



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

CRISTIANE SILVEIRA

**DESAGUAMENTO DE LODO DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ÁGUAS POR LEITO DE DRENAGEM /  
SECAGEM COM MANTA GEOTÊXTIL**

---

LONDRINA  
2012

**CRISTIANE SILVEIRA**

**DESAGUAMENTO DE LODO DE ESTAÇÕES DE  
TRATAMENTO DE ÁGUAS POR LEITO DE DRENAGEM /  
SECAGEM COM MANTA GEOTÊXTIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

Orientadora: Profa. Dra. Emília Kiyomi Kuroda

LONDRINA  
2012

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina.**

### **Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

S587d Silveira, Cristiane  
Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem / secagem com manta geotêxtil. – Londrina, 2012.  
137 f. : il.

Orientadora: Emília Kiyomi Kuroda.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2012.  
Inclui bibliografia.

1. Taxa de aplicação de sólidos – Teses. 2. Fase de drenagem. – Teses. 3. Fase de secagem – Teses. 4. Uso sucessivo – manta – Teses. I. Kuroda, Emília Kiyomi. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

CDU 628

CRISTIANE SILVEIRA

**DESAGUAMENTO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE  
ÁGUAS POR LEITO DE DRENAGEM / SECAGEM COM MANTA  
GEOTÊXTIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Emília Kiyomi Kuroda  
Universidade Estadual de Londrina - UEL  
Orientadora

---

Prof. Dr. Luiz Di Bernardo  
Universidade de Ribeirão Preto - URP

---

Prof. Dr. João Sérgio Cordeiro  
Universidade Federal de São Carlos - UFSCA

Londrina, 28 de fevereiro de 2012.

*Dedico a todos que me apoiaram e incentivaram, em  
especial à minha família.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre estar me iluminando e dando força e coragem para caminhar com fé e perseverança.

À Profa. Dra. Emília Kiyomi Kuroda pela valiosa orientação, pelos ensinamentos que proporcionaram meu crescimento pessoal e profissional, pelos incentivos e pela confiança que despertou meu profundo respeito e admiração.

À CAPES pela bolsa concedida.

Ao Departamento de Construção Civil e aos docentes do programa de Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento.

À Sanepar na pessoa dos Srs. José Augusto Gonçalves, Algacir Leite de Almeida, Antonio Gil Gameiro, Roberto Massami Arai, e demais funcionários pela colaboração e auxílio nas coletas de lodo.

Aos Srs. Julio Cesar Leon Soto e Robson Rodrigues de Oliveira das Empresas S. S. Santana Tecnologia Científica e Lab Company Serviços para Laboratórios, por gentilmente emprestar a câmara climática utilizada nos experimentos.

À Maccaferri Ltda. pela doação das mantas geotêxteis.

Aos Srs. Carlos Alberto Duarte e José Reginaldo dos Santos funcionários do Laboratório de Maquetes da UEL, sempre prestativos, pelo auxílio na montagem dos protótipos.

Aos colegas do LabSan, Marcos, André, Luiza, Amanda, Aline, Laís, Camila Maler, Flávia que de alguma forma contribuíram no decorrer dos experimentos, em especial a Camila Abe, Leonardo e Rodrigo pela ajuda prestada e companhia durante os "dias e noites" de realização dos experimentos.

À Karla Bigetti Guergoletto por me incentivar a conhecer o programa de Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento.

À Francine, Flávia e Viviane pela amizade.

Ao Diego pelo carinho, compreensão, incentivo e apoio.

À minha família, pela confiança e carinho, em especial a minha irmã Gislaine, pelo seu exemplo, incentivo e apoio em todos dos momentos da minha vida.

*"Eu não posso mudar a direção do vento, mas posso  
ajustar as minhas velas para sempre alcançar o meu  
destino."*

*Jimmy Dean*

SILVEIRA, Cristiane. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem / secagem com manta geotêxtil**. 2012. 137 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) -Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

## RESUMO

Dentre as técnicas utilizadas para o tratamento de lodos de decantadores de ETAs, os sistemas naturais têm apresentado resultados promissores no Brasil. Dentro desse contexto, o objetivo geral desse trabalho foi avaliar o sistema de desaguamento de dois lodos de decantadores de ETAs em leitos de drenagem / secagem, com uso de manta geotêxtil em ensaios de laboratório por meio de protótipos de escalas reduzida e piloto. Foram considerados como aspectos técnicos de projeto: densidade da manta geotêxtil, taxa de aplicação de sólidos - TAS, taxa de aplicação volumétrica - TAV, duração das fases de drenagem do lodo e de secagem da torta de lodo. O desempenho do sistema de desaguamento foi avaliado por meio da caracterização quali/quantitativa dos lodos afluentes ao sistema, da água drenada e das tortas de lodo retido sob diferentes condições climáticas de exposição, considerando as características do manancial e produtos químicos aplicados no tratamento de água. Por fim, foram realizados estudos exploratórios visando a disposição final da torta de lodo desaguada como camada de cobertura ou de impermeabilização de fundo de células em aterros sanitários em substituição ao solo. Nas condições de estudo, o sistema de desaguamento de lodos de decantadores de ETAs proposto apresentou resultados promissores quanto aos aspectos quali/quantitativos de eficiência, possibilitando na fase de drenagem, a produção de águas drenadas com qualidade compatível com corpos de água doce (classes I e II) estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama, visando à proteção dos corpos hídricos receptores ou ainda, para reaproveitamento do água drenada para produção de água tratada na própria ETA. Na fase de secagem, foi possível obter aumento do teor de sólidos da torta sob condições críticas de secagem -exposição natural de inverno sem proteção à intempéries, e duração de 5 a 13 dias, com valores de teor de sólidos da mesma ordem de grandeza que os obtidos por desaguamentos mecânicos. O ensaio em colunas de lixiviação revelou que os metais presentes no lodo muito provavelmente não oferecerão riscos ao meio ambiente, pois não foram disponibilizados a partir do contato com a água, sob a condição crítica de precipitação aplicada. Em relação à classificação dos lodos de ETAs segundo a NBR 10.004 (2004), os lodos foram classificados como resíduo Classe II A - Não inertes por apresentar constituintes que foram solubilizados em concentrações superiores aos limites estabelecidos no Anexo G da NBR 10.004 (2004).

**Palavras-chave:** Taxa de aplicação de sólidos. Fase de drenagem. Fase de secagem. Uso sucessivo da manta. Disposição final.

SILVEIRA, Cristiane. **Dewatering of sludge from water treatment plants by bed drainage / drying with geotextile blanket.** 2012. 137 p. Dissertation (Mastering in Construction and Sanitation Engineering) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

### **ABSTRACT**

Among the techniques used for treatment of sludge of WTP settlement, the natural systems have been presenting promising results in Brazil. In this context, the objective of this work was to evaluate the dewatering system of two sludges of different WTP settlement in drainage / drying beds, with use of geotextile layer in laboratorial prototypes of reduced and pilot scales. We considered as technical aspects of project: density of geotextile layer, solids application rate - TAS, volume application rate - TAV, duration of drainage and drying phase. The performance of dewatering system was evaluated by the qualitative / quantitative characterization of initial sludges, of the drained water and of the dried sludges under different climatic conditions of exposition, considering the resources characteristics and chemical products applied in the water treatment. Finally, exploratory studies were accomplished seeking the final disposition of the dewatered sludges as covering layer or impermeabilization of cells in sanitary landfill in substitution to the soil. In the study conditions, the dewatering system of sludge of WTP settlement presented promising results as for the qualitative / quantitative aspects of efficiency, making possible in the drainage phase, the production of water drained with quality compatible to fresh water bodies (classes I and II) established by the Resolution 357/05 / Conama, seeking to the protection of the fresh waters bodies or to reuse of the water drained for water production in WTP. In the drying phase, it was possible to obtain increase of the solids concentrations under critical conditions of drying -natural expositions of winter without protection to weather, and duration from 5 to 13 days, with similar solids concentration values of that obtained by mechanical dewatering techniques. The lixiviation columns test revealed that the metals of sludges very probably won't offer risks to the environment, because they were not made available after contact with the water, under the critical condition of precipitation applied. In relation to the classification of sludges, according to NBR 10.004 (2004), the sludges were classified as residue Class II A - no inert for presenting constituent in concentrations higher to the established limits in the Annex G of NBR 10.004 (2004).

**Keywords:** Application solids rate. Drainage phase, drying phase. Successives uses of geotextile layer. Final disposition.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano .....	23
<b>Figura 2</b> - Esquema em planta de uma ETA de ciclo completo e pontos de geração de resíduos.....	25
<b>Figura 3</b> - Frações de água constituintes dos lodos de ETAs.....	28
<b>Figura 4</b> - Fluxograma do balanço de massa de uma ETA convencional.....	34
<b>Figura 5</b> - Corpo de água natural em condições naturais - antes de receber os lodos de ETA .....	36
<b>Figura 6</b> - Corpo de água após receber os lodos de ETA.....	36
<b>Figura 7</b> - Rede de interação dos impactos oriundos do lançamento in natura do lodo de ETA em corpos de água .....	37
<b>Figura 8</b> - Bag vertical .....	45
<b>Figura 9</b> - Bag horizontal .....	45
<b>Figura 10</b> - Secagem de lodo numa lagoa de lodo .....	46
<b>Figura 11</b> - Etapas de desenvolvimento dos sistemas de leitos de secagem.....	48
<b>Figura 12</b> - Formas de colmatção da manta geotêxtil por ação física.....	50
<b>Figura 13</b> - Lodo acumulado no decantador convencional após esvaziamento completo para limpeza .....	58
<b>Figura 14</b> - Remoção final do lodo acumulado no decantador por jateamento .....	58
<b>Figura 15</b> - Decantadores de alta taxa da ETA Tibagi.....	59
<b>Figura 16</b> - Diagrama dos ensaios de desaguamento .....	63
<b>Figura 17</b> - Esquema da unidade de desaguamento em escala reduzida.....	64
<b>Figura 18</b> - Fotos com detalhes da unidade de desaguamento em escala reduzida	64
<b>Figura 19</b> - Esquema da unidade de desaguamento utilizada na escala piloto .....	66
<b>Figura 20</b> - Foto da unidade de desaguamento utilizada na escala piloto.....	66
<b>Figura 21</b> - Esquema e equipamentos utilizados no teste de resistência específica	70
<b>Figura 22</b> - Foto dos equipamentos utilizados no teste de resistência específica .....	70
<b>Figura 23</b> - Organograma dos sucessivos ensaios de desaguamentos com manta geotêxtil.....	71
<b>Figura 24</b> - Esquema do ensaio de lixiviação dos lodos tipos A e B .....	73
<b>Figura 25</b> - Foto do ensaio de lixiviação dos lodos tipos A e B .....	73
<b>Figura 26</b> - Frascos de drenados coletados durante a drenagem do lodo tipo A.....	80
<b>Figura 27</b> - Frascos de drenados coletados durante a drenagem do lodo tipo B.....	80

<b>Figura 28</b> - Torta de lodo tipo A logo após a fase de drenagem (ST 15,7%) .....	84
<b>Figura 29</b> - Torta de lodo tipo B logo após a fase de drenagem (ST 13,9%).....	84
<b>Figura 30</b> - Fotos da torta de lodo tipo A retida na manta logo após a fase de drenagem e após 3, 5 e 13 dias de secagem em condição natural de verão .....	88
<b>Figura 31</b> - Fotos da torta de lodo tipo B retida na manta logo após a fase de drenagem e após 3, 5 e 13 dias de secagem em condição natural de verão .....	88
<b>Figura 32</b> - Torta de lodo tipo A após 5 dias de secagem na condição controlada de verão (ST 35,6%) .....	93
<b>Figura 33</b> - Torta de lodo tipo B após 5 dias de secagem na condição controlada de verão (ST 23,5%) .....	93
<b>Figura 34</b> - Torta de lodo tipo A após 5 dias de secagem na condição controlada de inverno (ST 32,6%) .....	93
<b>Figura 35</b> - Torta de lodo tipo B após 5 dias de secagem na condição controlada de inverno (ST 20,3%) .....	93
<b>Figura 36</b> - Fotos do teste sedimentabilidade dos lodos tipos A e B .....	99
<b>Figura 37</b> - Torta do lodo tipo A logo após a fase de drenagem (ST 12,9%).....	108
<b>Figura 38</b> - Torta do lodo tipo A no 4º dia de secagem (ST 15%) .....	108
<b>Figura 39</b> - Torta do lodo tipo A após 7 dias de secagem (ST 16,6%).....	108
<b>Figura 40</b> - Torta do lodo tipo B logo após a fase de drenagem (ST 11,2%) .....	109
<b>Figura 41</b> - Torta de lodo do lodo tipo B após 7 dias de secagem (ST 30,2%) .....	109
<b>Figura 42</b> - Foto das amostras compostas dos líquidos percolados das colunas de lixiviação dos lodos tipos A e B.....	118

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Produção de lodo em função da qualidade da água bruta .....	27
<b>Tabela 2</b> - Características físicas e químicas para o lodo de três ETAs .....	30
<b>Tabela 3</b> - Comparação entre as operações de desaguamento de lodos de ETA.....	44
<b>Tabela 4</b> - Características do lodo bruto e do drenado da ETA Cardoso .....	51
<b>Tabela 5</b> - Parâmetros de projetos estudados por Oliveira (2010) .....	53
<b>Tabela 6</b> - Características da manta geotêxtil utilizada nos ensaios de desaguamentos .....	60
<b>Tabela 7</b> - Parâmetros e métodos / equipamentos utilizados na caracterização dos lodos e drenados .....	62
<b>Tabela 8</b> - Parâmetros de projeto aplicados nos ensaios em escala reduzida - Etapa I.....	65
<b>Tabela 9</b> - Parâmetros de projeto aplicados nos ensaios em escala piloto - Etapa II .....	66
<b>Tabela 10</b> - Parâmetros e métodos / equipamentos utilizados na caracterização dos líquidos drenados das colunas de lixiviação .....	74
<b>Tabela 11</b> - Características físicas, químicas e microbiológicas dos lodos de estudo utilizadas nos ensaios em escala reduzida - Etapa I e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para enquadramento em corpos de água doce Classes I e II.....	77
<b>Tabela 12</b> - Porcentagens de volume de drenado que atenderam a cada condição na escala reduzida .....	78
<b>Tabela 13</b> - Observações da fase de drenagem dos lodos tipos A e B / escala reduzida - Etapa I.....	80
<b>Tabela 14</b> - Resultados da fase de secagem nas condições controladas e naturais de verão e inverno dos lodos tipos A e B.....	94
<b>Tabela 15</b> - Características do lodo tipo A utilizado na escala piloto e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água doce Classe I e II.....	95
<b>Tabela 16</b> - Características dos lodos tipo B utilizado na escala piloto e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água doce Classe I e II.....	96
<b>Tabela 17</b> - Observações da fase de drenagem dos lodos tipos A e B / escala piloto - Etapa II.....	101

<b>Tabela 18</b> - Porcentagens de volume de drenado que atenderam a cada condição na escala piloto.....	101
<b>Tabela 19</b> - Resultados da quantificação de metais no lodo inicial tipo A e amostras compostas dos drenados - ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala piloto.....	104
<b>Tabela 20</b> - Resultados da quantificação de metais no lodo inicial tipo B e amostras compostas dos drenados - ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala piloto.....	105
<b>Tabela 21</b> - Dados quantitativos das fases de drenagem e secagem nas Etapas I e II .....	111
<b>Tabela 22</b> - Dados qualitativos da fase de secagem dos lodos tipos A nas Etapas I e II.....	113
<b>Tabela 23</b> - Dados qualitativos da fase de secagem dos lodos tipos B nas Etapas I e II.....	113
<b>Tabela 24</b> - Resultados qualitativos das fases de drenagem em escala reduzida -Etapa I e escala piloto - Etapa II para lodo tipo A e amostras compostas dos drenados - ACD I, II, III e IV e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água doce Classe I e II.....	114
<b>Tabela 25</b> - Resultados qualitativos das fases de drenagem em escala reduzida -Etapa I e escala piloto - Etapa II para o lodo tipo B e amostras compostas dos drenados - ACD I, II, III e IV e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água doce Classe I e II.....	115
<b>Tabela 26</b> - Caracterização das amostras compostas dos lixiviados dos lodos tipos A e B .....	119
<b>Tabela 27</b> - Resultados dos parâmetros inorgânicos e orgânicos analisados nos extratos lixiviados do lodo tipo A .....	120
<b>Tabela 28</b> - Resultados dos parâmetros inorgânicos e orgânicos analisados nos extratos solubilizados do lodo tipo A.....	121
<b>Tabela 29</b> - Resultados dos parâmetros inorgânicos e orgânicos analisados nos extratos lixiviados do lodo tipo B .....	122
<b>Tabela 30</b> - Resultados dos parâmetros inorgânicos e orgânicos analisados nos extratos solubilizados do lodo tipo B .....	123

