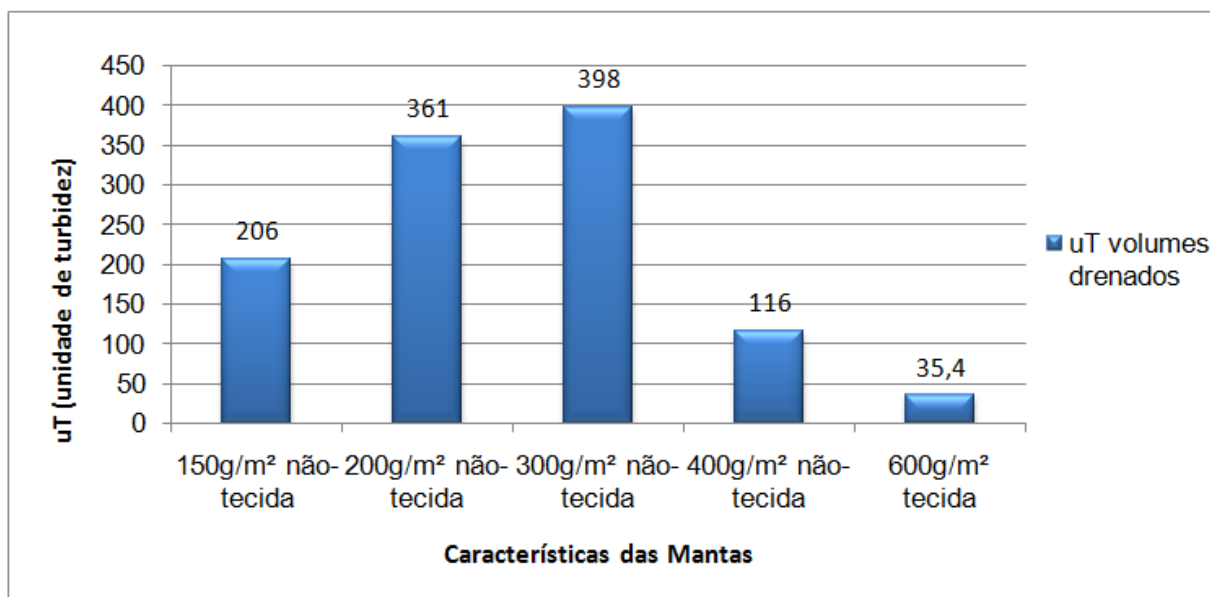


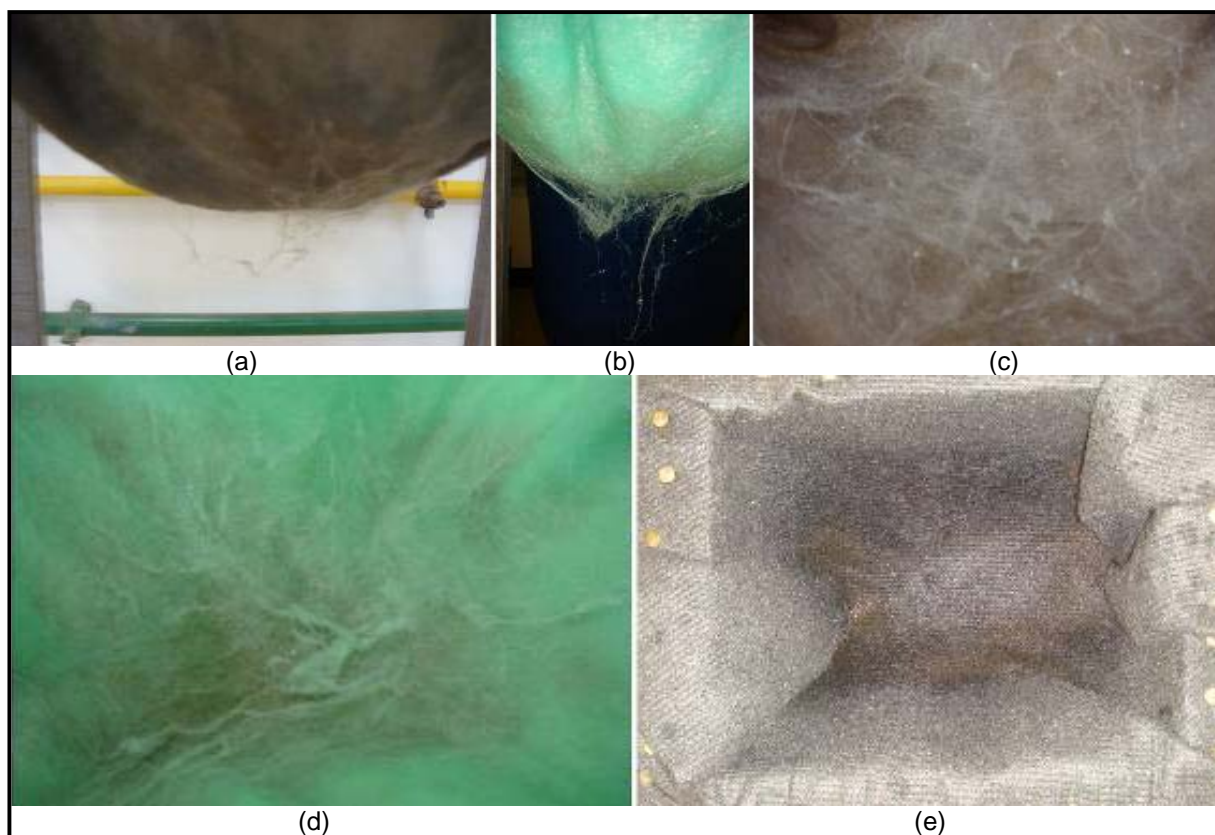
Figura 5.9 – Comparativo entre valores de cor obtidos nos volumes drenados no 1º ensaios (1,0 min.) com uso de diferentes mantas geotêxteis.



**Figura 5.10** – Comparativo entre valores de turbidez obtidos nos volumes drenados no 1º ensaios (1,0 min.) com uso de diferentes mantas geotêxteis.

Um aspecto de grande importância referente à utilização das mantas não-tecidas consiste em sua degradabilidade. A Figura 5.11 ilustra o estado de degradação das mantas não-tecidas após a realização de dois ensaios e o estado da manta tecida (600 g/m<sup>2</sup>) após a realização de mais de dez ensaios. A partir desta figura, é facilmente perceptível que é praticamente inviável a utilização de qualquer das mantas não-tecidas, já que a manta tecida, mesmo após vários ensaios não apresentou degradabilidade perceptível.

Assim, a partir de todos os resultados obtidos é claramente perceptível a superioridade dos benefícios quando se utiliza manta geotêxtil do tipo tecida de 600 g/m<sup>2</sup> em relação às demais testadas. Nota-se que além de se obter um maior volume drenado em relação às demais no primeiro e segundo ensaios, também apresenta resultados de drenado com qualidade muito superior em termos de cor e turbidez.



**Figura 5.11** – Degradabilidade das mantas geotêxteis: (a) não-tecida 150 g/m<sup>2</sup>; (b) não-tecida 200 g/m<sup>2</sup>; (c) não-tecida 300 g/m<sup>2</sup>; (d) não-tecida 400 g/m<sup>2</sup>; (e) tecida 600 g/m<sup>2</sup>.

Por fim, é indubitável que a utilização de manta geotêxtil tecida de 600 g/m<sup>2</sup> em leitos de drenagem em escala real possibilitariam com maior aceitabilidade o retorno do drenado ao início do tratamento quando comparado ao uso das demais mantas em questão, pois, além de contribuir para remoção mais efetiva e rápida da água livre presente no lodo, apresenta menor degradabilidade.