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Curvas de remoção de água filtrada de sistemas, modificado por Cordeiro 1993 e remodelado em 2001 .....	48
<b>Gráfico 2</b> - Gráfico típico dos valores de $(t/v)$ em função de $v$ .....	68
<b>Gráfico 3</b> - Resultados da fase de drenagem típica para o lodo tipo A / escala reduzida - Etapa I.....	79
<b>Gráfico 4</b> - Resultados da fase de drenagem típica para o lodo tipo B / escala reduzida - Etapa I.....	79
<b>Gráfico 5</b> - Resultados da caracterização do lodo inicial tipo A e amostras compostas dos drenados - ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala reduzida.....	81
<b>Gráfico 6</b> - Resultados da caracterização do lodo inicial tipo B e amostras compostas dos drenados - ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala reduzida.....	82
<b>Gráfico 7</b> - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo A na condição controlada de verão.....	85
<b>Gráfico 8</b> - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo B na condição controlada de verão.....	85
<b>Gráfico 9</b> - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo A na condição natural de verão .....	86
<b>Gráfico 10</b> - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo B na condição natural de verão .....	87
<b>Gráfico 11</b> - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo A na condição controlada de inverno .....	89
<b>Gráfico 12</b> - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo B na condição controlada de inverno .....	90
<b>Gráfico 13</b> - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo A na condição natural de Inverno.....	91
<b>Gráfico 14</b> - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo B na condição natural de inverno .....	91
<b>Gráfico 15</b> - Curvas de sedimentação dos lodos tipos A e B .....	98

<b>Gráfico 16</b> - Resultados da fase de drenagem para o tipo A na escala piloto / Etapa II .....	100
<b>Gráfico 17</b> - Resultados da fase de drenagem para o tipo B na escala piloto / Etapa II .....	100
<b>Gráfico 18</b> - Resultados da caracterização do lodo inicial tipo A e amostras compostas dos drenados - ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala piloto .....	102
<b>Gráfico 19</b> - Resultados da caracterização do lodo inicial tipo B e amostras compostas dos drenados - ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala piloto .....	103
<b>Gráfico 20</b> - Resultados da fase de secagem do lodo tipo A em escala piloto / Etapa II - Condição natural de exposição .....	107
<b>Gráfico 21</b> - Resultados da fase de secagem do lodo tipo B em escala piloto - Etapa II - condição natural de exposição .....	109
<b>Gráfico 22</b> - Resultados de turbidez dos drenados produzidos nos Ensaios 1 ao 5 em função do tempo de drenagem .....	116
<b>Gráfico 23</b> - Resultados das porcentagens de volume que atenderam a cada condição imposta .....	117

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxigênio
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxigênio
<b>ETA</b>	Estação de Tratamento de Água
<b>ETE</b>	Estação de Tratamento de Esgoto
<b>FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O</b>	Cloreto Férrico Hexahidratado
<b>IAP</b>	Instituto Ambiental do Paraná
<b>ICP-OES</b>	Espectrometria de Emissão Óptica Plasma Acoplado Indutivamente
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>OMS</b>	Organização Mundial da Saúde
<b>PAC</b>	Hidróxicloreto de polialumínio
<b>pH</b>	Potencial de Hidrogênio
<b>PROSAB</b>	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
<b>SABESP</b>	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
<b>SEMA</b>	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
<b>SANEPAR</b>	Companhia de Saneamento do Paraná
<b>SDT</b>	Sólidos Dissolvidos Totais
<b>SFT</b>	Sólidos Fixos Totais
<b>SSF</b>	Sólidos Suspensos Fixos
<b>SST</b>	Sólidos Suspensos Totais
<b>SSV</b>	Sólidos Suspensos Voláteis
<b>ST</b>	Sólidos Totais
<b>SVT</b>	Sólidos Voláteis Totais
<b>TAS</b>	Taxa de aplicação de sólidos
<b>TAV</b>	Taxa de aplicação volumétrica
<b>USP</b>	Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	19
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	21
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	22
3.1	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA .....	22
3.1.1	Tratamento de água por ciclo completo.....	23
3.2	GERAÇÃO DE RESÍDUOS NUMA ETA .....	26
3.2.1	Características qualitativas e quantitativas dos resíduos de ETA.....	26
3.2.2	Influência da operação dos decantadores e filtros nas características dos resíduos de ETA.....	31
3.2.3	Métodos de quantificação da produção global de lodo em ETA.....	32
3.3	IMPACTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS AO DESCARTE DE LODOS DE DECANTADORES DE ETAs EM CORPOS DE ÁGUA .....	35
3.4	ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS A LODOS DE DECANTADORES DE ETAs.....	38
3.5	EVOLUÇÃO DAS PESQUISAS RELACIONADAS A RESÍDUOS DE ETAs NO BRASIL .....	40
3.6	ALTERNATIVAS PARA TRATAMENTO, DISPOSIÇÃO E REUSO DOS RESÍDUOS DE ETAs .....	42
3.6.1	Desaguamento de Resíduos de ETAs .....	43
3.6.1.1	Leitos de drenagem / secagem.....	46
3.6.2	Disposição final dos lodos de ETAs .....	53
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	56
4.1	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA CAFEZAL .....	56
4.2	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA TIBAGI.....	58
4.3	ENSAIOS DE DESAGUAMENTO.....	59
4.3.1	Etapa I - Desaguamento de lodo de decantadores de ETAs em protótipos de escala reduzida .....	63

4.3.2	Etapa II - Desaguamento de lodo de decantadores de ETAs em protótipos de escala piloto.....	65
4.3.2.1	Teste de sedimentabilidade - Ensaio em coluna de sedimentação .....	67
4.3.2.2	Teste de resistência específica .....	67
4.4	INFLUÊNCIA DA EXECUÇÃO DE SUCESSIVOS DESAGUAMENTOS NA MANTA GEOTÊXTIL .....	70
4.5	DISPOSIÇÃO FINAL DA TORTA DE LODO.....	71
4.5.1	Ensaio em colunas de lixiviação .....	71
4.5.2	Classificação dos lodos de ETAs segundo a NBR 10.004 / 04 .....	74
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>76</b>
5.1	ETAPA I - DESAGUAMENTO DE LODO DE DECANTADORES DE ETAs EM PROTÓTIPOS DE ESCALA REDUZIDA.....	76
5.1.1	Caracterização dos lodos de estudo utilizados nos protótipos em escala reduzida.....	76
5.1.2	Fase de drenagem / Escala reduzida .....	78
5.1.3	Fase de secagem / Escala reduzida .....	83
5.1.3.1	Fase de secagem na condição de verão.....	83
5.1.3.2	Fase de secagem na condição de inverno .....	88
5.2	ETAPA II - DESAGUAMENTO DE LODO DE DECANTADORES DE ETAs EM PROTÓTIPOS EM ESCALA PILOTO .....	94
5.2.1	Caracterização dos lodos de estudo utilizados na escala piloto .....	94
5.2.1.1	Teste de sedimentabilidade - Ensaio em coluna de sedimentação .....	98
5.2.1.2	Teste de resistência específica .....	99
5.2.2	Fase de Drenagem / Escala piloto.....	99
5.2.3	Fase de Secagem / Escala piloto .....	106
5.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESAGUAMENTO EM ESCALA REDUZIDA - ETAPA I E ESCALA PILOTO - ETAPA II .....	110
5.4	INFLUÊNCIA DA EXECUÇÃO DE SUCESSIVOS DESAGUAMENTOS NA MANTA GEOTÊXTIL .....	116
5.5	DISPOSIÇÃO FINAL DA TORTA DE LODO.....	118

5.5.1	Teste de lixiviação - Ensaio em colunas de lixiviação .....	118
5.5.2	Classificação dos lodos de ETA .....	120
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>125</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>128</b>

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A água em seu estado natural, quando coletada em mananciais, apresenta inúmeras impurezas que podem causar efeitos deletérios à saúde humana. Na necessidade de fornecer água potável para consumo humano, as Estações de Tratamento de Água – ETAs são projetadas e operadas para remover determinadas impurezas, produzindo água com características que atendam ao padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria 2.914 / 11 do Ministério da Saúde.

Nas ETAs que adotam o tratamento de água por ciclo completo, composto pela seqüência dos processos e operações de coagulação, floculação, sedimentação e filtração, os resíduos são gerados principalmente nas unidades de sedimentação e filtração e são chamados de lodos de decantadores e águas de lavagem de filtros.

Os resíduos de ETAs possuem características bastante particulares que variam principalmente em função da qualidade da água bruta, dos produtos químicos adicionados no tratamento e das condições de operação do sistema. São constituídos basicamente por compostos orgânicos e inorgânicos presentes originalmente na forma sólida ou dissolvida no manancial (areia, silte, argila, microrganismos, metais, matéria orgânica, entre outros), acrescidos de resíduos dos produtos químicos aplicados no tratamento de água, principalmente, sais de metais utilizados como coagulante.

Os lodos de decantadores caracterizam-se por possuir grande teor de umidade, geralmente maior que 95%. No entanto, a NBR 10.004 / 04 classifica-os como resíduos sólidos, não sendo permitido seu lançamento *in natura* no meio ambiente. Devido principalmente à grande quantidade de água agregada nos lodos de decantadores, seu transporte possui um custo relativamente elevado fazendo com que grande parte das ETAs descarte esses resíduos nos corpos de água mais próximos.

Dentre os impactos que o descarte de lodo de ETAs pode causar em um corpo de água, estão a deterioração da qualidade de água pela adição de sólidos e microrganismos removidos previamente no tratamento de água, alterações da biota aquática, redução do volume útil do corpo de água devido ao assoreamento e possíveis efeitos tóxicos aos seres humanos e animais.

As Leis 9.433 / 97 – Política Nacional de Recursos Hídricos e 9.605 / 98 – Crimes Ambientais, trazem em seus conteúdos critérios relacionados à gestão dos resíduos de ETAs, uma vez que consideram o lançamento de resíduos *in natura* crime ambiental.

O tratamento dos resíduos de ETAs consiste basicamente numa separação sólido-líquido, via clarificação / adensamento e desidratação, aumentando a concentração de sólidos no material sedimentado, a fim de possibilitar a reutilização e / ou descarte adequado do drenado em corpos de água, e viabilizar a disposição adequada do material sólido.

O desaguamento de lodo de ETAs pode ser realizado a partir do uso de sistemas naturais e / ou mecânicos de remoção de água. Os equipamentos utilizados no desaguamento mecânico são relativamente eficientes, não dependem de condições climáticas favoráveis, mas possuem custos elevados de aquisição, requerem a aplicação de produtos químicos e consomem energia elétrica para seu funcionamento. Dentre os mais utilizados podem-se citar as centrífugas e prensas desaguadoras. Os sistemas naturais como lagoas de lodo e leitos de drenagem / secagem, não utilizam produtos químicos e energia elétrica, porém necessitam de grandes áreas para instalação e dependem das condições climáticas.

O Brasil apresenta condições favoráveis de espaço e recursos naturais que quando aliadas ao baixo custo de instalação e operação, indicam potencial vantagem na adoção de sistemas naturais para o tratamento de resíduos de ETAs, em especial os leitos de drenagem / secagem.

A técnica de desaguamento por leitos de drenagem / secagem tem sido utilizada para remoção de água de lodos há muitos anos. No Brasil, Cordeiro (1993) iniciou estudos sobre a possibilidade de modificação da estrutura dos leitos de secagem convencionais, compostos de pedregulho, areia grossa e uma camada de tijolos, objetivando o aumento da eficiência do desaguamento de lodos de ETAs. Dando continuidade a este trabalho, várias pesquisas foram realizadas por Cordeiro (2000; 2001), Achon (2003), Fontana (2004), Silva (2006) e Barroso (2007) sobre leitos de drenagem / secagem com uso de mantas geotêxteis, os quais apresentaram resultados promissores no processo de desaguamento de lodos de decantadores de ETAs.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho foi avaliar o sistema de desaguamento de dois lodos de decantadores de ETAs em leitos de drenagem / secagem, com uso de manta geotêxtil e ensaios de laboratório em escalas reduzida e piloto, considerando os aspectos técnicos de projeto:

- Concepção física: densidade da manta geotêxtil, taxa de aplicação de sólidos - TAS e taxa de aplicação volumétrica - TAV;
- Condições operacionais: duração das fases de drenagem do lodo e de secagem da torta de lodo retida sob diferentes condições climáticas de exposição;
- Desempenho: caracterização quali / quantitativa dos lodos afluentes ao sistema de desaguamento, dos lodos drenados produzidos ao longo do tempo e das tortas de lodo retido, ao longo do tempo, considerando as características do manancial e produtos químicos aplicados no tratamento de água;
- Manutenção: influência do uso da manta geotêxtil em sucessivos ensaios de desaguamentos em relação a eficiência na fase de drenagem;
- Manejo e destinação da torta: possibilidade de contaminação do meio ambiente pela realização do ensaio de lixiviação em protótipos de escala reduzida, simulando uma situação de aplicação prática e crítica de precipitação em campo, quando o material for usado como cobertura de células em aterros sanitários.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

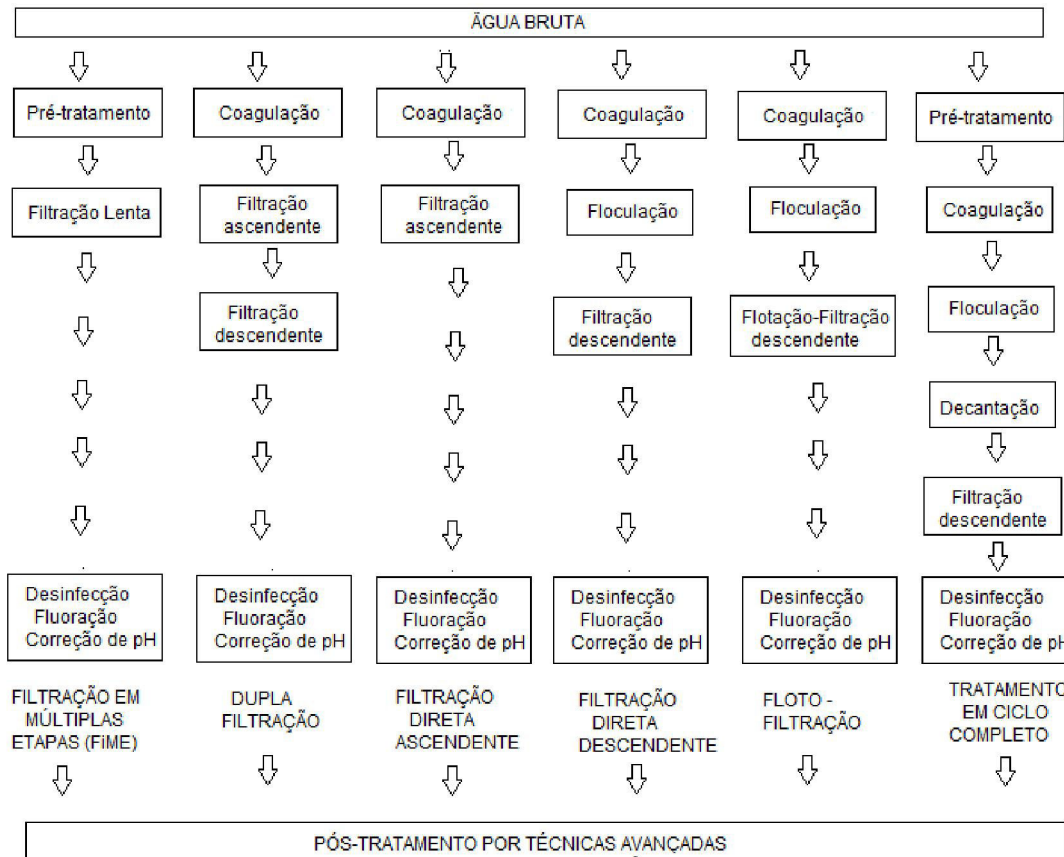
#### **3.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

A água em seu estado natural quando captada num manancial pode não atender aos requisitos de qualidade para fins potáveis, apresentando partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microorganismos e outras substâncias deletérias à saúde humana. Segundo Di Bernardo e Paz (2008) as Estações de Tratamento de Água - ETAs foram criadas para remover as impurezas presentes nas águas das fontes de abastecimento, por meio de uma combinação de processos e de operações de tratamento.

As ETAs têm como objetivo principal tornar determinada água própria para a utilização a que se destina, atendendo aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 2.914 / 11 do Ministério da Saúde. O art. 5º da referida portaria define a expressão água potável como “água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido nesta Portaria e que não ofereça riscos à saúde”, sendo o padrão de potabilidade: “conjunto de valores permitidos como parâmetro da qualidade da água para consumo humano”.