## 5.2. INTERVENÇÕES NA ETAPA DE EVAPORAÇÃO DO LEITO DE DRENAGEM (ENSAIOS EFETIVOS)

Conforme já descrito anteriormente foram realizados seis ensaios (E-01, E-02, E-03, E-04, E-05 e E-06) nos leitos de drenagem instalados na ETA de São Carlos-SP. A

Tabela 5.12 apresenta resultados obtidos nas análises de sólidos e pH no lodo bruto e análises de cor e turbidez na água drenada.

**Tabela 5.12** – Análises do lodo bruto e da água drenada em cada ensaio (E), variando a altura da cobertura plástica em relação à borda do protótipo de leito de drenagem.

		ALTURA DA COBERTURA E NÚMERO DO ENSAIO					
		0,2 m E-01	0,3 m E-02	0,4 m E-03	0,5 m E-04	0,6 m E-05	0,2 m E-06
Lodo Bruto	ST (%)	0,42	0,20	1,41	1,20	0,18	2,22
	SST (%)	0,17	0,17	1,06	0,56	0,17	0,27
	SSV (%)	0,10	0,10	0,27	0,05	0,03	0,21
	SSF (%)	0,07	0,07	0,79	0,51	0,14	0,06
	SDT (%)	0,25	0,03	0,35	0,64	0,01	1,96
	SDV (%)	0,03	0,01	0,24	0,29	0,00	0,26
	SDF (%)	0,23	0,02	0,12	0,35	0,01	1,70
	pH (%)	6,5	6,7	6,9	6,6	6,9	7,3
Água Dren.	Cor (uC)	52	45	97	111	50	60
	Turbidez (uT)	4,9	5,5	11,3	61,1	6,7	3,7

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 5.12 nota-se a heterogeneidade do lodo coletado no decantador, ainda que coletado à mesma altura e posição. Isto é perceptível atentando-se para os percentuais de Sólidos Totais (ST) obtidos em cada ensaio, cujos valores extremos foram de 0,18% (5º ensaio) e 2,22 (6º ensaio). Por não existir intervenções químicas e biológicas na realização destes ensaios, os resultados de cor e turbidez apresentados para água drenada consistem na média aritmética do valor obtido para água drenada no leito com cobertura e sem cobertura. Analisando-se tais resultados percebe-se certa proximidade nos valores, exceto para os apresentados no 3º e 4º ensaios (E-03 e E-04).

A Tabela 5.13 apresenta resultados das análises de metais na água drenada coletada no 6º ensaio (E-06) na coluna “Amostra”. Estas análises foram realizadas após mistura da água drenada no protótipo coberto e sem cobertura. As demais análises

constantes na Tabela 5.13 referem-se a análises da água bruta captada pela ETA em três pontos distintos do córrego Espriado<sup>11</sup> para realizar tratamento. Estas análises foram realizadas no laboratório da ETA de São Carlos-SP.

**Tabela 5.13** – Análises de metais da amostra da pesquisa e da água bruta da ETA.

METAL	SÍMBOLO	AMOSTRA				PARÂMETRO	MÉTODO
		DRENADO E-06 (mg/L)	ETA-01 (mg/L)	ETA-02 (mg/L)	ETA-03 (mg/L)	REFERÊNCIA ETA (mg/L)	
<b>Alumínio</b>	Al	0,01	0,04	0,01	0,02	0,01	8326 (HACH, 2008)
<b>Ferro</b>	Fe <sup>(1)</sup>	0,12	NM <sup>(2)</sup>	NM	NM	0,02	8146 (HACH, 2008)
<b>Cromo</b>	Cr	< 0,01	0,02	0	< 0,01	0,01	8024 (HACH, 2008)
<b>Manganês</b>	Mn	4	0	1,9	0	0,1	8034 (HACH, 2008)
<b>Fósforo</b>	P <sup>(3)</sup>	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	8190 (HACH, 2008)
<b>Fosfato</b>	PO <sub>4</sub> <sup>(4)</sup>	0,08	0,07	0,05	0,03	-	8007 (HACH, 2008)
<b>Cobre</b>	Cu <sup>(5)</sup>	0,03	NM	NM	NM	0,04	8506 (HACH, 2008)

<sup>(1)</sup> Fe Phenanthroline

<sup>(2)</sup> NM: não medido

<sup>(3)</sup> P Persulfate

<sup>(4)</sup> PO<sub>4</sub> Persulfate

<sup>(5)</sup> Cu Bicinchoninate

Os resultados da Tabela 5.13 mostram que, baseando-se apenas nestas análises de metais, a água drenada no leito de drenagem é passível de retornar ao início do tratamento, pois apresentou valores próximos aos da água bruta utilizada na ETA e atendeu parâmetros de referência utilizados pela ETA de São Carlos, com exceção da análise de manganês que, mesmo sendo realizada em duplicata, apresentou resultado muito além do valor de referência. Segundo técnicos do laboratório da ETA, este resultado encontrado para o manganês pode ser consequência de alguma interferência externa, pois um dos leitos de drenagem não possuía cobertura e, portanto, encontrava-se sujeito a intempéries.

<sup>11</sup> Foram realizadas análises de metais apenas para água bruta captada no córrego Espriado (ETA-01, ETA-02 e ETA-03), pois, no período de coleta, o serviço de abastecimento de água de São Carlos contava apenas com água deste córrego, devido a problemas de adução de água captada no córrego do Feijão.



Para se obter um gráfico relacionando remoção de água do lodo com o tempo foram realizadas análises diárias de Sólidos Totais em amostras de lodo coletadas nos protótipos de leito de drenagem coberto e sem cobertura. A Tabela 5.14 traz os resultados destas análises diárias por leito de drenagem (coberto e sem cobertura) e por ensaio, incluindo as análises no lodo bruto.

**Tabela 5.14** – Análises diárias de Sólidos Totais por leito de drenagem e por ensaio.

		DIA(S) APÓS DESPEJO DE LODO NO LEITO (% de Sólidos Totais)											
		Bruto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
E-01	Coberto	0,42	9,46	12,24	15,01	19,09	55,50	75,03	88,77	-	-	-	-
	S/ Cobertura	0,42	7,38	8,95	12,27	15,18	26,21	31,34	56,59	-	-	-	-
E-02	Coberto	0,20	8,18	14,64	20,69	37,44	63,87	89,89	-	-	-	-	-
	S/ Cobertura	0,20	7,14	12,76	17,93	24,12	43,79	69,18	-	-	-	-	-
E-03	Coberto	1,41	6,89	9,58	11,91	15,61	18,44	27,82	46,71	85,24	93,29	-	-
	S/ Cobertura	1,41	5,67	8,19	9,72	13,08	16,43	21,00	38,76	79,47	88,58	-	-
E-04	Coberto	1,20	7,98	9,47	12,32	23,12	37,69	56,45	83,02	-	-	-	-
	S/ Cobertura	1,20	4,84	7,33	10,52	21,42	32,04	54,13	75,46	-	-	-	-
E-05	Coberto	0,18	14,69	32,28	79,80	89,49	-	-	-	-	-	-	-
	S/ Cobertura	0,18	7,81	10,71	20,17	79,47	-	-	-	-	-	-	-
E-06	Coberto	2,22	5,50	10,37	11,66	13,61	13,73	14,08	14,80	16,37	16,91	17,29	48,32
	S/ Cobertura	2,22	3,34	6,04	6,27	8,71	7,03	8,25	9,07	8,37	10,08	11,94	14,75

Pela Tabela 5.14 é possível notar que a média de duração dos ensaios foi de sete dias e que o ensaio com maior duração foi o 6º ensaio. Em termos de agilidade na remoção da água e obtenção de resíduo desaguado, pode-se afirmar que o 5º ensaio foi o que mais se destacou, tendo duração de quatro dias e alcançando percentual de 89,49% de Sólidos Totais presentes na amostra coletada. Entretanto, assim como também ocorreu no 2º ensaio, acredita-se que isso se deu principalmente devido ao percentual muito baixo de Sólidos Totais presentes na amostra de lodo bruto (0,18% para o 5º ensaio e 0,20% para o 2º ensaio).

Quanto ao 6º ensaio, os resultados apontam que, no leito sem cobertura, no 5º e 8º dias após o início do ensaio ocorreu diminuição no percentual de Sólidos Totais presentes na amostra, cuja causa se deve ao alto índice de pluviosidade nestes dias (Tabela 5.15). Outro aspecto referente a este ensaio que se deu principalmente devido à ocorrência de chuvas, alta nebulosidade, queda de temperatura e menos horas de brilho solar (insolação) foi sua longa duração e finalização com menor percentual de Sólidos Totais em relação aos demais. No entanto, um aspecto positivo que deve ser destacado neste 6º ensaio é que, no leito de drenagem com cobertura plástica não houve decréscimo de percentual de Sólidos Totais nas amostras diárias coletadas, ou seja, por estar protegido contra chuvas, mesmo em dias muito chuvosos, ainda que de maneira mínima, houve progressão na operação de desaguamento do lodo.

Comparando-se os percentuais de Sólidos Totais finais do leito de drenagem com e sem cobertura mostrados na Tabela 5.14, vê-se que as diferenças mais expressivas encontradas em um mesmo ensaio são referentes ao 1º e 6º ensaio (88,77% e 56,59%, e 48,32% e 14,75%, respectivamente), o que permite afirmar que a 20 cm de altura do leito de drenagem a cobertura plástica potencializa sua eficiência em relação à não utilização de tal cobertura.

Em relação aos dados climáticos de cada dia dos ensaios, a Tabela 5.15 apresenta os dados diários de temperatura média (°C), humidade relativa (%), insolação<sup>12</sup> (hbs), nebulosidade<sup>13</sup> (décimos), velocidade do vento (m/s), radiação solar (kJm<sup>2</sup>) e pluviosidade (mm), separando por ensaio e por dia.

---

<sup>12</sup> Insolação: horas de brilho solar (hbs) durante um determinado dia.

<sup>13</sup> Nebulosidade: décimos de céu coberto, ou seja, é a fração da abóbada celeste que, em um dado momento, encontra-se encoberta por nuvens.

**Tabela 5.15** – Dados climáticos médios diários por ensaio.

	PARÂMETRO	UNIDADE	DIA(S) APÓS DESPEJO DE LODO NOS PROTÓTIPOS DE LEITO DE DRENAGEM											
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1º Ensaio	Temperatura	°C	17,71	16,10	16,57	14,58	15,58	18,56	19,96	18,92	-	-	-	-
	Um. Relativa	%	72,21	74,13	68,78	73,04	60,13	53,21	43,67	58,42	-	-	-	-
	Insolação	hbs	8,80	8,30	8,90	7,00	9,30	9,20	9,20	-	-	-	-	-
	Nebulosidade	décimos	0,10	0,40	0,10	0,33	0,00	0,00	0,23	-	-	-	-	-
	Vel. Vento	m/s	0,05	0,45	0,21	0,13	0,00	0,02	0,09	0,01	-	-	-	-
	Radiação	KJm <sup>2</sup>	16660,44	16856,65	17595,18	17181,71	18731,71	17920,34	18369,71	17550,57	-	-	-	-
	Pluviosidade	mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
	<b>PARÂMETRO</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
2º Ensaio	Temperatura	°C	18,92	18,09	20,25	20,63	18,85	14,17	12,27	-	-	-	-	-
	Um. Relativa	%	58,42	66,42	54,79	48,38	53,38	67,67	60,75	-	-	-	-	-
	Insolação	hbs	-	-	-	-	-	-	9,40	-	-	-	-	-
	Nebulosidade	décimos	-	-	-	-	-	-	0,16	-	-	-	-	-
	Vel. Vento	m/s	0,01	0,04	0,14	0,28	0,00	0,10	1,15	-	-	-	-	-
	Radiação	KJm <sup>2</sup>	17550,57	17447,49	18424,55	15854,92	18091,59	19147,90	20358,26	-	-	-	-	-
	Pluviosidade	mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
	<b>PARÂMETRO</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
3º Ensaio	Temperatura	°C	12,27	13,87	15,01	16,87	17,34	19,31	20,33	20,24	-	-	-	-
	Um. Relativa	%	60,75	54,88	50,60	45,60	43,80	38,20	35,50	36,80	-	-	-	-
	Insolação	hbs	9,40	9,50	9,60	9,20	9,40	9,50	9,60	9,60	-	-	-	-
	Nebulosidade	décimos	0,16	0,03	0,00	0,36	1,30	0,00	0,13	0,00	-	-	-	-
	Vel. Vento	m/s	1,15	0,18	0,03	0,00	0,05	0,08	0,03	0,00	-	-	-	-
	Radiação	KJm <sup>2</sup>	20358,26	20451,50	20603,18	19438,67	19004,65	19952,84	20421,30	20140,14	-	-	-	-
	Pluviosidade	mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-

	PARÂMETRO	UNIDADE	DIA(S) APÓS DESPEJO DE LODO NOS PROTÓTIPOS DE LEITO DE DRENAGEM											
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4º Ensaio	Temperatura	°C	21,23	21,45	22,35	22,56	24,32	24,04	22,23	21,74	-	-	-	-
	Um. Relativa	%	33,50	33,50	31,30	32,10	29,50	36,40	44,90	44,30	-	-	-	-
	Insolação	hbs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Nebulosidade	décimos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Vel. Vento	m/s	0,11	0,03	0,25	0,00	0,00	0,17	0,25	0,03	-	-	-	-
	Radiação	KJm <sup>2</sup>	20272,92	19898,49	19098,50	19256,63	19294,53	19163,84	20153,54	19730,61	-	-	-	-
	Pluviosidade	mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
	PARÂMETRO	UNIDADE	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5º Ensaio	Temperatura	°C	18,80	16,60	18,00	18,50	19,70	-	-	-	-	-	-	-
	Um. Relativa	%	66,00	81,70	71,30	63,00	57,80	-	-	-	-	-	-	-
	Insolação	hbs	7,40	1,90	9,60	9,80	9,80	-	-	-	-	-	-	-
	Nebulosidade	décimos	0,43	0,80	0,16	0,03	0,00	-	-	-	-	-	-	-
	Vel. Vento	m/s	0,63	0,17	0,40	0,26	0,22	-	-	-	-	-	-	-
	Radiação	KJm <sup>2</sup>	19080,43	10406,66	24733,43	25534,74	24869,92	-	-	-	-	-	-	-
	Pluviosidade	mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-
	PARÂMETRO	UNIDADE	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6º Ensaio	Temperatura	°C	21,90	22,20	18,30	18,00	17,50	18,80	19,40	20,80	20,40	17,80	20,30	23,60
	Um. Relativa	%	57,80	65,90	83,70	88,10	92,70	88,40	90,00	83,60	82,50	82,60	71,50	67,40
	Insolação	hbs	1,60	7,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,50	6,60	-
	Nebulosidade	décimos	0,96	0,30	1,00	0,96	0,86	0,83	0,66	0,93	1,00	0,93	0,83	-
	Vel. Vento	m/s	0,94	0,07	0,15	0,00	0,07	0,00	0,03	0,41	0,23	0,50	0,56	0,03
	Radiação	KJm <sup>2</sup>	14881,89	21096,55	2189,21	10189,46	10225,99	11190,82	7944,88	11324,13	9612,63	11361,94	19572,23	23834,34
	Pluviosidade	mm	1,20	0,40	26,60	13,20	26,20	0,20	20,60	20,20	3,80	0,20	0,00	0,00

Estação São Carlos, A711, 23 UTC, 21,9800° S e 47,8836° W, aproximadamente 3,7 km de distância em relação ao local dos ensaios (ETA – São Carlos).