Diferente do tratamento de águas residuárias no qual as tecnologias empregadas são basicamente biológicas, o tratamento de águas de abastecimento é em geral, uma combinação de processos e operações físico-químicos (LIBÂNIO, 2010). Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) as tecnologias de tratamento de água podem ser resumidas em dois grupos, sem coagulação química e com coagulação química. Na Figura 1 são apresentadas as principais tecnologias de tratamento de água.

Figura 1 - Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano



Fonte : Adaptado Di Bernardo e Dantas, 2005

A escolha da tecnologia e grau de tratamento a serem adotados está associada principalmente ao uso final da água e a qualidade da água do manancial adotado. Além disso, segundo Libânio (2010) devem ser considerados os custos de implantação, manutenção e operação, manuseio e confiabilidade dos equipamentos, flexibilidade operacional, localização geográfica e tratamento e disposição final dos resíduos gerados.

Atualmente, a estratégia adotada pelas ETAs considera que cada fase de tratamento possui uma meta específica de remoção relacionada a algum tipo de risco (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). No Brasil a maioria dos sistemas de abastecimento utiliza o sistema convencional também conhecido por ciclo completo.

### 3.1.1 Tratamento de água por ciclo completo

O tratamento por ciclo completo é definido pela seqüência dos processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção.

Segundo Fontana (2004) as estações de ciclo completo apresentam um bom grau de eficiência na remoção de cor, turbidez e possíveis contaminantes.

No tratamento por ciclo completo após a captação da água e chegada desta na ETA, ocorre a adição de produtos químicos com o objetivo de torná-la adequada ao consumo humano quanto aos aspectos sanitários, estéticos e econômicos (FONTANA, 2004).

A adição de produtos químicos dá início ao tratamento, com o processo de coagulação. A adição do coagulante ocorre na unidade de mistura rápida, a qual pode ser hidráulica ou mecanizada, e tem como objetivo alterar as propriedades do material em suspensão ou coloidal a fim de promover sua remoção. A água bruta geralmente é coagulada por sais de ferro e/ou alumínio no mecanismo de varredura. A coagulação por varredura resulta de dois fenômenos: o primeiro, essencialmente químico, que consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva que depende da concentração do metal e pH final da mistura; o segundo, fundamentalmente físico consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato entre as impurezas presentes na água (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Com a adição do coagulante e sob alto grau de agitação, as partículas coloidais e em suspensão que possuem carga negativa na sua superfície desestabilizam-se através da ação das espécies hidrolisadas do coagulante que possuem carga positiva, o que permite a aproximação e aglomeração das partículas e com isso, a formação dos flocos (REALI, 1999).

Em seguida, a água coagulada é submetida à floculação, que pode ser realizada em unidades mecanizadas ou hidráulicas. A floculação ocorre sob agitação lenta, promovendo a ocorrência de choques entre as partículas formadas anteriormente, de modo a produzir outras de tamanho, volume e densidade maiores, denominadas por flocos. Os flocos são separados do meio aquoso por meio de sedimentação, que consiste na ação da força gravitacional sobre essas partículas, as quais precipitam em uma unidade chamada decantador, propiciando a clarificação do meio (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

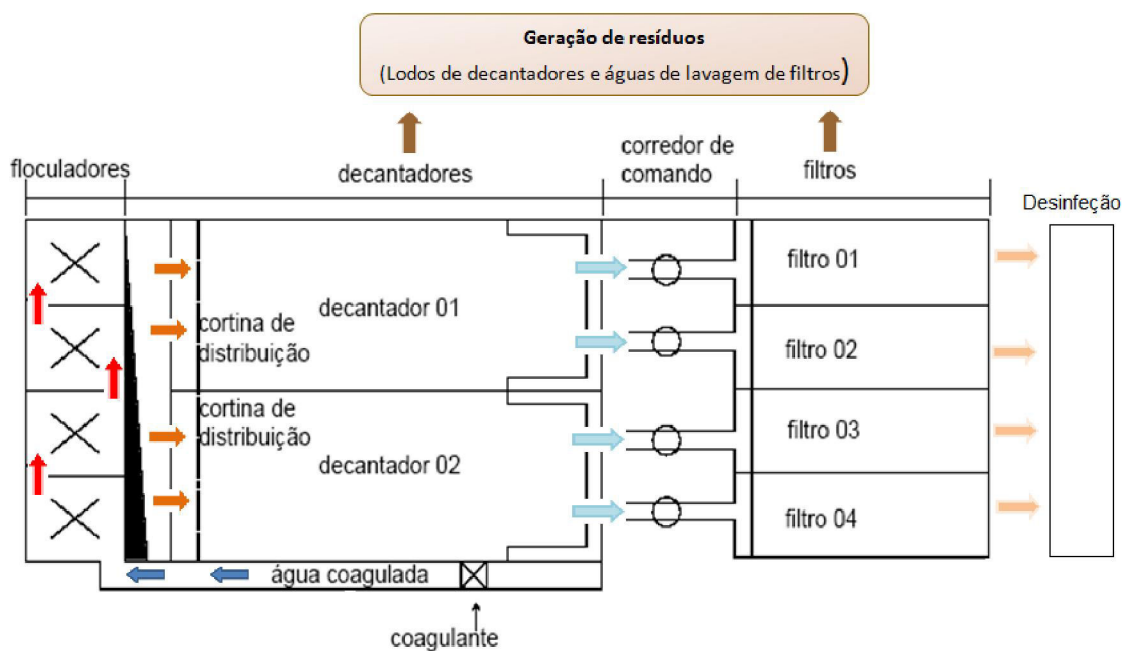
A água decantada com parte dos flocos que não sedimentaram é encaminhada aos filtros para clarificação final. A filtração é a principal responsável pela produção de água de acordo com o padrão de potabilidade. Consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais e de microorganismos por processos

físicos, químicos e biológicos, através do escoamento em meio poroso, de diferentes granulometrias (areia, antracito, seixo e outros). É o processo final de remoção de impurezas numa ETA (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; RICHTER e AZEVEDO, 2003).

A etapa final do tratamento por ciclo completo é a desinfecção, processo que usa um agente químico como por exemplo, o cloro, ou físico, como a radiação UV, a fim de inativar os microorganismos patogênicos presentes na água (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Para complementar o tratamento por ciclo completo, se necessário, são adicionados outros produtos químicos à água, como cal, para ajuste do pH final, e flúor.

A Figura 2 mostra o esquema em planta de um sistema de tratamento por ciclo completo de uma ETA, com setas indicando o percurso da água.

Figura 2– Esquema em planta de uma ETA de ciclo completo e pontos de geração de resíduos



Fonte: Adaptado Reali, 1999

## **3.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS NUMA ETA**

Assim como em qualquer indústria, numa ETA a matéria-prima, neste caso água bruta, é trabalhada por diversos processos e operações resultando em um produto final, a água potável, acompanhada da geração de resíduos.

Cordeiro (1993) relata que nos sistemas de tratamento de água do Brasil a preocupação sempre foi garantir a produção de água com qualidade necessária à atender aos padrões de potabilidade, não existindo muitos estudos sobre a geração de resíduos, características qualitativas e quantitativas desses, bem como aspectos relativos a prováveis impactos ambientais e métodos de tratamento e disposição final dos resíduos de ETAs. Infelizmente, mesmo com a Lei 9.605 / 98 – Crimes Ambientais, este panorama não apresentou a evolução esperada, uma vez que grande parte das ETAs no Brasil ainda descartam seus resíduos em corpos de água, especialmente as de pequeno porte.

Em uma ETA de ciclo completo, os resíduos gerados são basicamente provenientes das limpezas ou descargas de decantadores e da lavagem dos filtros, como ilustra a Figura 2. Além disso, segundo Grandin (1992) os floculadores e tanques de preparo de soluções e suspensão de produtos químicos também produzem lodo por ocasião de lavagens periódicas, mas em volumes não significativos.

Em termos volumétricos, a maior quantidade de lodo é proveniente da lavagem de filtros. No entanto, em termos mássicos, a maior quantidade produzida é gerada nos decantadores, por ser a sedimentação o primeiro processo físico de separação sólido-líquido (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

### **3.2.1 Características qualitativas e quantitativas dos resíduos de ETA**

Os lodos de ETAs são classificados pela NBR 10.004 / 04 como resíduos sólidos, porém segundo Achon, Megda e Soares (2005) apresentam teor de umidade maior que 95%.

Os lodos de ETAs apresentam-se no estado de gel quando em repouso, mas torna-se relativamente fluido quando agitado, o que o caracteriza como fluido não-newtoniano (YUZHU, 1996 *apud* SILVA JUNIOR, 2003).

Segundo Cordeiro (2002) a caracterização dos resíduos de ETA pode ser realizada de acordo com os aspectos ambientais associados à sua disposição, neste caso em função do pH, sólidos, metais, DQO, biodegradabilidade, toxicidade, entre outros; ou de acordo com os aspectos geotécnicos relacionados com à remoção de água e posterior utilização dos resíduos, em função do tamanho e distribuição das partículas, limite de plasticidade e liquidez, resistência e sedimentabilidade.

As características quali e quantitativas dos lodos de ETA podem variar conforme o gerenciamento do processo de tratamento e depende de vários fatores, tais como: i) qualidade da água bruta; ii) tecnologia de tratamento; iii) características da coagulação (tipo e dosagem de coagulante, alcalinizante ou acidificante); iv) características da floculação e filtração; v) uso, característica e dosagem de polieletrólito; vi) uso de oxidante; vii) uso de carvão ativado pulverizado; viii) método de limpeza dos decantadores e lavagem dos filtros, entre outros (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

Segundo Reali (1999), deve-se considerar que um manancial pode apresentar variações sazonais significativas na qualidade da água, como por exemplo, mudanças na turbidez, as quais influenciam significativamente na quantidade e qualidade do lodo gerado. A Tabela 1 mostra como a qualidade da água utilizada interfere na produção de lodo em uma ETA.

Tabela 1 – Produção de lodo em função da qualidade da água bruta

Fonte de captação	Faixa de produção de lodo (g de sólidos secos por m <sup>3</sup> de água tratada)
Água de reservatório com boa qualidade	12 - 18
Água de reservatório com média qualidade	18 - 30
Água de reservatório com qualidade ruim	30 - 42
Água de rio com qualidade média	24 - 36
Água de rio com qualidade ruim	42 - 54

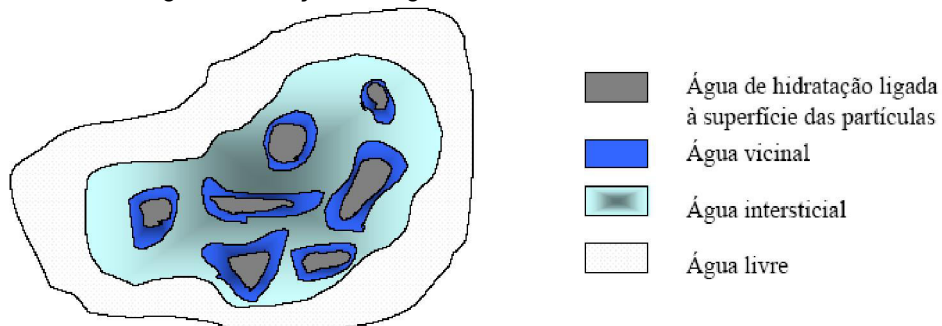
Fonte: Reali, 1999

Os resíduos das estações de tratamento de água são basicamente constituídos de água e sólidos suspensos originalmente presentes no manancial, comumente areia, silte, argila, metais, matéria orgânica (húmus) e bactérias, acrescidos de produtos resultantes dos coagulantes químicos aplicados na água no processo de tratamento, principalmente precipitados de sais de alumínio ou de ferro, (FONTANA, 2004; DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002).

O lodo é composto da combinação de uma fase líquida e uma sólida, sendo necessário o conhecimento de ambas as fases para disposição adequada. Há diversos modelos que procuram definir as frações de água presentes nos lodos. Barroso (2007) cita um modelo geral proposto por Vesilind e Hsu (1997) e Smollen e Kafaar (1994), que define os diferentes estados físicos da água, conforme pode ser observado na Figura 3:

- Água livre – água não associada aos sólidos e que pode ser facilmente separada por sedimentação gravitacional simples;
- Água intersticial ou capilar – água presente no interior ou intimamente ligada aos flocos. Esta água pode ser liberada quando ha quebra do floco, mediante aplicação de força mecânica, tais como centrifugas;
- Água vicinal – associada às partículas solidas por virtude da estrutura molecular da água, pontes de hidrogênio;
- Água de hidratação – água quimicamente ligada as partículas sólidas e pode ser liberada somente por destruição termoquímica das partículas.

Figura 3 – Frações de água constituintes dos lodos de ETAs



Fonte: Barroso, 2007

Segundo Reali (1999) as quantidades relativas de cada fração de água determinam as características de retenção de água dos resíduos, e o desempenho dos sistemas de remoção de água.

Para remoção de cada fração de água é necessário uso de uma determinada intensidade de energia. A energia necessária para remoção da água livre por exemplo, pode ser considerada decorrente da ação da gravidade. A energia requerida aumenta a cada fração de água, por exemplo, a energia requerida para remover água livre é menor que a energia necessária para remover a água intersticial e muitas vezes menor que a energia térmica necessária para remover a

água vicinal, bem como a energia raramente atingida e capaz de remover a água de hidratação (BARROSO, 2007).

A fração sólida dos resíduos gerados numa ETA é proveniente principalmente do material acumulado nos decantadores. Segundo Di Bernardo (1999), as águas de lavagem de filtros apresentam baixas quantidades de sólidos totais, geralmente entre 50 e 500 mg.L<sup>-1</sup>, enquanto nos lodos de decantadores Cordeiro (1993) relata que os valores de sólidos totais em alguns casos podem variar de 3.000 a 81.575 mg.L<sup>-1</sup>.

A concentração de sólidos no lodo é usualmente expresso em porcentagem (em massa) de sólidos seco presentes no lodo. Os valores de sólidos totais no lodo podem variar de 3.000 a 81.575 mg.L<sup>-1</sup>, porém na maioria das ETAs já estudadas os valores estão na faixa de 1.100 a 20.000 mg.L<sup>-1</sup>, sendo que na maioria dos casos de descargas completas de decantadores, esse teor se encontra abaixo de 1%. (FONTANA, 2004; REALI, 1999; CORDEIRO, 1993).

As variações dos valores de concentrações de sólidos nos lodos de ETAs ocorrem principalmente em função das características da água bruta, tecnologia de tratamento adotada e duração / intervalo de lavagem dos decantadores e filtros.

Na Tabela 2 são apresentados alguns valores de parâmetros que caracterizam os lodos de decantadores de três ETAs estudadas por Cordeiro (2001) evidenciando as variações das características físicas e químicas dos lodos, proporcionadas especialmente, pelas características das águas captadas em cada região, e pela operação de limpeza dos decantadores.

Tabela 2 – Características físicas e químicas para o lodo de três ETAs

Parâmetros	Características do lodo bruto		
	Araraquara	São Carlos	Rio Claro
Concentração de sólidos (%)	0,14	5,49	4,68
pH	8,93	7,35	7,2
Cor (uH)	10650	4300000	250000
Turbidez (uT)	924	800000	36000
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	140	5450	4800
Sólidos totais (mg.L <sup>-1</sup> )	1620	57400	58630
Sólidos suspensos (mg.L <sup>-1</sup> )	775	15330	26520
Sólidos dissolvidos (mg.L <sup>-1</sup> )	845	42070	32110
Alumínio (mg.L <sup>-1</sup> )	2,16	30	11100
Zinco (mg.L <sup>-1</sup> )	0,4	48,53	4,25
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	0	1,06	1,6
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	0	0,27	0,02
Níquel (mg.L <sup>-1</sup> )	0	1,16	1,8
Ferro (mg.L <sup>-1</sup> )	214	4200	5000
Manganês (mg.L <sup>-1</sup> )	3,33	30	60
Cobre (mg.L <sup>-1</sup> )	1,7	0,91	2,06
Cromo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,19	0,86	1,58

Fonte: Cordeiro, 2001

Na ETA de Araraquara o lodo é removido até três vezes ao dia, não sofrendo acúmulo nos tanques, justificando os menores valores nos parâmetros analisados. Já as ETAs de São Carlos e de Rio Claro realizam a limpeza dos decantadores manualmente, acarretando o aumento nas concentrações de sólidos e metais no lodo.