Fonte: Estação Meteorológica da UFSCar/CCET e INMET (<<http://www.inmet.gov.br/sonabra/dspDadosCodigo.php?QTcxMQ==>>>).

As Figuras 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 representam graficamente a curva de remoção de água no tempo para cada um dos seis ensaios.

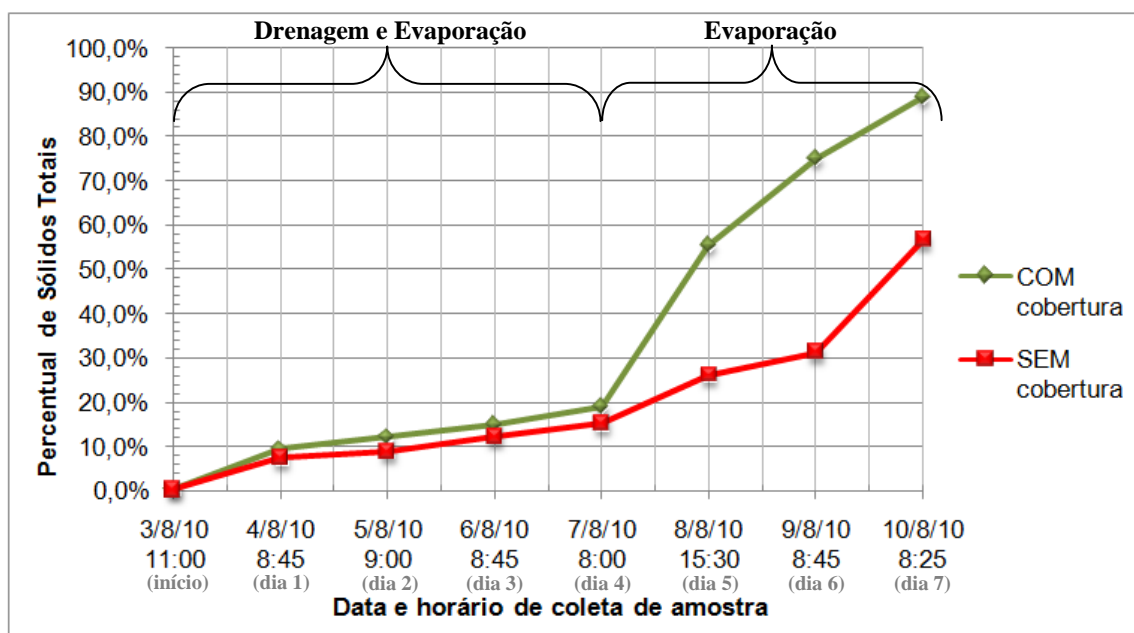


Figura 5.12 – Ensaio 01 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,20 m) e sem cobertura.

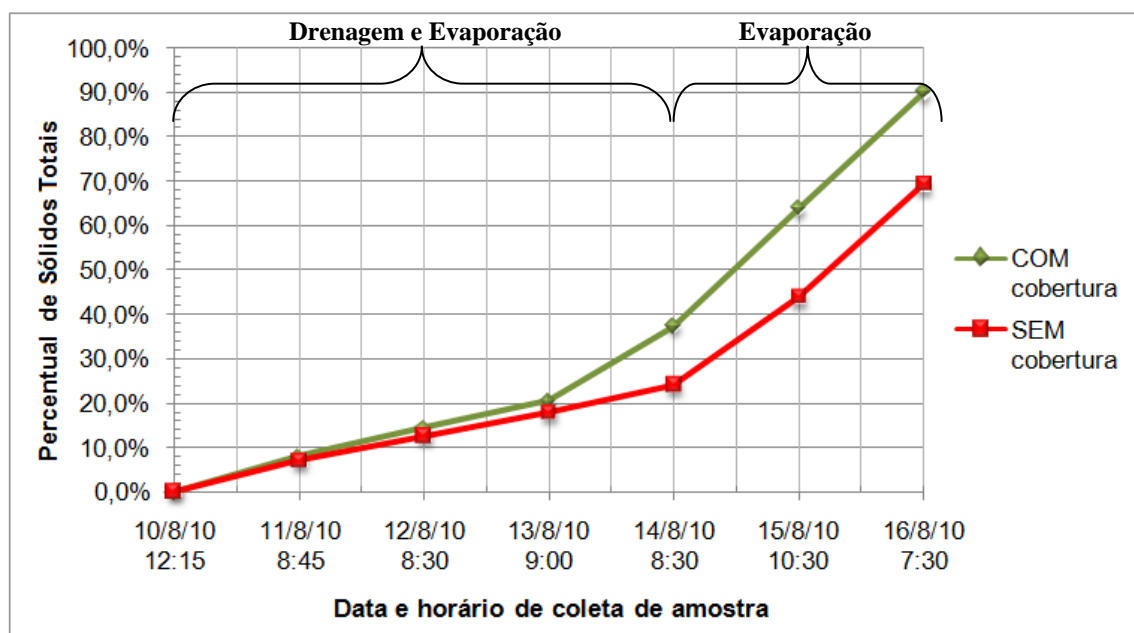


Figura 5.13 – Ensaio 02 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,30 m) e sem cobertura.

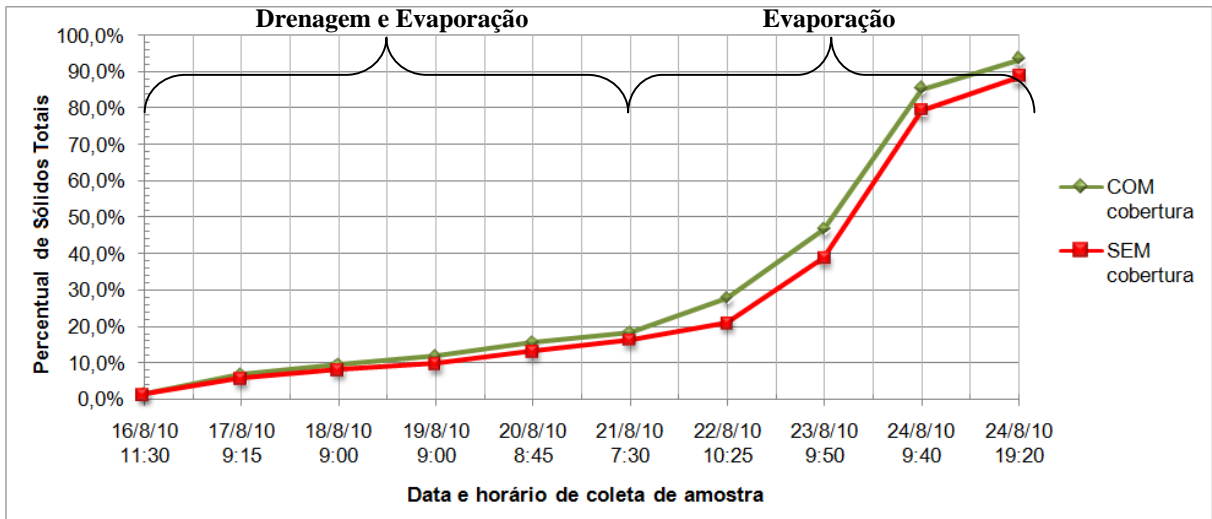


Figura 5.14 – Ensaio 03 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,40 m) e sem cobertura.