Segundo Cordeiro (1993), independente da água bruta, é comum encontrar valores de DQO dos lodos de decantadores bem superiores aos de DBO. Os valores de DQO encontrados no levantamento bibliográfico realizado pelo autor variaram de 340 a 15.000 mg.L<sup>-1</sup> enquanto a DBO apresentou-se da ordem de 30 a 450 mg.L<sup>-1</sup>. Albrecht (1972) *apud* Silva Junior (2003) cita que lodo de ETA normalmente apresentam valores de DBO entre 30 e 100 mg.L<sup>-1</sup> e DQO entre 500 e 10.000 mg.L<sup>-1</sup>.

Dentre os parâmetros considerados na caracterização de lodos, estão os metais, e como mostrado na Tabela 2 apresentam-se em altas concentrações. Segundo Barroso (2002) e Silva Junior (2003) os teores de metais estão relacionados geralmente, à aplicação de produtos químicos na ETA.

A concentração de metais predomina de forma sensível na fase sólida do lodo (FERRANTI, 2006), e segundo Cordeiro (2001) as concentrações de metais são mais elevadas nos sistemas que efetuam a limpeza dos decantadores em grandes intervalos de tempo.

Segundo Barroso (2007), além das características tidas como tradicionais na área de saneamento devem ser conhecidas as variáveis não tradicionais, como distribuição, estrutura e tamanho dos flocos, velocidade de sedimentação, tempo de filtração, resistência específica, lixiviação, entre outras, que permitem uma visão mais abrangente das características dos lodos de ETA.

Segundo Santos *et al.* (2004) as partículas em suspensão presentes nos lodos de ETAs são estruturas tridimensionais, irregulares, polidispersas (de vários tamanhos) e com diferentes propriedades físicas e químicas. Cordeiro (2001) apresentou a distribuição de tamanho de partículas de resíduos de ETAs de três cidades e observou que entre 45% e 70% das partículas são menores que 10  $\mu\text{m}$ .

Segundo Reali (1999) normalmente lodos de decantadores apresentam resistência específica entre  $5 \times 10^{12}$  e  $70 \times 10^{12}$   $\text{m.Kg}^{-1}$ , enquanto lodos gerados na lavagem de filtros apresentam valores na faixa de 0,1 a  $15 \times 10^{12}$   $\text{m.Kg}^{-1}$ . A resistência específica segundo Richter (2001) é uma medida que influencia na maior ou menor facilidade de filtração do lodo, sendo que quanto maior a resistência específica, menor a capacidade de filtração. De um modo geral os lodos com resistência específica menor que  $1 \times 10^{12}$   $\text{m.Kg}^{-1}$  filtram com maior facilidade, a partir desse valor a filtração é dificultada, e aqueles com resistência específica maior que  $10 \times 10^{12}$   $\text{m.Kg}^{-1}$  são de difícil filtrabilidade.

A taxa de filtração do lodo representa a sua capacidade em permitir a passagem da água através de sua massa, sendo inversamente proporcional à sua resistência específica (CORDEIRO, 1993).

Segundo Barroso (2007) outra característica que pode auxiliar na compreensão da sedimentação no processo de desaguamento natural de lodos de ETAs, é a velocidade de sedimentação ou sedimentabilidade. Geralmente em lodos de ETAs ocorre a sedimentação floculenta e / ou sazonal, porque as partículas sólidas em suspensão possuem concentrações muito elevadas e propriedades físicas e químicas semelhantes.

### **3.2.2 Influência da operação dos decantadores e filtros nas características dos resíduos de ETA**

A operação dos sistemas e processos de uma ETA influencia diretamente as características dos resíduos gerados, tanto no que se refere às

quantidades quanto à qualidade (FONTANA, 2004; DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

A quantidade de lodo armazenada no fundo dos decantadores é função da vazão afluente, da taxa de escoamento superficial, da qualidade da água bruta, dosagem e tipo de produtos químicos utilizados na coagulação (FONTANA, 2004).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005) e Ferranti (2006) o tempo de permanência do lodo no decantador é o principal fator que influencia nas suas características. Quando se tem uma limpeza periódica manual dos decantadores, realizada geralmente 3 a 12 vezes por ano, por exemplo, os sólidos tendem a compactar e adensar na base das unidades entre limpezas sucessivas, resultando na estratificação dos mesmos.

Os decantadores convencionais sem equipamento de extração de lodo, geralmente são limpos em intervalos de 1 a 4 meses, logo, os resíduos são bem mais concentrados, apresentando teor de sólidos geralmente na faixa de 4 a 13%. Nos lodos acumulados em decantadores de alta taxa ou convencionais com equipamento de extração de lodo que realizam descargas diárias, o lodo apresenta teor de sólidos entre 0,1 e 1% (DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002; GRANDIN, 1992).

Na maioria das ETAs a lavagem dos filtros é realizada em intervalos de 12 a 48 h, com duração de 4 a 15 min. A limpeza consiste na aplicação de água no sentido ascensional, causando expansão do meio granular e liberação do material sólido retido na camada filtrante. A concentração de sólidos suspensos na água de lavagem dos filtros varia durante a limpeza, sendo relativamente baixa no início, e aumentando após 1 a 3 minutos (DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO 2002).

Na água de lavagem de filtros a concentração de SST varia entre 100 a 500 mg.L<sup>-1</sup> (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011), com valores de turbidez segundo Silva Junior (2003) da ordem de 200 uT.

### **3.2.3 Métodos de quantificação da produção global de lodo em ETA**

Para estimar a quantidade de resíduos gerados em ETAs em funcionamento é necessário efetuar um estudo detalhado da qualidade da água bruta, das dosagens de produtos químicos, da qualidade da água decantada e filtrada, além de levantar as condições operacionais das unidades de clarificação e

filtração, e realizar ensaios em laboratório (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

Em ETAs novas é possível estimar a quantidade de resíduo seco gerado com o uso de equações empíricas por ocasião da elaboração do projeto de instalação. Podem ser feitos ensaios de laboratório com uso de equipamento de jarreste, medindo-se a concentração de sólidos totais da água coagulada, decantada e filtrada para diferentes amostras de água bruta e com essas características e com a vazão afluente de cada decantador da ETA em projeto, determina-se a massa seca de sólidos que será diariamente retida na unidade de decantação (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

Segundo Cornwell (1987) a quantificação da produção de resíduos sólidos global em ETAs pode ser realizada utilizando três métodos: método de cálculo, método de análise de balanço de massa e determinação em campo.

- Métodos de cálculos – Equações Empíricas: a quantidade de lodo gerada pode ser calculada através de equações empíricas que considerem, por exemplo, tipo e dosagem de coagulante, características da água, vazão de entrada de água. As equações mais difundidas são as modeladas por Cornwell (1987). Tais equações foram adaptadas por Ferreira Filho e Alem Sobrinho (1998), assumindo que os residuais de alumínio de ferro sejam desprezíveis na água tratada (Equação 1 e Equação 2).

$$PL = k1.q.(4,89.DAI + SS + CAP + OA).10^{-3} \quad \text{Equação 1}$$

$$PL = k1.q.(2,88.DFe + SS + CAP + OA).10^{-3} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

PL = produção de lodo seco (g.hab.d<sup>-1</sup>)

q = coeficiente de consumo per capita (L. hab.d<sup>-1</sup>)

k1 = coeficiente do dia de maior consumo

DAI = dosagem de alumínio, expresso como Al (mg.L<sup>-1</sup>)

DFe = dosagem de ferro, expresso como Fe (mg.L<sup>-1</sup>)

SS = concentração de sólidos suspensos totais na água bruta (mg.L<sup>-1</sup>)

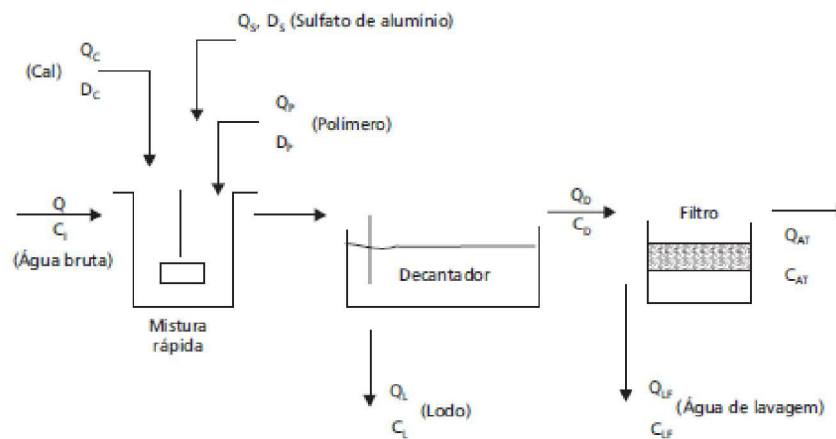
CAP = concentração de carvão ativado em pó ( $\text{mg.L}^{-1}$ )

OA = outros aditivos (sílica ativada, polímeros, entre outros) ( $\text{mg.L}^{-1}$ )

Nas Equações 1 e 2, os coeficientes 4,89 e 2,88 foram obtidos partindo-se do pressuposto de que todo o alumínio ou ferro adicionado na água bruta precipita-se como hidróxido metálico e que cada molécula de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ou  $\text{Al}(\text{OH})_3$  é incorporada cerca de três a quatro moléculas de água.

- Método de balanço de massa: segundo Fontana (2004) e Cordeiro (2001) o balanço de massa de sólidos gerados em ETAs convencionais, pode ser feito considerando a vazão de entrada da água bruta, a concentração de sólidos presentes na água bruta e dosagem dos produtos químicos adicionados ao processo, como mostra a Figura 4.

Figura 4– Fluxograma do balanço de massa de uma ETA convencional



Fonte: Cordeiro (2001)

Cornwell (1987) apresentou a equação que melhor representa o balanço de massa de produção de sólidos em decantadores de ETA, dada por:

$$W = 0,0864 \cdot Q \cdot (0,44 \cdot D + 1,5 \cdot T + A)$$

Equação 3

Em que:

W = quantidade de lodo ( $\text{kg.d}^{-1}$ );

Q = vazão de adução da água ( $\text{L.s}^{-1}$ );

D = dosagem de sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$ ) ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

T = turbidez da água bruta (uT);

A = dosagem de auxiliares ou outros produtos adicionados ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

- Medição física do volume de lodo do decantador em ETA: segundo Fontana (2004) a quantidade de lodo pode ser avaliada mediante determinação da topografia da camada existente ao longo do decantador por meio de equipamento específico. A quantidade de lodo é medida pela altura da camada de lodo no fundo do decantador, e esta relacionada com o nível de água na superfície do decantador. São retiradas do fundo do decantador amostras de lodo a fim de determinar a porcentagem de sólidos secos em cada seção longitudinal do decantador previamente estabelecidas.

Nos filtros é possível estimar a massa seca retida por carreira de filtração e o volume de água gerado em cada lavagem assumindo-se a condição crítica em que a duração da carreira de filtração seja no mínimo de 24 h e tendo-se a vazão por filtro (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

### **3.3 IMPACTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS AO DESCARTE DE LODOS DE DECANTADORES DE ETAs EM CORPOS DE ÁGUA**

Historicamente os resíduos gerados em ETAs têm sido lançados diretamente nos corpos de água, geralmente no mesmo manancial que a ETA processa água. Porém sabe-se que o lançamento de qualquer resíduo líquido ou sólido, altera significativamente a qualidade do corpo receptor.

Segundo Achon, Megda e Soares (2005) dentre os impactos mais relevantes que o descarte de lodo de ETA pode causar num corpo de água, pode-se citar a depleção na concentração de oxigênio dissolvido, alteração da biota aquática, mortalidade da comunidade bentônica de invertebrados, mortalidade de peixes, redução do volume útil do rio, deficiências renais no ser humano, doenças cardiovasculares. Além disso, há aumento na turbidez, concentração de sólidos, cor aparente, alteração de pH, etc.

A Figura 5 e Figura 6 mostram a foto de um manancial com suas características naturais e após receber os resíduos de ETA. Nota-se mudanças significativas nas características estéticas do manancial receptor.

Figura 5 – Corpo de água natural em condições naturais – antes de receber os lodos de ETA



Fonte: Ribeiro, 2007

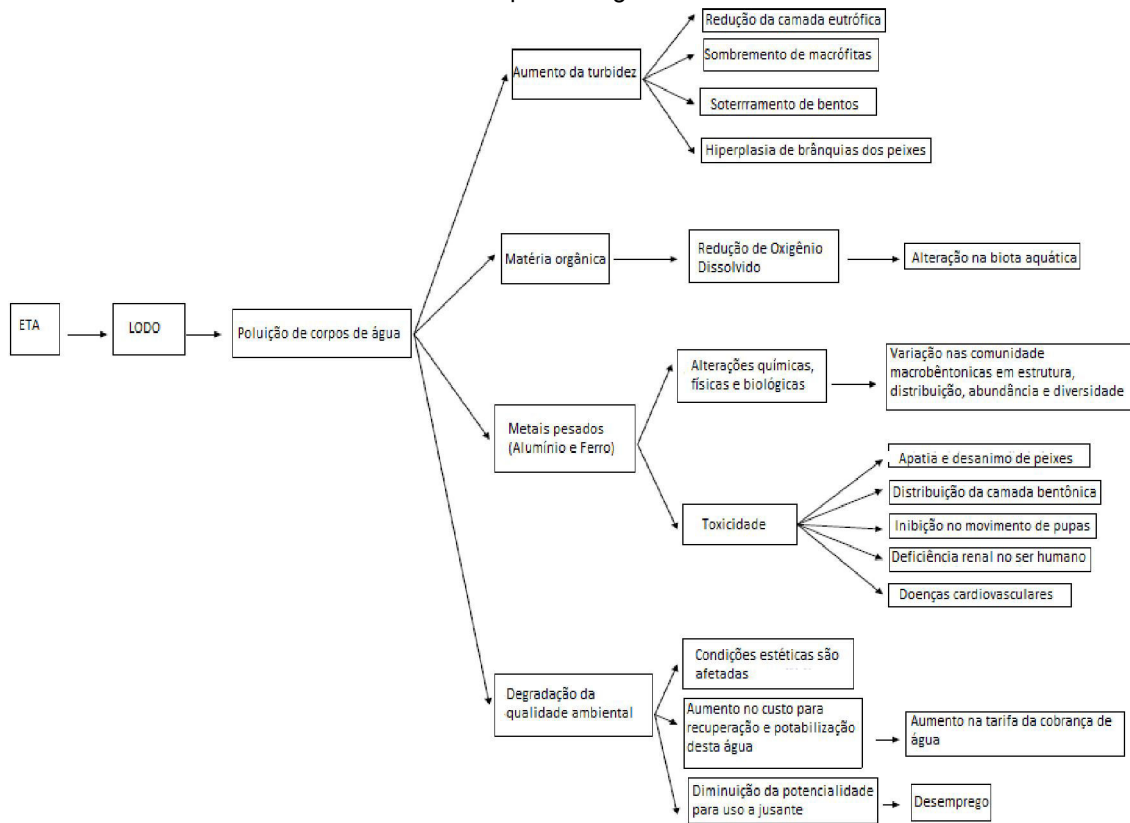
Figura 6 – Corpo de água após receber os lodos de ETA



Fonte: Ribeiro, 2007

Na Figura 7 é apresentada a rede de interação elaborada por Achon, Megda e Soares (2005) a partir do levantamento dos impactos oriundos do lançamento *in natura* do lodo de ETA em corpos de água.

Figura 7 – Rede de interação dos impactos oriundos do lançamento in natura do lodo de ETA em corpos de água



Fonte: Adaptado Achon, Megda e Soares (2005)

Cordeiro (1999) estudou as condições de sólidos sedimentáveis, DQO, sólidos totais e metais ao longo de 1.000 metros do corpo receptor de lodo de ETA. Os resultados revelaram que as características do córrego sofreram mudanças bruscas, com parâmetros que aumentaram cerca de 100 vezes da condição natural.

Segundo Achon, Megda e Soares (2005) e Barbosa (2000) os impactos provocados pelo lançamento *in natura* de lodos de ETAs estão associados principalmente à grande concentração de metais, especialmente Alumínio e Ferro, que quando dispostos em rios com baixa velocidade podem afetar a camada bentônica dos rios, pela formação de bancos de lodo, assoreamento do curso de água, alterações na cor, na composição química e biológicas dos biota aquática.

Barbosa *et al.* (2000) consideram que existem poucos trabalhos que abordem a toxicidade dos lodos de estações de tratamento de água, embora existam resultados que apontam para efeitos deletérios, diretos ou indiretos do alumínio à vida aquática.

Barbosa *et. al.*, (2000) avaliaram a toxicidade aguda e crônica de lodo de duas ETAs frente à *Daphnia similis* (cladocera, crustacea). Os autores concluíram que os lodos das duas ETAs não causaram toxicidade aguda aos organismos-teste. O lodo da ETA que utilizava cloreto férrico causou toxicidade crônica, evidenciada pela baixa produção de neonatas e alta taxa de mortalidade, enquanto o lodo da ETA que utilizava sulfato de alumínio causou toxicidade crônica evidenciada apenas em relação à produção de neonatas.

A toxicidade dos lodos gerados em ETAs, para plantas, seres humanos e organismos aquáticos, depende de fatores tais como: características da água bruta; produtos químicos utilizados no tratamento e possíveis contaminantes contidos nesses produtos; reações químicas ocorridas durante o processo; e forma de remoção e tempo de retenção do lodo nos decantadores (CORDEIRO, 1999).

#### **3.4 ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS A LODOS DE DECANTADORES DE ETAs**

Segundo a Lei nº 12.305 / 2010 – Política Nacional dos Resíduos Sólidos, resíduos sólidos é: *“todo 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.”*

A NBR 10.004/04 na definição de resíduos sólidos dispõe: *“... ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”*

Guerra (2005) e Ribeiro (2007) estudaram a caracterização de lodos de de ETAs através de ensaios de Lixiviação e Solubilização, concluindo que os lodos

de ETA caracterizam-se como resíduos Classe II A – não inerte, segundo as normas da ABNT.

No Brasil, o lançamento de resíduos sólidos nos corpos de água é regulamentado pela Resolução 357/05 do Conama, a qual determina que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água desde que obedeçam as condições e padrões de qualidade de água estabelecidos no Capítulo III.

É importante destacar que não existe legislação específica para os resíduos de ETA e tão pouco este resíduo é citado nas legislações, porém levando em consideração a legislação vigente e conhecendo as características dos lodos de ETAs e os impactos que estes podem causar no corpo de água, o lançamento de resíduos de ETAs direta ou indiretamente nos corpos de água é uma prática ilegal.

A Lei 9.433/97 – Política Nacional dos Recursos Hídrico estabelece que o lançamento de resíduos sólidos, tratados ou não, com fim de sua diluição, transporte ou disposição final em corpos de água, além de outros usos que alterem prejudicialmente a qualidade da água está sujeita a outorga do Poder Público.

O lançamento de lodos de ETA em corpos de água pode ser considerado crime ambiental, de acordo com a Lei 9.605/98 – Crimes Ambientais, devido aos efeitos diretos causados ao ambiente aquático. Uma vez que no capítulo V, Seção III, artigo 54 relata que trata-se de crime ambiental: *“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”*. Além disso, no parágrafo 2º, inciso V, diz que se o crime: *ocorrer por lançamento direto 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.*

No estado do Paraná a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA por meio da Resolução 001 de 2007 dispõe sobre o licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providencias para empreendimentos de saneamento. No artigo 7º descreve que: *os resíduos gerados nas ETEs e nas ETAs poderão ser destinados a aterros localizados nas áreas das estações e gerenciados pelas operadoras de saneamento, obedecendo critérios e requisitos estabelecidos pelo Instituto Ambiental do Paraná – IAP.*

Essas leis, juntamente com a Política Nacional do Meio Ambiente - Lei 6.938/81, trazem em seus conteúdos condições que exigem nova postura dos gerentes dos sistemas de tratamento de água diante dos resíduos gerados e sua disposição no meio ambiente, em função dos impactos que estes podem causar.

### **3.5 EVOLUÇÃO DAS PESQUISAS RELACIONADAS A RESÍDUOS DE ETAs NO BRASIL**

No Brasil as primeiras pesquisas desenvolvidas sobre o problemas dos resíduos de ETAs foram realizadas na década de 70 por Almeida e Cordeiro, as quais apresentavam um levantamento inicial mostrando uma compilação sobre o tema em nível mundial (BARROSO, 2007).

Em 1981, Cordeiro apresentou na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, sua dissertação sobre caracterização, remoção de água e possíveis utilizações do lodo.

Segundo Barroso (2007) após esses trabalhos, em 1987 a SABESP realizou um estudo para solucionar o problema de lodos das ETAs da Região Metropolitana de São Paulo. As soluções propostas foram adoção de centrífugas, filtro-prensa, filtros de areia e lagoas de lodo; porém esses sistemas não foram implantados completamente.

Em seguida Grandin (1992) apresentou na Escola Politécnica da USP sua dissertação sobre remoção de água de lodos de ETAs convencionais de ciclo completo por filtro-prensas.

Em 1993, Cordeiro apresentou na Escola de Engenharia de São Carlos – USP sua tese de doutorado, cujo trabalho envolveu um estudo detalhado sobre a identificação dos problemas dos lodos gerados em decantadores de ETAs, tais como quantificação, caracterização, remoção de água e impactos ambientais provocados em cursos de água. Além disso, foram definidos ensaios de laboratório com filtros-prensa, filtros a vácuo e leitos de secagem.

Nessa mesma época houve mudanças no campo normativo e legislativo relacionados principalmente à proteção ambiental, o que influenciou e acentuou a preocupação com o tema, aumentando as pesquisas sobre o assunto

assim como o número de ETAs que passaram a adotar um sistema de tratamento de resíduos.

Dentre os estudos realizados e relacionados às formas de clarificação de lodos, redução de volume, quantificação e caracterização desses resíduos pode-se citar Scalize e Di Bernardo (2000), Ferranti (2006), Silva Junior (2003), Barroso (2002), Souza (2004).

Em 2000, Barbosa realizou um estudo inovador, no qual avaliou o impacto que os resíduos de ETA podem causar à biota aquática através de testes de toxicidade.

Tiveram início os estudos sobre outras formas de disposição de lodo. Tartari (2008) e Morita *et. al.*, (2002) estudaram a viabilidade da incorporação de lodo de ETAs em indústrias cerâmicas, e Andrade (2005) estudou a avaliação de impacto ambiental decorrente do uso de lodo nessas indústrias. Enquanto Carvalho (2000), Scalize (2003) e Chao (2006) avaliaram a possibilidade de disposição dos lodos de ETAs junto ao sistema de tratamento de esgotos.

Dentre as técnicas de remoção de água deu-se maior destaque às pesquisas envolvendo sistemas mecânicos em detrimento aos sistemas naturais. Visto que no Brasil existem condições favoráveis ao desaguamento natural, Cordeiro (1993) e (2001) iniciou um estudo sobre a modificação dos leitos de secagem tradicionais, que passou a ser chamado Leito de Drenagem. Os resultados dos estudos com os Leitos de Drenagem mostraram uma redução no tempo de remoção da água livre e boa qualidade do drenado produzido permitindo sua reutilização. Em 2004, Fontana aplicou este modelo de leito de secagem em escala real na ETA do município de Cardoso – SP e conseguiu reproduzir os resultados encontrados em escala de laboratório obtidos anteriormente.

Os resultados promissores encontrados nestas pesquisas combinado com as mudanças nas normas ambientais, e preocupações com a proteção ambiental conduziram a um aumento no número de ETAs que adotam sistemas de tratamento de resíduos no Brasil. Porém, segundo Barroso (2007), os sistemas de desaguamento atualmente existentes no Brasil ainda possuem problemas a serem solucionados, tanto na questão operacional quanto na disposição da torta de lodo final.

### **3.6 ALTERNATIVAS PARA TRATAMENTO, DISPOSIÇÃO E REUSO DOS RESÍDUOS DE ETAs**

Segundo Ferranti (2006), é economicamente inviável destinar o lodo para alguma empresa que o aceite como matéria-prima, pois o transporte torna-se caro devido à grande quantidade de água agregada, sendo necessário realizar o desaguamento e desidratação a fim de reduzir seu volume.

Em ETAs de ciclo completo uma alternativa de dispor adequadamente os resíduos é coletar, homogeneizar e recircular de forma regularizada a água de lavagem dos filtros para o início do tratamento de água, gerenciando adequadamente a qualidade microbiológica, de forma que sejam tratados somente os resíduos acumulados nos decantadores (DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002).

Quando se adota a recuperação da água de lavagem, esta é encaminhada ao um tanque ou reservatório de regularização durante as operações de lavagem dos filtros e bombeada para o início do processo de tratamento, sendo recomendado que a vazão de recirculação não exceda 10% da vazão da estação, para não causar grandes alterações nas dosagens de produtos químicos (MENDES, 2001).

Ao adotar um sistema de tratamento e disposição dos resíduos devem-se considerar algumas condições, ressaltando-se a condição financeira, a localização, disponibilidade de área, existência de mão-de-obra qualificada para manutenção e operação, a quantidade de lodo produzida e qualidade da água bruta (DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002).

Segundo Barroso (2007) as micropropriedades e macropropriedades devem ser determinadas e avaliadas para permitir a tomada de decisões quanto ao processo de remoção de água e aproveitamento dos resíduos de ETAs. Propriedades como teor de sólidos, resistência específica, compressibilidade, tensão de cisalhamento, densidade e tamanho das partículas são características físicas que podem afetar significativamente os processos de tratabilidade, adensamento e desaguamento do lodo, podendo aumentar os gastos envolvidos, pois influenciam na filtrabilidade e sedimentabilidade.

As tecnologias utilizadas para tratamento de resíduos de ETAs consistem basicamente na separação sólido-líquido, aumentando a concentração de sólidos no material sedimentado por clarificação, adensamento e desidratação, de maneira que seja possível reutilizar o sobrenadante e dispor adequadamente o material sólido sedimentado (DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002;; RICHTER, 2001).

Os lodos gerados nas ETAs apresentam, em geral, baixo teor de matéria orgânica não necessitando estabilização biológica antes de seu desaguamento, como é o caso dos lodos do tratamento de esgotos (SILVA JUNIOR, 2003).

### **3.6.1 Desaguamento de Resíduos de ETAs**

O desaguamento de lodo objetiva aumentar o teor de sólidos totais com conseqüente redução do volume de lodo. Esse processo pode ser realizado a partir do uso sistemas naturais e/ou sistemas mecânicos de remoção de água.

Dentre os sistemas naturais podem-se citar as lagoas de lodo, leitos de secagem, leitos de drenagem e *bag* de geotêxtil. Os sistemas mecânicos comumente utilizados são as centrífugas, filtros prensa de esteira e filtro prensa de placas.

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), cada técnica de desaguamento possui suas peculiaridades, vantagens e desvantagens, sendo necessária para escolha da técnica a ser utilizada a realização de ensaios preliminares. Os sistemas mecânicos envolvem altos custos de aquisição, manutenção, além de consumir energia e produtos químicos, já os sistemas naturais apresentam como restrições a necessidade de grandes áreas e depende das condições climáticas.

Uma comparação entre os desempenhos das operações de desaguamento dos lodos em termos do teor de sólidos totais - ST obtido é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre as operações de desaguamento de lodos de ETA

Técnica de desaguamento	Teor de ST (%)
Centrífuga	20 -30
Filtro prensa de esterias	20 -25
Filtro prensa de placas	35 -45
Leitos de secagem	20 -25
Lagoas de lodo	7 - 15

Fonte : Cornwell (1987) apud Ribeiro (2007)

Entre os diversos equipamentos de desaguamento mecânico disponíveis atualmente no mercado, podem ser citados, em ordem crescente de custo, segundo Richter (2001), prensa desaguadora, centrífuga, filtro prensa e filtro rotativo a vácuo.

Diferente dos métodos naturais, a eficiência do desaguamento em equipamentos mecânicos depende de um condicionamento prévio ao desaguamento (NIELSEN *et al*, 1973 apud SILVA JUNIOR, 2003). Segundo Libânio (2005) as tecnologias mecanizadas utilizam para o desaguamento uma combinação da sedimentação gravitacional e filtração.

Os sistemas de desaguamento mecânico geralmente são indicados para estações com menor disponibilidade de área e que tem como objetivo atingir uma maior concentração de sólidos (LIBÂNIO, 2005).

O desaguamento natural utiliza apenas agentes naturais, como a gravidade e a evaporação. Esses métodos apresentam como desvantagem a necessidade de grandes áreas para instalação e dependem diretamente das condições climáticas. Por necessitar de grandes áreas para instalação são mais indicados para ETAs de pequeno porte, onde a geração de resíduos é menor.

Estudos mostraram que o Brasil reúne condições favoráveis de espaço e recursos naturais que quando aliadas ao baixo custo de instalação e operação, indicam potencial vantagem na adoção de sistemas naturais para o tratamento de resíduos de ETAs (ACHON, BARROSO e CORDEIRO, 2008; DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

As operações utilizadas para o desaguamento natural dos lodos de decantadores de ETA, são as lagoas de lodo, os *bags* de geotecido e os leitos de drenagem / secagem.

O tratamento em *bags* de geotecido consiste do acondicionamento do lodo em containers ou bolsas fabricadas de material geotêxtil. O tecido apresenta pequenos poros que permitem a passagem da água e a retenção dos sólidos

(LIBÂNIO, 2005). Existem *bags* horizontais e verticais (Figura 8 e Figura 9) os horizontais normalmente são utilizados em instalações maiores, enquanto os *bags* verticais em menores. Eles podem ser lavados e reutilizados 20 a 30 vezes. Apesar de ser uma forma de desaguamento natural, nos *bags* de geotecido é necessária a aplicação de polímeros (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

Figura 8 – Bag vertical



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 9 – Bag horizontal



Fonte: Do Autor (2012)

Segundo Barroso (2007) o lodo disposto nas lagoas de lodo é deixado em repouso, proporcionando a sedimentação das partículas e o sobrenadante é removido através de tubulações que funcionam como vertedores. Os principais problemas desse sistema estão relacionados às variações climáticas, que é um fator primordial no tempo de secagem do lodo, e também estão relacionados ao projeto e à operação, principalmente relativo à remoção do sobrenadante e formação de uma camada de água intermediária entre o fundo impermeável e camada de lodo seco, quando da infiltração de água pluvial, conforme se observa na Figura 10 (BARROSO, 2007; CORDEIRO e ACHON, 2003)

Figura 10 – Secagem de lodo numa lagoa de lodo



Fonte: Achon e Cordeiro, 2003

### 3.6.1.1 Leitos de drenagem / secagem

Os leitos de drenagem / secagem é um dos métodos de desaguamento mais antigos. Essa tecnologia tem sido utilizada para remoção de água de rejeitos de diversos tipos de tratamento de águas residuárias e de abastecimento desde o início do século XX, e a partir de então, vem sendo aplicada praticamente sem mudança considerável em sua estrutura física.

Segundo Cordeiro (2001) em locais onde há a disponibilidade de grandes áreas próximas às ETAs, a adoção dos leitos de drenagem / secagem é a solução mais fácil, uma vez que não serão elevados os custos relacionados ao transporte do lodo e de retorno da água drenada. Para instalação de um leito de drenagem / secagem seria interessante que a área esteja situada em cotas mais baixas que os decantadores, evitando o bombeamento do lodo bruto.

A técnica dos leitos de drenagem / secagem assemelha-se à filtração, aonde as partículas formam uma torta na superfície do meio filtrante e a massa de sólidos retida atua por si própria, como filtro (RICHTER, 2001).

Nos leitos de drenagem / secagem os mecanismos de desaguamento consistem essencialmente em decantação, percolação (drenagem) e evaporação, sendo influenciadas principalmente pela temperatura e umidade do ar, viscosidade do lodo adensado e ação dos ventos (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011;; RICHTER, 2001).

Geralmente para lodos *in natura* com teor de sólidos totais entre 1,5 e 3% obtém-se lodo desaguado com teor de SST de 10 a 20% (DI BERNARDO,

DANTAS e VOLTAN, 2011). Reali (1999) relata que o lodo desidratado apresenta umidade entre 30 a 40%, com início de rachaduras e destacamento da superfície.

Segundo Reali (1999) as características físico-químicas do material a ser desidratado, a espessura da camada aplicada, o teor de sólidos, o tipo de lodo a ser desidratado, condicionamento do lodo, as condições climáticas do meio, bem como as características e condições do meio de drenagem são fatores que podem afetar o desempenho de um leito de secagem.