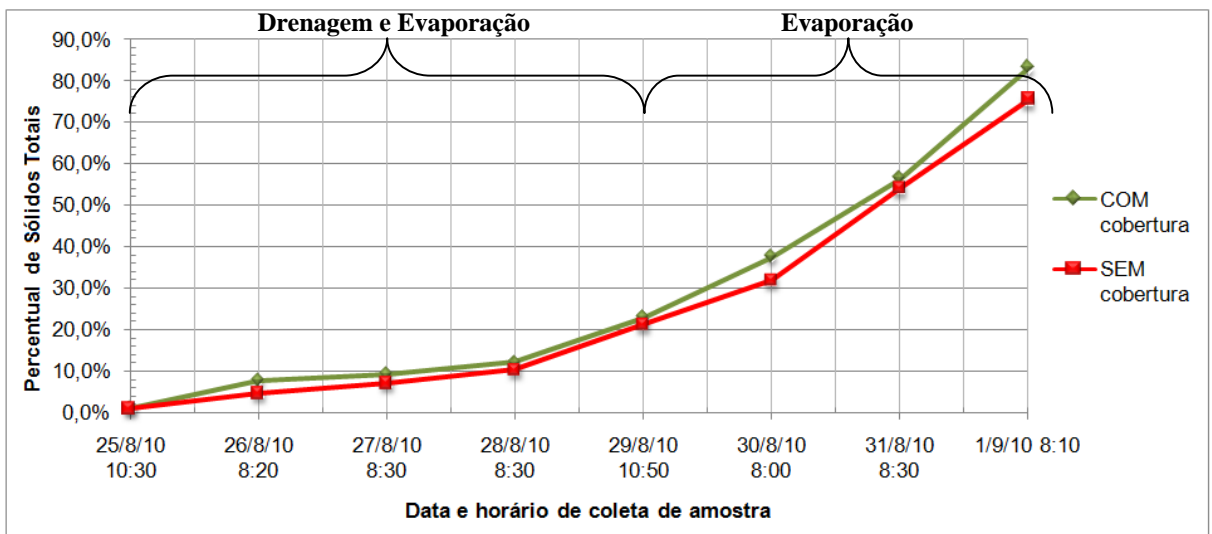
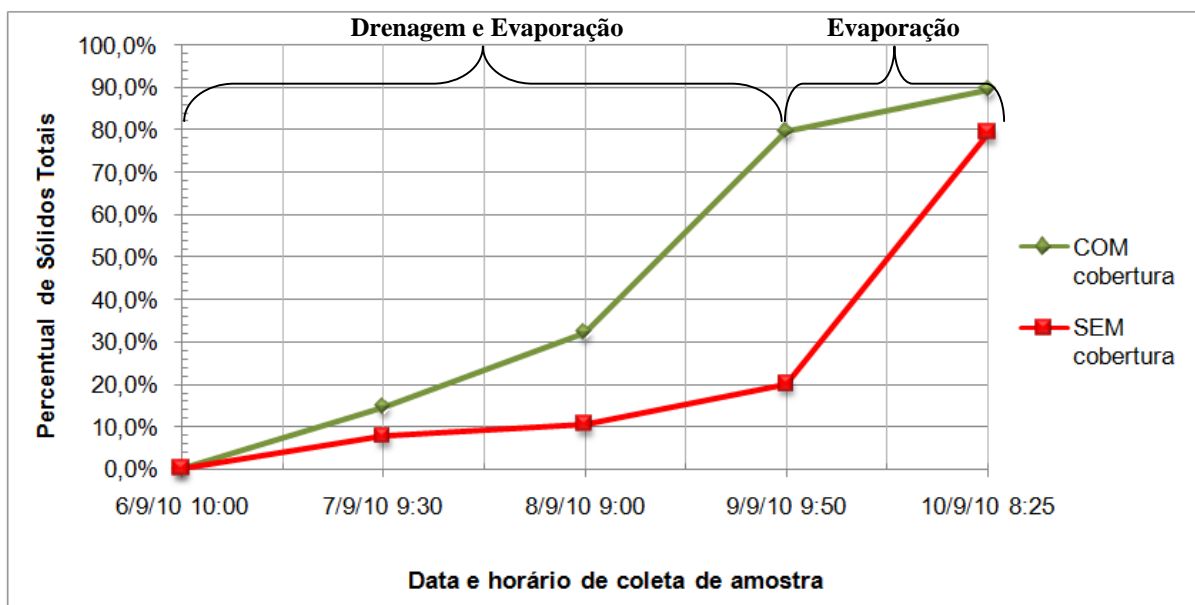
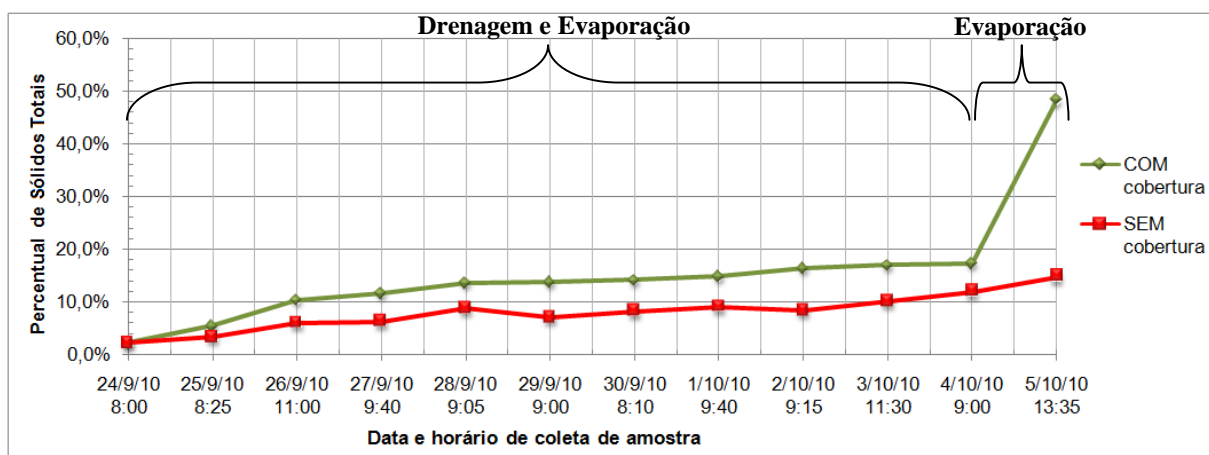


Figura 5.15 – Ensaio 04 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,50 m) e sem cobertura.



**Figura 5.16** – Ensaio 05 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,60 m) e sem cobertura.



**Figura 5.17** – Ensaio 06 - comparativo de percentual de Sólidos Totais por coleta diária entre leito de drenagem com cobertura (0,20 m) e sem cobertura.

A partir destes gráficos é possível perceber com maior clareza que a utilização de cobertura plástica a 0,20 m de altura foi mais eficiente, ou seja, conduziu a resultados com diferenças mais expressivas em relação à não utilização de cobertura, atingindo eficiência de até 56% superior ao resultado obtido para o leito sem cobertura,

como, por exemplo, no 1º ensaio: resultado final com cobertura com 88,77% de Sólidos Totais no resíduo e, sem cobertura, 56,59%.