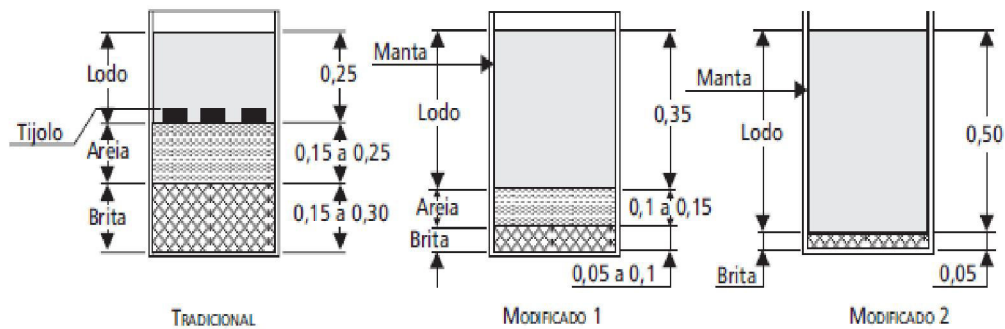
A Figura 11 mostra o esquema de um leito de secagem tradicional, onde a camada de suporte constituída por pedregulho ou pedra britada, tem como finalidade suportar a camada de areia grossa, manter a espessura uniforme do lodo, favorecer a percolação do filtrado em toda área e direcionar o líquido drenado para a tubulação perfurada. O pedregulho ou pedra britada tem tamanho entre 3,2 a 25,4 mm, e é colocado em subcamadas de modo a favorecer o suporte. A areia utilizada apresenta grãos de 0,42 a 2,4 mm e tamanho efetivo de 0,5 a 0,6 mm, sendo a camada de areia formada com espessura de 0,15 a 0,30 m. Nesse sistema a profundidade total raramente excede 1,5 m (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

Lopes *et al.* (2005) avaliaram o desaguamento de lodo de ETA em leitos de secagem em dois leitos convencionais de 1 m<sup>2</sup>, um coberto e um descoberto. A pesquisa foi realizada em duas etapas com duração de 21 dias, as alturas de lodo na 1<sup>o</sup> e 2<sup>o</sup> etapa foram 30 e 60 cm, respectivamente. Os resultados obtidos nas duas etapas mostraram que o teor de sólidos totais no lodo variou de 17 a 19% nos leitos cobertos e de 22 a 28% nos leitos descobertos.

Cordeiro (1993, 2000) estudou a possibilidade de modificação da estrutura do leito de secagem convencional (pedregulho e areia) e observou que a colocação de manta de geotêxtil sobre a camada filtrante do leito possibilitava a remoção mais efetiva da água livre dos lodos, mesmo utilizando areias de construção (grossa e fina), como meio filtrante, definido como Leito Modificado 1. Os resultados obtidos evidenciaram que a areia e a espessura da camada filtrante não eram decisivos na remoção de água livre. Os estudos evoluíram e no Programa de Pesquisa em Saneamento Básico - PROSAB 2 – Tema 4, Cordeiro (2001) desenvolveu a proposta de um Leito Modificado 2, onde a areia foi removida e o leito constituído de uma camada de brita 01 com 5 cm, sobreposto da manta geotêxtil, com a camada de lodo atingindo até 50 cm. A Figura 11 ilustra a evolução dos

sistemas de leitos de secagem, estudada por Cordeiro (1993, 2000 e 2001) desde o modelo tradicional até o desenvolvido no PROSAB.

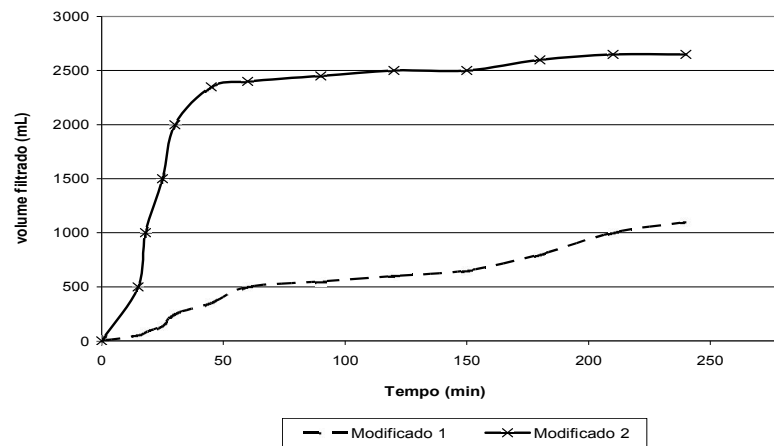
Figura 11 – Etapas de desenvolvimento dos sistemas de leitos de secagem



Fonte: Cordeiro (2001)

Cordeiro (2001) observou que o tempo de drenagem da água livre diminuiu bruscamente com o novo arranjo (Modificado 2), o qual passou a ser chamado Leito de Drenagem. O Gráfico 1 mostra os tempos de drenagem dos modelos Modificado 1 e Modificado 2. É possível visualizar que o leito Modificado 2, tem uma eficiência superior no que diz respeito ao volume filtrado para um determinado tempo de drenagem.

Gráfico 1 - Curvas de remoção de água filtrada de sistemas, modificado por Cordeiro 1993 e remodelado em 2001.



Fonte: Cordeiro (2001)

As mantas geotêxteis são permeáveis e flexíveis, produzidas a partir de fibras sintéticas e polímeros, polietileno, poliamida, poliéster e polipropileno. Suas propriedades dependem das propriedades gerais dos polímeros usados e do método de fabricação (estrutura do geotêxtil) (BARROSO, 2007).

Nas construções, em geral, as mantas geotêxteis são utilizadas em sistemas de drenagem e filtração, aterros, taludes, recapeamento asfáltico e outras aplicações, atuando como elemento com excelentes características mecânicas e hidráulicas.

Empregada como elemento de filtração as mantas geotêxteis não se diferenciam dos materiais granulares convencionais. Qualquer material filtrante deve atender a dois requisitos básicos: manter a capacidade drenante eficiente e proporcionar a retenção das partículas. No caso do uso de mantas geotêxteis, é necessário que estas apresentem um coeficiente de permeabilidade elevado e uma distribuição de tamanho de poros, que sejam capazes de promover a capacidade drenante da água, e proporcionar a retenção das partículas sólidas (FREITAS, 2003; BARROSO, 2007).

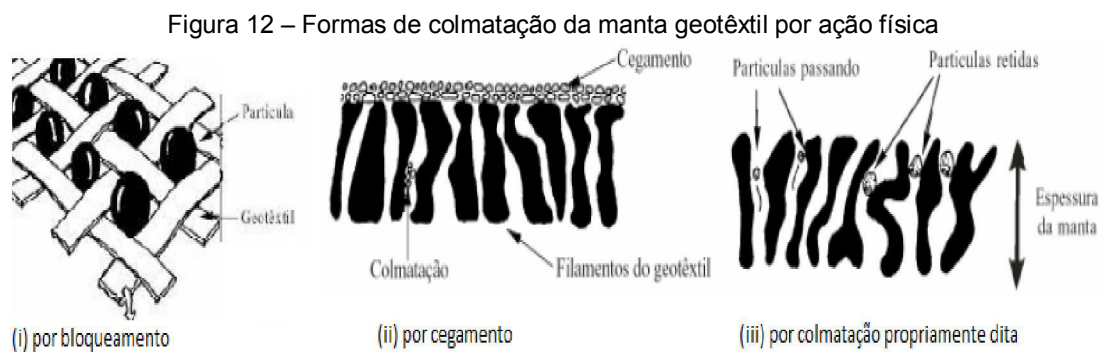
Segundo Barroso (2007) para avaliar o uso de manta geotêxtil como material filtrante é necessário o conhecimento das seguintes propriedades hidráulicas:

- permeabilidade normal à manta, que permite avaliar a facilidade com que o fluido passa através do meio poroso;
- permeabilidade no plano da manta ou transmissividade, que é a capacidade de fluxo hidráulico no plano geotêxtil;
- porosidade, porometria e abertura de filtração, sendo a porosidade a relação de volume de vazios e volume da amostra, a porometria é a medida das dimensões dos poros e sua distribuição, e a abertura de filtração está relacionada à abertura do geotêxtil equivalente à partícula de maior diâmetro que consegue atravessar a manta.

O desaguamento de lodo de ETAs por leito de drenagem segundo Barroso (2007), pode ser entendido como filtração de partículas em suspensão. Nesse processo, quando a partícula carregada encontra o filtro ela tende a se depositar na superfície, ocorrendo a colmatação da manta e conseqüente perda de carga no sistema, porém sem redução na eficiência do sistema filtrante ao longo do tempo.

O fenômeno de colmatação afeta diretamente a capacidade drenante do meio poroso, fazendo o fluxo diminuir à medida que os espaços vazios diminuem. Segundo Barroso (2007), as causas da colmatação podem ser físicas, químicas ou biológicas.

A colmatção causada por ação física está relacionada à ação de um gradiente hidráulico sob a manta geotêxtil provocando um fluxo unidirecional, onde a colmatção pode ocorrer por três formas, como mostra a Figura 12, (i) bloqueamento, quando as partículas se posicionam sobre as aberturas do geotêxtil obstruindo-o totalmente ou parcialmente, o que pode acontecer independente do tempo de funcionamento do filtro; (ii) por cegamento, quando partículas finas se agrupam e formam uma camada de baixa permeabilidade sobre a face do geotêxtil; ou (iii) por colmatção propriamente dita, que ocorre quando partículas com diâmetro próximos às aberturas do geotêxtil ficam retidas ao longo da espessura do material (BARROSO, 2007).



Fonte: Adaptado John (1987) apud Barroso (2007)

Segundo o mesmo autor, a colmatção química é resultante de carbonatos e sulfatos dissolvidos no fluido, que ao atravessar o geotêxtil formam cristais de sais ocupando os vazios no meio poroso. E a colmatção biológica é resultado da presença de microorganismos no fluido que promovem o crescimento de biofilmes sobre a manta.

Além da colmatção, uma vez em uso o geotêxtil está sujeito a diversos processos de degradação, dentre eles o ataque mecânico, o qual pode advir de uma ação abrasiva ou pela ação de animais, insetos, bactérias, etc. Além disso, pode ocorrer o ataque químico, quando o geotêxtil é submetido ao contato com lodos muito ácidos ou muito básicos. Tais ataques podem causar inchamento das fibras, danos na estrutura fragilizando o geotêxtil (FREITAS, 2003).

Machado, Lucena e Vieira (2006) compararam o desaguamento de lodo de ETA em leitos de secagem convencionais e modificados. Os resultados mostraram que ambos os leitos são eficientes para remoção dos diferentes

parâmetros analisados, porém, a qualidade e quantidade de líquido drenado foi superior no leito modificado.

Achon, Barroso e Cordeiro (2008) realizaram estudos com os novos leitos modificados, chamados Leitos de Drenagem, os resultados mostraram a diminuição do tempo de remoção da água livre e obtenção de drenado de boa qualidade, passível de reutilização ou recuperação. A drenagem da água livre para o lodo de PACI foi de 1 hora e para o de sulfato de alumínio 7 horas. Segundo os autores, o tempo necessário para secagem do lodo foi em média igual a sete dias, independente do volume de lodo disposto no leito, aonde foi possível reduzir 87% do volume de lodo de PACI e 83% do volume de lodo de sulfato de alumínio. A porcentagem de sólidos totais ao final dos 7 dias foi de aproximadamente 28% para o lodo de PACI e 31% para o lodo de sulfato de alumínio.

Fontana (2004), no município de Cardoso-SP, construiu um leito de drenagem em escala real, com área de 60 m<sup>2</sup> e altura de 0,50 m, precedido por um sedimentador. Utilizou-se manta geotêxtil do tipo não tecida de poliéster, com densidade 600 g.m<sup>-2</sup>, abertura de 0,06 a 0,13 µm e espessura de 4,4 mm. A altura de lodo disposta nos leitos foi de 40 cm e 50 cm, e a drenagem da água livre ocorreu em 36 horas. Os resultados obtidos demonstraram elevado desempenho no desaguamento de lodo, com redução de 98% do volume de resíduos, reduções de SST superiores a 99% e de DQO maiores que 98%. Além disso, o drenado apresentou valores de turbidez, pH, sólidos e DQO passíveis de recirculação para o início da ETA, conforme apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do lodo bruto e do drenado da ETA Cardoso		
Parâmetros	Lodo do Decantador	Líquido Drenado
Turbidez (uT)	-	0,9
pH	7,0	6,8
Sólido sedimentável (mg/L)	850	0,03
Sólido total (mg/L)	28263	285
Sólido fixo (mg/L)	20032	107
Sólido volátil (mg/L)	8231	178
Sólido suspenso total (mg/L)	28400	14
Sólido suspenso fixo (mg/L)	5350	4
Sólido suspenso volátil (mg/L)	23050	10
(-- ) Não determinado		

Fonte: adaptado Fontana (2004)

No trabalho desenvolvido por Fontana (2004), foi demonstrado o potencial uso do Leito de Drenagem para desaguamento de resíduos de ETAs.

Porém, não foi possível avaliar a influência das variáveis climáticas e nem a compreensão mais detalhada do comportamento dos resíduos de ETAs durante as fases de drenagem e de secagem.

Barroso (2007) estudou a influência das micro e macro propriedades do lodo de ETA, através do desaguamento de lodos de sulfato de alumínio e PACI em leitos de drenagem. A taxa de aplicação utilizada pelo pesquisador variou de 0,04 à 7,35 kg.m<sup>-2</sup>. Assim como na pesquisa realizada por Achon, Barroso e Cordeiro (2008), o tempo de drenagem da água livre para o lodo de PACI foi de 1 hora e para o de sulfato de alumínio foi de 8 horas. Foi possível obter reduções de volume na ordem de 80 e 90% para os lodos de sulfato de alumínio e PACI, e teores de sólidos de 30 à 90%.

O potencial de filtração de um geotêxtil segundo Freitas (2003) está associado à porosidade, à porometria e ao tamanho do poro. De forma que, quanto menor a abertura dos poros maior é a capacidade de filtração.

Lima (2010) e Macedo (2010) avaliaram diferentes tipos de leitos de drenagem / secagem em escala reduzida e piloto, com uso de manta geotêxteis em poliéster por meio de experimentos de laboratório. Foram considerados como aspectos técnicos de projeto a taxa de aplicação de sólidos (TAS) em 3 tipos de gramatura de manta geotêxtil (150, 300 e 600 g.m<sup>-2</sup>) e a eficiência, avaliada pela caracterização do lodo afluente ao leito de drenagem, da água drenada e do lodo retido no leito de drenagem. Os autores concluíram que a combinação da manta de 600 g.m<sup>-2</sup> e TAS entre 2,5 e 3,0 kg.m<sup>-2</sup> proporcionou melhores resultados de eficiência em relação à produção de drenado. Os estudos apresentaram resultados promissores por possibilitar a adequação das características do drenado para descarte em corpos de água doce classe II e possibilitar a recirculação de 78 a 83% do volume de água drenada para produção de água na ETA.

Oliveira (2010) estudou a secagem natural do lodo em leitos de secagem piloto convencionais, em leitos de secagem piloto alternativos com geotêxtil não tecido - bidim com gramatura de 600 g.cm<sup>-2</sup> e em leitos de secagem piloto alternativos com geotecido com gramatura de 133 g.cm<sup>-2</sup>. A Tabela 5 mostra os parâmetros de projeto aplicados pela autora em cada concepção de leito.

Tabela 5 – Parâmetros de projetos estudados por Oliveira (2010)

Leitos	Volume de lodo (L)	ST (mg.L <sup>-1</sup> )	TAS (kg.m <sup>-2</sup> )
Convencionais	40	8984	3,17
	57	8984	4,52
	74	8984	5,86
Alternativos	40	8984	2,24
	57	8984	3,2

Fonte: Adaptado Oliveira (2010)

Oliveira (2010) avaliou a evolução da altura da lâmina de lodo nos leitos e a concentração de sólidos nos leitos, e o volume e as características do drenado, em um período de 30 dias, tendo início no dia 19 de maio de 2010. Nesse período a temperatura média foi de 14°C, com uma precipitação total de 75,4 mm, condições que prejudicaram a secagem do lodo em função do acúmulo de água da chuva nos leitos. No 30º dia de monitoramento os teores de sólidos nos leitos convencionais apresentaram valores entre 25,9 a 40,4%, nos leitos alternativos com bidim os valores foram de 17,8 e 27,8% e nos leitos alternativos com geotecido foram 5 e 7,7%. Segundo a autora os leitos que apresentaram drenados com melhor qualidade foram os leitos alternativos com bidim, seguidos dos leitos alternativos com geotecido e leitos convencionais.

Achon, Barroso e Cordeiro (2005) relatam que a evaporação, ventilação, temperatura e principalmente a umidade relativa do ar, são proporcionais à redução de volume e às variações do teor de sólidos totais durante a secagem do lodo. Barroso (2007) estudou a influência da precipitação, umidade relativa do ar, insolação, evaporação, vento e temperatura, na fase de secagem do lodo. Segundo o pesquisador, a ocorrência de precipitação não influenciou na incorporação de água na massa de lodo, porém o aumento da umidade do ar afetou a secagem do lodo. O autor considera a evaporação como uma variável utilizada para indicar de forma indireta o fluxo de umidade perdida no lodo. Pode-se dizer que a ventilação auxiliou na secagem do lodo, uma vez que as curvas diárias de variação de ventilação e teor de sólidos foram proporcionais.