Excetuando-se o gráfico referente ao 6º ensaio (Figura 5.17), os gráficos ilustram também que a drenagem do lodo ocorreu em uma média de até quatro dias do despejo do lodo bruto e, a partir de então, o maior percentual de remoção de água restante ocorria devido à evaporação.

Por fim, as Figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 ilustram, respectivamente, o momento de despejo de lodo no protótipo de leito de drenagem localizado na ETA de São Carlos-SP, um dia após o despejo do lodo de decantador no protótipo (leito coberto), lodo desaguado no protótipo com cobertura, e lodo desaguado no protótipo sem cobertura. Todas estas figuras são referentes ao 1º ensaio (cobertura a 0,20 m de altura).



**Figura 5.18** – Ensaio 01 - Despejo de lodo no protótipo de leito de drenagem.



**Figura 5.19** – Ensaio 01 - Um dia após do despejo de lodo no protótipo com cobertura a 0,20 m de altura.





**Figura 5.20** – Ensaio 01 - Lodo desaguado no leito de drenagem com cobertura (0,20 m de altura), sete dias após o despejo inicial.



**Figura 5.21** – Ensaio 01 - Lodo desaguado no leito de drenagem sem cobertura, sete dias após o despejo inicial.

## **6. CONCLUSÕES**

Ante o exposto conclui-se que:

- Os resultados obtidos em ensaios preliminares com condicionamento prévio com polímero catiônico mostraram um cenário promissor para sua utilização em maior escala, superando o dobro do volume drenado inicialmente em relação à sua não utilização;
- Comparando-se os resultados encontrados com a realização dos ensaios preliminares com mantas geotêxteis, constatou-se que além de superior em capacidade de drenagem e filtração do resíduo, a manta tecida de densidade superficial 600 g/m<sup>2</sup> não apresentou sinais de degradação, o que, visualmente, foi percebido após a realização dos ensaios nas demais mantas geotêxteis;
- O tempo médio de duração de cada ensaio efetivo realizado em protótipos de leito de drenagem foi de sete dias: período de exposição em que foi possível atingir, em quatro dos ensaios, percentual de Sólidos Totais presentes no resíduo superior a 80% para o protótipo com cobertura;
- O tempo médio de remoção de água presente no lodo através da drenagem foi de aproximadamente 4 dias para os ensaios efetivos realizados nos protótipos com e sem cobertura alocados na ETA de São Carlos-SP;
- As características de água drenada mostraram que a qualidade desta apresentou condição adequada para retornar ao início do tratamento, inclusive com resultados de metais atendendo parâmetros utilizados para água bruta na ETA de São Carlos-SP;

- 
- Em linhas gerais, a cobertura plástica construída e utilizada nos ensaios efetivos com protótipos contribuiu positivamente para aceleração da operação de remoção de água presente no resíduo;
  - A altura da cobertura em relação ao leito que apresentou os melhores resultados em condições ensolaradas, nubladas e chuvosas foi de 0,20 m. Entretanto, em situação real, aconselha-se ampliar este valor proporcionalmente em relação às dimensões adotadas para construção do leito de drenagem;
  - Os resultados obtidos no 6º ensaio demonstraram que, em condições chuvosas, o percentual de Sólidos Totais presentes no resíduo é alterado, mesmo dias após o despejo inicial do lodo bruto, ou seja, a ocorrência de chuvas certamente interfere no desaguamento;
  - Por serem obtidos resultados positivos de aceleração na remoção de água de lodo de ETA tanto em sua etapa de drenagem (polímero catiônico), como na evaporação (cobertura plástica), pode-se afirmar que pensando-se em um projeto deste sistema em escala real, aplicando-se as intervenções apresentadas nesta pesquisa (condicionamento com polímero e utilização de cobertura plástica), certamente as dimensões do(s) leito(s) de drenagem poderiam ser diminuídas, ocupando assim menor área em uma ETA.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Considerando as conclusões anteriores e os métodos utilizados, sugere-se que:

- Sejam realizados estudos mais aprofundados de caracterização de lodo de ETAs, para possibilitar maior propriedade quando se afirmar, concluir ou sugerir intervenções em relação a este resíduo;
- Operacionalmente, para melhor credibilidade dos resultados obtidos, sejam realizados ensaios em maior escala ou escala real utilizando-se de cobertura plástica com estimativa de altura proporcional às dimensões do leito;
- Sejam realizados estudos mais aprofundados acerca de custos de implantação deste tipo de sistema de remoção de água de lodos de ETAs;
- Sejam realizados ensaios com mantas geotêxteis de características variadas e com polímero catiônico nos protótipos de leito de drenagem ou em leitos de drenagem em escala real;
- Estude-se a utilização de outros polímeros, argumentando-se com maior propriedade acerca de sua capacidade de possibilitar que o resíduo seja mais facilmente desaguado;
- Sejam realizados ensaios em leitos de drenagem se utilizando de diferentes polímeros (aniônicos, catiônicos e não-iônicos);
- Sejam realizados ensaios em diferentes ETAs que se utilizam de diferentes coagulantes;
- Sejam realizados ensaios com análises diárias de umidade relativa do ar internamente à cobertura e análises diárias da temperatura do lodo para comparação entre leitos de drenagem cobertos e sem cobertura;

- 
- Sejam realizadas análises volumétricas precisas do lodo desaguado ao final dos ensaios. Uma sugestão é se utilizar de trituração do resíduo desaguado para posterior medição volumétrica;
  - Sejam realizados estudos específicos variando a altura da massa sólida despejada no leito de drenagem, para que se possa concluir a respeito de qual seria a altura limite de acordo com o percentual de Sólidos Totais presentes no lodo bruto;
  - Sejam realizados estudos específicos mais precisos acerca do percentual de redução de volume do resíduo, comparando-se o volume do lodo bruto (inicial) com o volume do lodo desaguado (final) em leitos de drenagem;
  - Sejam realizados estudos referentes ao intervalo de tempo máximo e mínimo entre um despejo e outro de lodo bruto no leito, para disponibilizar melhores parâmetros de projeto de ETA com remoção de lodo pré-determinada, sem a necessidade de se esvaziar o decantador;
  - Sejam realizadas pesquisas específicas referentes à possibilidade de redução da área do leito de drenagem quando se utilizar cobertura plástica, relacionando variáveis financeiras (ex. custo inicial).

## 8. REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, A. E. **Disposal of alum sludges**. Denver: Journal AWWA, v. 64, n. 1, jan. 1972, 46-52 p.
- ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Análise crítica de implantação de sistemas naturais de remoção de água livre e de lodo de ETA**. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Joinville, set. 2003.
- ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Gerenciamento de lodo de ETAs: remoção de água livre através de leito de secagem e lagoas**. AIDIS; Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Saneamento Ambiental: Ética e Responsabilidade Social. Joinville, ABES, p. 1-10 Ilus, set. 2003.
- ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Leito de Drenagem: Sistema Natural para Redução de Volume de Lodo de ETA**. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v13n1/a08v13n1.pdf>>. Acesso em 09 mar. 2010.
- AESABESP – Associação dos Engenheiros da SABESP. **Lodos de ETEs e ETAs: fontes pontuais de poluição ou recursos ambientais?** Revista SANEAS – Ano X – Nº 32 – jan./fev./mar. 2009. Disponível em: <<http://www.aesabesp.com.br/arquivos/saneas33.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2009.
- ARAÚJO, C. **Transmissão de calor**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). **ABNT NBR 10.004/2004 – Resíduos Sólidos**. São Paulo.
- BARROSO, M. M. **Influência das micro e macro propriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem**. 249p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Problemática dos metais nos resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., João Pessoa, set. 2001.
- BORBA, A. M. P. *et al.* **Solução Ambiental para os Rejeitos da ETA Guáira/SP através de Leito de Drenagem® e Sedimentador**. Disponível em: <<http://www.semasa.sp.gov.br/admin/biblioteca/docs/pdf/35Assemae033.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2011.
- BRASIL. Constituição. **Constituição**: República Federativa do Brasil. São Paulo: LTr, 1988. 292 p.

- \_\_\_\_\_. Ministério da Saúde. **Portaria 518 de 2004**. Disponível em: <[http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria\\_518.pdf](http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria_518.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2009.
- \_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Resoluções do CONAMA. Resolução 357 de 2005 do CONAMA**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 20 out. 2009.
- \_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Resoluções do CONAMA. Resolução 375 de 2006 do CONAMA**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 20 out. 2009.
- \_\_\_\_\_. Presidência da República Federativa do Brasil. **Legislação Federal Brasileira. Brasília. Lei 6.938 de 1981**. Disponível em: <<http://www.presidencia.gov.br/legislacao/>>. Acesso em: 10 jul. 2010.
- \_\_\_\_\_. Presidência da República Federativa do Brasil. **Legislação Federal Brasileira. Brasília. Lei 9.605 de 1998**. Disponível em: <<http://www.presidencia.gov.br/legislacao/>>. Acesso em: 10 jul. 2010.
- \_\_\_\_\_. Presidência da República Federativa do Brasil. **Legislação Federal Brasileira. Brasília. Lei 12.305 de 2010**. Disponível em: <<http://www.presidencia.gov.br/legislacao/>>. Acesso em: 15 jan. 2011.
- BUGG, H. M.; KING, P. H.; RANDALL, C. W. **Polyeletrolite conditioning of alum sludges**. Denver: Journal AWWA, v. 62, n. 12, dez. 1970, 792-795 p.
- CORDEIRO, J. S. **Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de estações de tratamento de águas**. 166 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.
- CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas**. 342 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- CORDEIRO, J. S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs**. In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.
- CORDEIRO, J. S. **Remoção natural de água de lodos de ETAs utilizando leitos de secagem e lagoas de lodo**. In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.
- CORDEIRO, J. S. **Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs)**. In.: ANDREOLI, C. V. *et al.* (2001). Coord. *Resíduos sólidos do saneamento*:

- processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 2001.
- CORNWELL, D. A.; BISHOP, M. M.; VANDERMEYDEN, C. **Handbook on water treatment plant wastes management**. Denver: AWWA Research Foundation, 1987, 461 p.
- CORNWELL, D. A.; KOPPERS, H. M. M. **Slib, Schamm, Sludge**. Denver: AWWA Research Foundation, 1990, 308 p.
- CORNWELL, D. A.; VANDERMEYDEN, C. **Nonmechanical dewatering of water plant residuals**. Denver: AWWA Research Foundation, 1998, 163 p.
- CULP, G. L.; CULP, R. L. **New concepts in water purification**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1974, 299 p.
- Di BERNARDO, A. S. **Influência das condições de aplicação de polímeros catiônicos na eficiência da floculação**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- Di BERNARDO, L.; Di BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RiMa, 2002.
- DOE, P. W. **Water treatment plant waste management**. In: PONTIUS, F. W., ed. *Water quality and treatment: A handbook of community water supplies*. 4<sup>th</sup> ed. New York: AWWA, 1990.
- EATON, D. A. *et al.* **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. AWWA, 21<sup>st</sup> Edition, 2005.
- FERREIRA FILHO, S. S.; ALÉM SOBRINHO, P. **Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. v.3, n.5, p. 128 – 136. Rio de Janeiro, 1998. Disponível em: <<http://issuu.com/thesamurai/docs/final6/128>>. Acesso em: 10 jul. 2009.
- FERREIRA FILHO, S. S. **Pré-condicionamento de lodos de estações de tratamento de água visando o seu adensamento por gravidade**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18., Rio de Janeiro, 1999.
- FONTANA, A. O. **Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros – estudo de caso – ETA Cardoso**. 161 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos, 2004.



- FREITAS, R. A. S. **Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos – fosfogesso e lama vermelha.** 122 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.
- GRANDIN, S. R. **Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água.** 456 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.
- HACH. **Hach Water Analysis Handbook Procedures.** 5<sup>th</sup> ed., 2008. Disponível em: <[http://www.hach.com/hc/browse.product.documentation/FILCAT\\_PROC\\_WAH\\_MAIN/NewLinkLabel=Hach+Water+Analysis+Handbook+Procedures,+5th+Edition/SESSIONID%7CBXpNME56RTFOekVtWjNWbGMzUkIXVTFEV1RFek1BPT1DREk1Tg==%7C](http://www.hach.com/hc/browse.product.documentation/FILCAT_PROC_WAH_MAIN/NewLinkLabel=Hach+Water+Analysis+Handbook+Procedures,+5th+Edition/SESSIONID%7CBXpNME56RTFOekVtWjNWbGMzUkIXVTFEV1RFek1BPT1DREk1Tg==%7C)>. Acesso em: 15 out. 2010.
- HSERPA. **Prosa e verso.** Disponível em: <<http://www.hserpa.prosaeverso.net/>>. Acesso em: 10 fev. 2011.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados da Estação Automática de Superfície, São Carlos-SP.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/sonabra/dspDadosCodigo.php?QTcxMQ==>>. Acesso em: 14 nov. 2010.
- INSTITUTO DE ENGENHARIA. **Relatório de conclusões Lodos de estações de tratamento de água.** Disponível em: <[http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/25D9BB34F9E0FAFC83257570004EC25E/\\$File/apresentacao\\_dione.pdf](http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/25D9BB34F9E0FAFC83257570004EC25E/$File/apresentacao_dione.pdf)>. Acesso em: 29 jul. 2009.
- KLAR *et al.* **Distribuição da Energia no interior de uma estufa plástica no período do inverno.** Disponível em: <<http://200.145.141.142/revistas/irriga/include/getdoc.php?id=99&article=38&mode=pdf>>. Acesso em 05 ago. 2009.
- KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1977.
- MILLER, R. G. *et al.* **The occurrence of aluminum in drinking water.** Denver: Journal AWWA, v. 76, n. 1, jan. 1984, 84-91 p.
- MURRAY, K.; DILLON, G. **Waterworks residuals management: a comparison of US and UK practice.** Washington: Management of water and wastewater solids for 21<sup>st</sup> century – A global perspective, jun. 1994.
- NETTO, J. M.; RICHTER, C. A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2003.
- NEUBAUER, W. R. **Waste alum sludges treatment.** Denver: Journal AWWA, v. 60, n. 7, jul. 1968, 819-826 p.

NILSEN, H. L.; CARNS, K. E.; DEBOICE, J. N. **Scroll centrifuge for dewatering wins at one plant.** New York: Water and Waste Engineering, v. 10, n. 3, mar. 1973, 44-47 p.

NOVAK, J. T.; LONGFORD, M. **The use of polymers for improving chemical sludge dewatering on sand beds.** Journal AWWA. Denver, v. 68, n. 2, p. 106-110, Feb. 1977.