### 3.6.2 Disposição final dos lodos de ETAs

O conhecimento prévio da natureza química dos resíduos é necessário a fim de assegurar que estes sejam dispostos de forma compatível, sem trazer prejuízos. Existem várias alternativas de disposição final do lodo de ETA

desidratado, as quais dependem da viabilidade técnica, econômica e ambiental. Dentre as alternativas usualmente utilizadas, pode-se citar: aplicação ao solo, aterros sanitários, tratamento junto com esgotos sanitário na Estação do Tratamento de Esgoto – ETE, incineração, fabricação de cimento e tijolos.

Segundo Di Bernardo e Centurione Filho (2002) e Cordeiro (1999) o principal inconveniente no uso de aterros é a concentração de sólidos, que deve ser acima de 20%. Pois lodo com elevados teores de umidade podem interferir no desempenho do aterro por não apresentar características semelhantes ao solo comumente utilizado. Segundo Rodriguez *et. al.* (2011) uma das possibilidades de dispor o lodo de ETA desidratado em aterros sanitários sem reduzir a capacidade do aterro, é a aplicação do lodo compactado ou de traços solo-lodo compactado na forma de camada de cobertura ou de impermeabilização de fundo, substituindo o solo compactado geralmente utilizado.

O lançamento de lodo de ETA nas ETEs via rede coletora de esgoto é uma alternativa que eliminaria a implantação de um sistema de tratamento de lodo nas próprias ETAs. Porém essa alternativa deve ser criteriosamente analisada, pois segundo Ferranti (2006) essa atividade pode trazer alguns prejuízos as unidades da ETE, principalmente nos digestores de lodo e nos decantadores primários que irão receber a maior parte das impurezas desses resíduos. Melo *et al.*, (2003) avaliaram o impacto do recebimento de lodo de ETA na ETE Franca por dois anos, e concluíram que o recebimento de lodo na ETE não reduziu significativamente a eficiência de remoção dos parâmetros analisados.

Os principais componentes do cimento são a  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , os quais também podem ser encontrados nos lodos de ETA, podendo ser utilizados em certas proporções como matéria-prima de produtos cerâmicos (RICTHER, 2001). Porém, segundo Megda, *et al.* (2005) , a alta concentração de matéria orgânica, e presença de antracito ou carvão ativado, sulfato, permanganato de potássio e metais pesados no lodo podem comprometer a qualidade do cimento produzido.

Sales e Cordeiro (2001) estudaram a possibilidade de utilização de lodos de ETA secos em conjunto com resíduos de construção e demolição no preparo de argamassa e concretos não-estruturais. Os resultados obtidos mostraram que a adição de 3% de lodo (em relação à massa de agregado miúdo) possibilita a obtenção de concretos com resistência mecânica e absorção similares às do

concreto natural. Segundo Megda, Soares e Achon (2005) a aplicação de lodo de ETA na fabricação de tijolos pode ser realizado durante o processo de fabricação do produto ou diretamente na própria jazida onde a argila é retirada, onde ele inicialmente deve ser desidratado e aplicado na proporção de 10% de lodo misturado com argila, neste caso é desejável que o lodo tenha umidade maior que 20%. Para aplicação durante o processo a umidade deve ser igual ou maior que 50%.

A aplicação de lodo de ETA no solo, consiste basicamente em dispor o lodo na agricultura, o qual pode ser aplicado na forma líquida, semi-sólida ou sólida. Lodos de sulfato de alumínio ou de cal servem como condicionadores do solo, tornando-o mais poroso, retendo assim mais umidade e aumentando sua coesividade. Porém, o alumínio presente no lodo pode fixar o fósforo no solo, evitando sua assimilação pelas raízes das plantas, por isso limita-se a aplicação de lodo de sulfato de alumínio a um máximo de 2,2 a 4,4 kg.m<sup>-2</sup> (RICHTER, 2001).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos do desenvolvimento experimental relacionados aos ensaios de desaguamento em escala reduzida – Etapa I e em escala piloto – Etapa II. São também detalhados os ensaios específicos para avaliar influência da execução de sucessivos desaguamentos na manta geotêxtil. Por fim, são apresentados os materiais e métodos dos estudos realizados visando a disposição final da torta de lodo desidratada como camada de cobertura ou de impermeabilização de fundo de células em aterros sanitários em substituição ao solo.

Apresenta-se a seguir, a descrição das características das Estações de Tratamento de Água – ETAs Cafezal e Tibagi do município de Londrina - PR, das quais foram coletados os lodos de estudo tipos A e B, respectivamente.

### 4.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA CAFEZAL

No sistema de tratamento Cafezal, a água bruta é captada no Ribeirão Cafezal, localizado a aproximadamente 6,5 km da ETA e bombeada utilizando-se dois ou três conjuntos de bombas, seguindo por gravidade até a ETA.

Atualmente a ETA Cafezal tem capacidade de produção de água potável de aproximadamente  $715 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . O tratamento é realizado por ciclo completo, composto pela seqüência dos processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e quando necessário, são realizados os processos de adsorção e pré-oxidação.

Na chegada da água bruta na Calha Parshall é realizada a aplicação de Cloreto Férrico Hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) para coagulação e de Cal Hidratada para ajuste de alcalinidade. Além disso, pode ser realizada a aplicação de Cloro a fim de reduzir o teor de ferro, manganês e evitar a proliferação de algas que podem causar gosto e odor indesejados na água ou ainda obstruir o meio granular dos filtros.

Após o processo de floculação, tem-se início a sedimentação dos flocos formados com conseqüente clarificação da água nos decantadores. A ETA

Cafezal opera atualmente com cinco decantadores convencionais de fluxo horizontal, sendo três decantadores no módulo 1 e dois no módulo 2.

Em seguida, a água decantada é encaminhada aos filtros, tendo início a filtração. A ETA possui quatro filtros em cada módulo, totalizando oito filtros, os quais são constituídos por cinco camadas filtrantes de diferentes granulometrias.

Sabe-se que nas ETAs de ciclo completo a maior quantidade de lodo em termos mássicos é gerada nos decantadores. Na ETA Cafezal os decantadores do módulo 1 que tem capacidade de 900 m<sup>3</sup> acumulam aproximadamente 240 m<sup>3</sup> de lodo cada um, já os decantadores do módulo 2 com capacidade de 1.500 m<sup>3</sup>, acumulam aproximadamente 375 m<sup>3</sup> de lodo cada um.

Semanalmente é realizada a limpeza de um dos decantadores da ETA, de modo que o período médio de acumulação de lodo em cada decantador resulte da ordem de 35-40 dias. Para limpeza, cerca de 50% do volume superior do decantador - sobrenadante, é encaminhado para um reservatório de recepção de 300 m<sup>3</sup>, que recebe também a água de lavagem dos filtros, de onde é recalcado para o início do tratamento de água.

O restante da água – lodo, que permanece no decantador, e que corresponde a 50 % do volume do mesmo, tem grande concentração de sólidos e é encaminhada para um reservatório de aproximadamente 1.000 m<sup>3</sup> de capacidade. Este reservatório é dotado de agitadores submersíveis (comandados por sensores de nível) para manter o lodo em suspensão durante o recalque para a rede coletora de esgotos, seguindo por gravidade até a Estação de Tratamento de Esgotos da região sul da cidade.

Para a limpeza total do fundo dos decantadores é necessário aplicar água sob pressão, para retirada do lodo acumulado no fundo do decantador.

A Figura 13 e Figura 14 mostram as fotos da limpeza de um dos decantadores convencionais da ETA Cafezal durante seu esvaziamento e retirada do lodo acumulado no fundo do decantador.

Figura 13 - Lodo acumulado no decantador convencional após esvaziamento completo para limpeza



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 14 – Remoção final do lodo acumulado no decantador por jateamento



Fonte: Do Autor (2012)

## 4.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA TIBAGI

A captação de água no sistema de tratamento de água Tibagi é realizada no Rio Tibagi, localizado a 12 km da ETA, fazendo-se uso da pré-cloração quando necessária. Na ETA Tibagi é adotado o tratamento de ciclo completo, composto pela seqüência dos processos de coagulação, floculação, sedimentação e filtração.

A ETA atualmente opera com capacidade de produção de  $1.200 \text{ L.s}^{-1}$ . Assim que a água chega à estação, passa, pela calha Parshall, onde recebe a aplicação de Hidróxi-cloreto de Polialumínio (PAC) para coagulação e de Cal Hidratada para ajuste de alcalinidade e em seguida, a vazão é dividida em 2 módulos de  $600 \text{ L.s}^{-1}$  cada um.

A etapa de floculação é composta por 36 câmaras, que operam em sistema hidráulico por chicanas verticais. A água floculada segue para os decantadores de alta taxa, onde ocorre a sedimentação das partículas pela ação da gravidade. A ETA Tibagi conta com oito decantadores com capacidade de  $175 \text{ m}^3$ , os quais são dotados de placas paralelas de cimento amianto e projetados para uma taxa de operação nominal de  $180 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ .

Para o processo de filtração, a ETA possui doze filtros com sete camadas filtrantes de diferentes granulometrias, que operam com taxa de filtração média de  $299 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ . A desinfecção final é feita por meio da aplicação de cloro.

A limpeza dos decantadores é realizada quinzenalmente ou em um período menor de tempo conforme a necessidade. Inicialmente é realizada a descarga parcial do sobrenadante, e em seguida aplica-se água sob alta pressão nas telas, placas e paredes do decantador. O lodo produzido é encaminhado a um tanque de equalização, e posteriormente é descartado em um corpo de água próximo, o córrego dos PiriQUITOS.

A Figura 15 mostra os decantadores de alta taxa da ETA Tibagi.

Figura 15 – Decantadores de alta taxa da ETA Tibagi



Fonte: Do Autor (2012)

### 4.3 ENSAIOS DE DESAGUAMENTO

Todos os ensaios de desaguamento em leito de drenagem / secagem foram realizados com lodos frescos, logo após a coleta, nos protótipos montados no Laboratório de Saneamento da Universidade Estadual de Londrina – UEL.

Foram utilizados manta geotêxtil de  $600 \text{ g.m}^{-2}$  (baseados nos dados de Lima (2010), Macedo (2010) e Cordeiro (2001)), taxa de aplicação de sólidos - TAS de  $7,5 \text{ kg.m}^{-2}$  e taxa de aplicação volumétrica – TAV de  $15 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ . Na Tabela 6 são mostradas as características da manta geotêxtil utilizada.

Tabela 6 - Características da manta geotêxtil utilizada nos ensaios de desaguamentos

Gramatura (g.m <sup>-2</sup> )	Permissividade (s <sup>-1</sup> )	Permeabilidade e normal (cm.s <sup>-1</sup> )	Abertura aparente de infiltração (mm)	Composição química	Deformação geotêxtil
600	1,00	0,35	0,15 a 0,11	100% Poliéster	>60

Fonte: Maccaferri Ltda

A taxa de aplicação de sólidos – TAS de 7,5 kg.m<sup>-2</sup> foi definida em função do tempo de drenagem requerido até a extinção da lâmina líquida, limitado a 2 dias, após a realização de ensaios preliminares com TAS de 5,0; 7,5 e 10 kg.m<sup>-2</sup> no protótipo de escala reduzida.

A TAS refere-se à quantidade de sólidos em kg aplicados em 1 m<sup>2</sup> de área do leito de drenagem / secagem, e pode ser calculada através da Equação 4. Baseado nas concentrações de sólidos dos lodos iniciais utilizados neste trabalho, considerou-se para efeito de cálculo densidade relativa igual a 1.

$$TAS \text{ (kg.m}^{-2}\text{)} = \frac{ST \text{ (kg.L}^{-1}\text{)} \times \text{Volume (L)}}{\text{área do leito (m}^2\text{)}} \quad \text{Equação 4}$$

A taxa de aplicação volumétrica - TAV refere-se à vazão de líquido (lodo) aplicado em 1 m<sup>2</sup> de área do leito de drenagem / secagem e pode ser calculado através da Equação 5.

$$TAV \text{ (m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Vazão (m}^3 \cdot \text{d}^{-1}\text{)}}{\text{área do leito (m}^2\text{)}} \quad \text{Equação 5}$$

Foram utilizados os lodos de decantadores tipo A, proveniente da ETA Cafezal, que trata água de manancial com características predominantemente inorgânico e utiliza o cloreto férrico como coagulante químico, e tipo B, proveniente da ETA Tibagi, que trata água de manancial com características predominantemente orgânico e utiliza o hidróxi-cloreto de polialumínio como coagulante químico.

Cada ensaio de desaguamento foi dividido em duas fases distintas e consecutivas: fase de drenagem (até a extinção da lâmina líquida) e fase de secagem, com duração total entre 7 e 15 dias, visando atender uma condição de demanda operacional crítica, passível de aplicação em ETAs de pequeno porte.

Durante a fase de drenagem, toda a água drenada foi coletada em frascos de volume preestabelecido e acondicionados sob refrigeração para posterior análise.

Para avaliar o impacto da carga de poluição / contaminação gerada pelo lançamento dos lodos drenados em corpos hídricos receptores, considerando o lançamento direto da totalidade do volume drenado, foi constituída uma amostra composta dos lodos drenados - ACD IV, utilizando-se volumes fixos de todas as amostras coletadas ao longo do tempo.

Complementarmente, foram constituídas amostras compostas dos lodos drenados considerando a implantação de um sistema on-line de separação do drenado produzido mediante controle de qualidade. Devido à facilidade de análise, curto tempo de resposta e boa correlação com o teor de sólidos totais, o parâmetro de controle de eficiência e qualidade utilizado neste trabalho foi a turbidez.

Para sistematizar os resultados em relação à qualidade de água drenada, foram estabelecidas 2 condições de enquadramento (I e II) e 1 condição de reaproveitamento (III):

- Condição I: drenados com valores de turbidez inferiores à 40 uT considerando a possibilidade de enquadramento da água drenada em corpos de água doce Classe I segundo estabelecido pela Resolução 357/05 do Conama;
- Condição II: drenados com valores de turbidez inferiores à 100 uT considerando a possibilidade de enquadramento da água drenada em corpos de água doce Classe II segundo estabelecido pela Resolução 357/05 do Conama, classificação da maioria dos corpos hídricos receptores da região;
- Condição III: drenados com valores de turbidez inferiores à 10 uT considerando a possibilidade de reaproveitamento da água drenada no sistema de produção de água da própria ETA.

Assim, foram constituídas amostras compostas dos lodos drenados - considerando cada condição (ACD I, II e III), isto é, utilizando-se volumes fixos de todas as amostras coletadas com valores de turbidez inferiores à 40; 100 e 10 uT, respectivamente.

A avaliação da eficiência dos sistemas de drenagem foi realizada pela caracterização quali / quantitativa dos lodos afluentes ao sistema de desaguamento, dos drenados e tortas de lodo produzidos ao longo do tempo.

Os lodos iniciais tipos A e B e as amostras compostas dos drenados (ACD I, II, III e IV) foram caracterizados quanto aos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos seguindo procedimentos da APHA, AWWA e WEF (2005) com adaptações, apresentados na Tabela 7. As análises para quantificação dos metais foram realizadas por um laboratório credenciado por prestação de serviço.

Tabela 7 – Parâmetros e métodos / equipamentos utilizados na caracterização dos lodos e drenados

Parâmetro	Método
Turbidez (uT)	Nefelométrico – 2130 B
Cor aparente (uH)	Espectrofotométrico- 2120 C
Cor verdadeira (uH)	Espectrofotométrico - 2120 C Filtrado em membrana tipo GF/C
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO <sub>5d, 20°C</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	Teste DBO 5 dias a 20°C - 5210
Demanda Química de Oxigênio DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	Refluxo fechado - 5220 D
Série de sólidos (mg.L <sup>-1</sup> )	Sólidos secos a 103-105°C; Sólidos voláteis incinerados a 550°C - 2540
Coliformes totais e <i>E. coli</i> (NMP/100mL)	Substrato cromogênico / colilert - 9223
Alúminio, Cádmio, Cálcio, Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Fósforo, Magnésio, Manganês, Níquel, Potássio, Silício, Sódio, Titânio, Zinco Totais(mg.L <sup>-1</sup> ) (*)	ICP-OES Plasma/ 3125
Velocidade de sedimentação (cm.min <sup>-1</sup> ) (*)	Teste em colunas de sedimentação
Resistência específica (m.kg <sup>-1</sup> ) (*)	Teste do Tempo de Filtração (2710 H)

(\*): Análises realizadas somente nos ensaios de desaguamento em escala piloto – Etapa II

A velocidade de sedimentação dos lodos iniciais tipos A e B foi obtida através de ensaios em coluna de sedimentação, utilizando provetas de vidro graduadas de 1L e leituras das interfaces ao longo do tempo, de acordo com Barroso (2007).