OLIVEIRA, F. C. **Central de compostagem de lodo de esgoto da ETE Lavapés.** In: 11ª AUDIÊNCIA DE SUSTENTABILIDADE. Tema: Compostagem de resíduos orgânicos. São Paulo, set, 2008. Disponível em: <[http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/CF5925BCA69C14CB832574DB005D1114/\\$File/central\\_comp\\_lodo\\_etelavapes\\_11aud.pdf](http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/CF5925BCA69C14CB832574DB005D1114/$File/central_comp_lodo_etelavapes_11aud.pdf)>. Acesso em: 22 dez. 2010.

PAPANI, P. C. **Gestão de Pessoas em Sistemas de Abastecimento de Água.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos, 2009.

PATRIZZE, L. P. **Redução de volume de lodo gerado em decantadores de ETAs tradicionais utilizando espessamento por flotação e por gravidade seguidos de centrifugação.** 182 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

PESSOA, J. H. **Gestão dos Efluentes da ETA.** In: 1º Simpósio: Experiências em gestão de Recursos Hídricos por Bacia Hidrográfica, São Pedro, SP, 2007.

PROSAB – Tema 4 – Edital 4. **Subprojeto Estabilização, secagem e higienização de lodos – Subprojeto 2: Uso de energia solar para secagem e higienização.** Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/Prosab/videos/6.swf>>. Acesso em: 17 set. 2009.

REALI, M. A. P. **Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs.** In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.* Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2001.

SÃO PAULO (Estado). **Legislação Estadual Paulista.** São Paulo. Lei 997 de 1976. Disponível em: <<http://www.legislacao.sp.gov.br>>. Acesso em: 12 out. 2009.

\_\_\_\_\_. **Legislação Estadual Paulista.** São Paulo. Decreto-Lei 8.468 de 1976. Disponível em: <<http://www.legislacao.sp.gov.br>>. Acesso em: 12 out. 2009.

\_\_\_\_\_. **Legislação Estadual Paulista.** São Paulo. Lei 12.300 de 2006. Disponível em: <<http://www.legislacao.sp.gov.br>>. Acesso em: 19 nov. 2010.

SINGER, P. C. **Softener sludger disposal what's?** New York: Water and Wastes Engineering, v. 11, n. 12, 1974, 25-30 p.

SMOLLEN, M.; KAFAAR, A. **Electroosmotically enhanced sludge dewatering: Pilot-Plant Study.** Water Science Technology. v. 30, n. 8, pp. 159-168, 1994.

SUTHERLAND, E. R. **Treatment plant waste disposal in Virginia.** Denver: Journal AWWA, v. 61, n. 4, 1969, 186-189 p., ap.

TENCATE GEOTUBE. **Bags.** Disponível em: <<http://www.allonda.com/geotube.html>>. Acesso em: 10 set. 2010.

VAN DER HOEVEN. **Van der Hoeven – Estufas agrícolas e Galvanização à Fogo.** Disponível em: <<http://www.vanderhoeven.com.br/>>. Acesso em: 17 out. 2009.

VANDERMEYDEN, C.; CORNWELL, D. A. **A U.S. Perspective of beneficial use programs for water treatment plant residuals.** In: Management of water and waste water solids, for the 21<sup>st</sup> century: A global perspective. Washington, D. C.: section 4, jun. 1994, 15-28 p.

VESILIND, P. A.; HSU, C. C. **Limits of sludge dewaterability.** Water Science Technology. v. 36, n. 11, pp. 87-91, 1997.

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

VILLELA, A. **Apontamentos de pesquisa de mestrado em andamento.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana (PPGEU) – Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos, 2010.

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION – WPFC. **Sludge dewatering – Manual of practice.** Washington: n. 20, 1983.

WENDWOLF. **Anlagenbau GmbH – Solare Trocknungstechnik.** Disponível em: <<http://www.wendewolf.com/klssystem.php?lang=en>>. Acesso em: 6 out. 2009.

## 9. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- ACHON, C. L. **Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISO 14.001**. 235p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA. **Water treatment plant sludges – An update of state of the art** – Commite Report – part 2. Journal AWWA. Denver, v. 70, n. 10, p. 548-554, Oct. 1978.
- ANJOS, L. A.; FERREIRA, J. A. **Aspectos de saúde coletiva e ocupacional associados à gestão dos resíduos sólidos municipais**. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 17(3): 689-696, mai-jun, 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/csp/v17n3/4651.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2009.
- BITTENCOURT, S. **Uso de lodo de ETA na recuperação de área degradada – SANEPAR**. Disponível em: <[http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/ECD77A4B6AF9F2EE83257570004ED314/\\$File/apresentacao\\_simone\\_sanepar.pdf](http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/ECD77A4B6AF9F2EE83257570004ED314/$File/apresentacao_simone_sanepar.pdf)>. Acesso em: 29 jul. 2009.
- CHAO, I. R.; MORITA, D. M. **Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água**. Disponível em: <[http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/7EFA9F9409E3E2FA83257570004EC96E/\\$File/apresentacao\\_iara.pdf](http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/7EFA9F9409E3E2FA83257570004EC96E/$File/apresentacao_iara.pdf)>. Acesso em: 29 jul. 2009.
- COSTA, V. J.; FERNANDES, L. P.; THOMAS, G. C. **Modelagem matemática da secagem de madeira em estufas – fase de aquecimento**. Proceedings of the 11<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2006 Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering -- ABCM, Curitiba, Brazil, Dec. 5-8, 2006. Disponível em: <<http://www.cdr.unc.br/cursos/EngenhariaMecatronica/Secagem%20de%20Madeira%20em%20Estufas.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2009.
- CORDEIRO, J. S. **Remoção de água de lodos de ETAs através de filtração forçada**. In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.
- CORDEIRO, J. S.; REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J. **Desidratação de lodo por centrifugação**. In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.
- CORDEIRO, J. S.; REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J. **Desidratação de lodo por centrifugação**. In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de*

*tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.* Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.

Di BERNARDO, L.; CARVALHO, E. H.; SCALIZE, P. S. **Disposição de resíduos líquidos de ETAs em ETEs.** In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.* Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.

FORTES, R. M. **Estudo da estabilização do lodo oriundo da ETA de Taiapuê para utilização em reaterro de valas.** Disponível em: <[http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/4EED686AAF6466C883257570004ECCC9/\\$File/apresentacao\\_rita\\_mackenzie.pdf](http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/4EED686AAF6466C883257570004ECCC9/$File/apresentacao_rita_mackenzie.pdf)>. Acesso em: 29 jul. 2009.

HSIEH, H. N.; RAGHU, D. **Criteria dewatering for water treatment plant residual monofill.** Denver: AWWARF, 1997, 199 p.

JACOMASSI, F. E. **Estudo das micropropriedades de resíduos sólidos gerados nos decantadores de Estações de Tratamento de Água.** 115 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos, 2009.

KRASAUSKAS, J. M. **Review of sludge disposal practices.** Journal AWWA. Denver, v. 61, n. 5, p. 225-230, May 1969.

REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J. **Espessamento de lodos de ETAs.** In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.* Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.

SCALIZE, P. S.; Di BERNARDO, L.; SEIXAS, A. S. S. **Simulação da disposição de resíduos de ETAs em ETEs – remoção de sólidos e de ovos e larvas de helmintos.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21., João Pessoa, 2001.

SOUZA, R. F. **Concreto leve produzido com compósito manufacturado à base de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira.** Disponível em: <[http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/B12C9484F0D6BA278325757000EC5C6/\\$File/apresentacao\\_francis\\_ufscar.pdf](http://www.sabesp.com.br/Sabesp/filesmng.nsf/B12C9484F0D6BA278325757000EC5C6/$File/apresentacao_francis_ufscar.pdf)>. Acesso em: 29 jul. 2009.