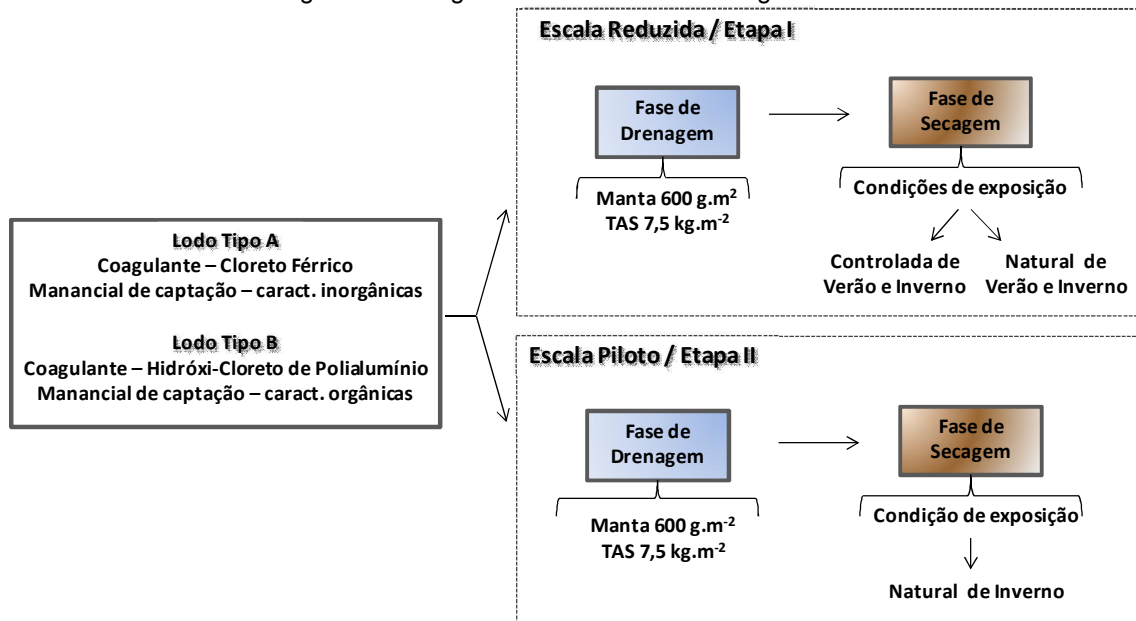
A resistência específica dos lodos tipos A e B foi determinada segundo metodologia descrita por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011) com base no teste do Tempo de Filtração descrito no método 2710 H de APHA, AWWA e WEF (2005).

Na fase de secagem, para monitoramento do teor de sólidos ou perda de umidade da torta de lodo retido na unidade de drenagem / secagem, as amostras do lodo foram coletadas diariamente e preferencialmente no mesmo horário. O teor de sólidos foi calculado considerando as massas das amostras com umidade, no momento da coleta, e sem umidade, após aquecimento em estufa a 105°C durante 24 h.

Para monitorar as temperaturas e umidades diárias durante a fase de secagem, utilizou-se um sensor (Data Logger) programado para registrar a temperatura e a umidade real do ambiente a cada hora.

Na Figura 16 é apresentado o organograma dos ensaios de desaguamento em escala reduzida – Etapa I e em escala piloto – Etapa II.

Figura 16 – Diagrama dos ensaios de desaguamento



Fonte: Do Autor (2012)

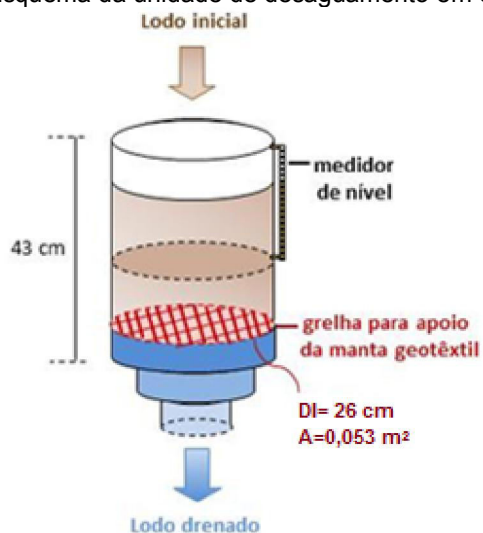
São apresentados a seguir detalhes específicos dos ensaios de desaguamento em escala reduzida – Etapa I e em escala piloto – Etapa II.

#### 4.3.1 Etapa I – Desaguamento de lodo de decantadores de ETAs em protótipos de escala reduzida

As unidades de drenagem / secagem em escala reduzida – Etapa I (Figura 17) foram compostas por:

- Recipiente plástico com capacidade total de 30 L;
- Manta geotêxtil de gramatura de 600 g.m<sup>2</sup>, gentilmente fornecida pela Macafferri do Brasil Ltda;
- Grelha plástica MacNet para suporte da manta;
- Dispositivo de fundo cônico para coleta do drenado.

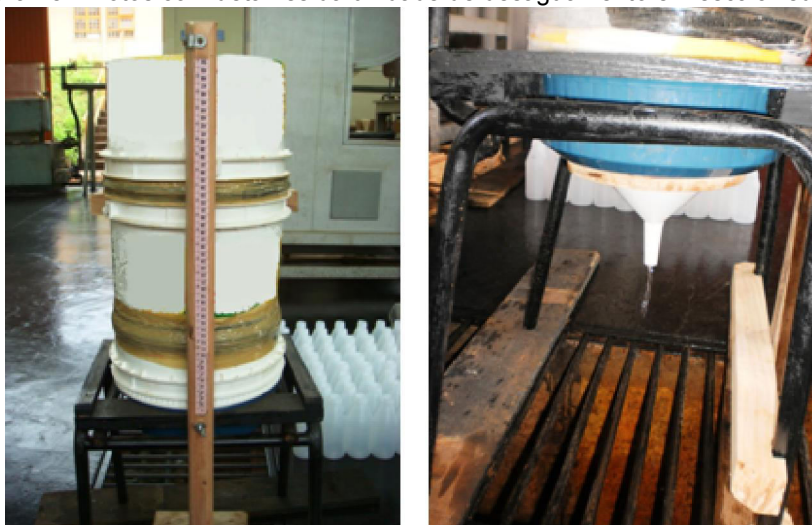
Figura 17 – Esquema da unidade de desaguamento em escala reduzida



Fonte: Do Autor (2012)

A Figura 18 mostra fotos com detalhes da unidade de desaguamento em escala reduzida.

Figura 18 – Fotos com detalhes da unidade de desaguamento em escala reduzida



Fonte: Do Autor (2012)

Na Tabela 8 são mostrados a taxa de aplicação volumétrica – TAV, os volumes e vazões empregados nos ensaios em escala reduzida – Etapa I, obtidos com base nos teores de sólidos totais – ST nos lodos de decantadores tipos A e B e taxa de aplicação de sólidos - TAS de  $7,5 \text{ kg.m}^{-2}$ .

Tabela 8 – Parâmetros de projeto aplicados nos ensaios em escala reduzida – Etapa I

	Teor de ST (%)	Manta (g.m <sup>-2</sup> )	TAS (kg.m <sup>-2</sup> )	TAV (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )	Volume de lodo aplicado (L)	Vazão de aplicação (mL.min <sup>-1</sup> )
Lodo tipo A	1,5	600	7,5	15	26,5	550
Lodo tipo B	1,6	600	7,5	15	24,8	550

Na fase de secagem da escala reduzida – Etapa I, a avaliação do teor de sólidos da torta de lodo retido foi realizada em diferentes condições climáticas – condição controlada de verão e inverno e condição natural de verão e inverno.

As temperaturas e umidades relativas do ar fixadas nas condições controladas de verão e inverno foram definidas de acordo com o estudo realizado por Barbosa (1997), que realizou um levantamento das características climáticas da cidade de Londrina baseado em dados horários do período de 1979 a 1990. Segundo a autora, a temperatura média anual em Londrina foi de 20,7°C, sendo fevereiro, o mês mais quente com temperatura média de 24°C, e os meses de junho e julho, os mais frios, com temperatura média de 16°C. A umidade relativa média foi de 73%, chegando a 77% no mês de fevereiro e 67% em agosto.

Assim, foram definidas as condições de exposição controladas de inverno e verão discriminadas a seguir:

- Condição controlada de verão - com temperatura de 30° C e umidade relativa de 80%;
- Condição controlada de inverno - com temperatura de 15° C e umidade relativa de 60%.

Para as simulações das condições de exposição controladas utilizou-se uma câmara climática com controle de temperatura e umidade, gentilmente emprestada por uma empresa fabricante de equipamentos de laboratório.

Para avaliar as limitações dos ensaios da fase de secagem das tortas de lodo sob condições controladas, estes foram também reproduzidos para as condições naturais de verão e inverno, não protegida da ação de intempéries.

#### **4.3.2 Etapa II – Desaguamento de lodo de decantadores de ETAs em protótipos de escala piloto**

Os ensaios de desaguamento em escala piloto – Etapa II foram realizados em protótipos compostos por um tanque de polietileno com capacidade

de 320 L, provido de uma grelha plástica para suporte da manta e tubulação de saída inferior para coleta do drenado. A Figura 19 e Figura 20 mostram o esquema e a foto da unidade de desaguamento utilizada na escala piloto.

Figura 19 - Esquema da unidade de desaguamento utilizada na escala piloto



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 20 – Foto da unidade de desaguamento utilizada na escala piloto



Fonte: Do Autor (2012)

Baseado nos teores de sólidos totais – ST nos lodos de decantadores tipos A e B foram definidos os parâmetros de projeto aplicados nos ensaios em escala piloto – Etapa II, mostrados na Tabela 9. Infelizmente, o volume coletado do lodo tipo B foi insuficiente para a aplicação da TAS de  $7,5 \text{ kg.m}^{-2}$  e TAV de  $15 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  tendo resultado em TAS de  $6,5 \text{ kg.m}^{-2}$  e TAV de  $14 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ . Outro aspecto a ser observado refere-se a contribuição lateral da manta que não foi considerada nos cálculos dos parâmetros de projeto aplicados.

Tabela 9 – Parâmetros de projeto aplicados nos ensaios em escala piloto – Etapa II

	Teor de ST (%)	Manta ( $\text{g.m}^{-2}$ )	TAS ( $\text{kg.m}^{-2}$ )	TAV ( $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ )	Volume de lodo aplicado (L)	Vazão de aplicação ( $\text{mL.min}^{-1}$ )
Lodo tipo A	0,91	600	7,5	20	293,8	5.000
Lodo tipo B	1,27	600	6,5	14	164,5	3.500

Na fase de secagem da escala piloto a avaliação do teor de sólidos da torta de lodo retido foi realizada para a condição crítica de exposição - condição natural de inverno, desprotegida da ação de intempéries.

#### 4.3.2.1 Teste de sedimentabilidade – Ensaios em coluna de sedimentação

Segundo Barroso (2007) a interpretação e explicação do fenômeno da sedimentação dos lodos de ETAs, pode auxiliar na compreensão da sedimentação no processo de desaguamento por sistemas naturais, particularmente por leito de drenagem.

Na sedimentação por zonas, que ocorre normalmente em lodos de ETAs, iniciado o processo de sedimentação, no instante  $t_0$  o lodo está presente em toda a altura da coluna, à medida que o lodo sedimenta a interface líquido clarificado-lodo evolui, aumentando a concentração de sólidos nas camadas inferiores. Ao mesmo tempo a velocidade de sedimentação diminui até tornar-se nula, nesse instante tem-se a concentração máxima de sólidos sedimentados (BARROSO, 2007; SANTOS, BARBOSA FILHO e GIORDANO, 2005).

O teste de sedimentabilidade foi realizado em proveta de vidro graduada de 1 L. Encheram-se as provetas com os lodos homogeneizados, deixou-se ocorrer a clarificação e o adensamento, e fez-se a leituras das interfaces ao longo do tempo sedimentação.

Em seguida foram construídas as curvas de sedimentação, a partir das quais calculou-se a velocidade de sedimentação para cada lodo – tipos A e B. Segundo Barroso (2007) e Santos, Barbosa Filho e Giordano (2005) a velocidade de sedimentação máxima,  $V_s$ , é determinada para quando a interface clarificado-lodo sedimenta à velocidade constante, para um instante  $t_1$  inicial a um instante  $t_2$  em que há crescente diminuição da velocidade (ponto de inflexão da curva). A curva que relaciona a altura da coluna de lodo  $\times$  tempo, neste intervalo, é um segmento de reta e a velocidade de sedimentação máxima é dada pelo coeficiente angular.

#### 4.3.2.2 Teste de resistência específica

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011) a resistência específica é o parâmetro usado para avaliar a filtrabilidade de um líquido através de uma massa sólida e pode ser determinada pela Equação 6.

$$r = \frac{2 \cdot b \cdot P \cdot A^2}{\mu \cdot C}$$

Equação 6

Em que :

$r$  : resistência específica ( $\text{cm.g}^{-1}$ );

$P$  : pressão de filtração ( $\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-2}$ );

$A$  : área filtrante ( $\text{cm}^2$ );

$\mu$  : viscosidade do filtrado ( $\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-2}$ );

$C$  : massa de sólidos por unidade de volume filtrado ( $\text{g.cm}^{-3}$ );

$b$  : coeficiente ( $\text{s/cm}^6$ ), dado pela Equação 7.

$$b = tg\alpha = \frac{\left(\frac{t_2}{v_2}\right) - \left(\frac{t_1}{v_1}\right)}{v_2 - v_1} \quad \text{Equação 7}$$

$$b = tg\alpha = \frac{\left(\frac{t_2}{v_2}\right) - \left(\frac{t_1}{v_1}\right)}{v_2 - v_1}$$

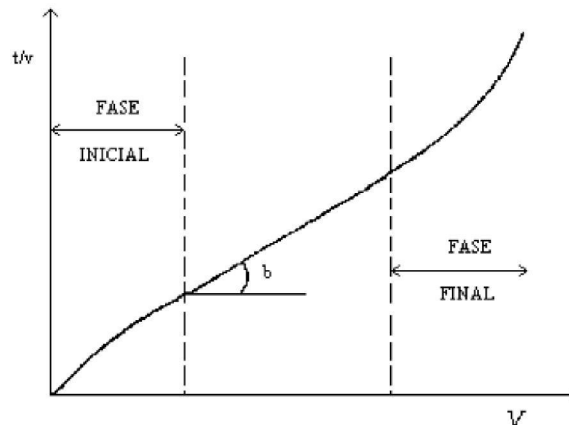
Em que:

$t$  : tempo de filtração (s);

$v$  : volume filtrado ( $\text{cm}^3$ ).

O valor do coeficiente  $b$  é obtido construindo-se um gráfico no qual se tem os valores de  $v$  e  $(t/v)$ , conforme mostrado no Gráfico 2 .

Gráfico 2 – Gráfico típico dos valores de  $(t/v)$  em função de  $v$



Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011)

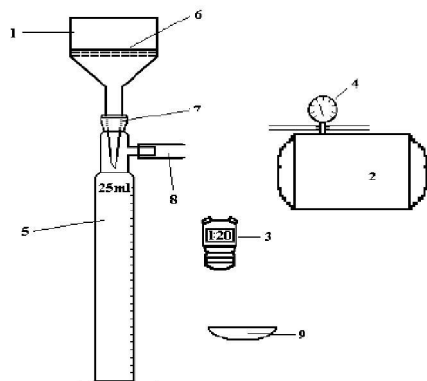
O teste de resistência específica foi realizado segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011) com base no teste do Tempo de Filtração descrito no método 2710 H de APHA, AWWA e WEF (2005).

O teste foi realizado utilizando 25 mL do lodo de acordo com o seguinte procedimento:

- O papel filtro Whatman 42 foi recortado de tamanho igual ao diâmetro interno do funil de Buchner, molhado e colocado em um cadinho de porcelana e levado para o interior de uma estufa a 100° C por 2 h;
- Após resfriado em dessecador, o papel filtro foi pesado, colocado no funil de Buchner, molhado e submetido à aplicação de vácuo para ocorrer a aderência do papel ao funil e para remover o excesso de água;
- Colocou-se 25 mL do lodo no funil e aplicou-se vácuo (380 mmHg) no sistema registrando-se em função do tempo o volume do filtrado. Os valores de ( $t/v$ ) em função de ( $v$ ) foram plotados em gráfico, obtendo-se o valor de  $b$ , sendo utilizado na equação para calcular a resistência específica. Após o término da filtração ou queda do vácuo, o ensaio foi encerrado;
- O papel filtro com os sólidos retidos foi retirado e colocado em cadinho de porcelana e mantido na estufa a 100° C por 2 h. A diferença entre o peso inicial e o peso final do papel filtro fornece a massa de sólidos totais utilizada na Equação 6.

A Figura 21 mostra o esquema do teste com detalhes dos equipamentos e materiais utilizados. A Figura 22 mostra a foto dos aparelhos utilizados no ensaio.

Figura 21 – Esquema e equipamentos utilizados no teste de resistência específica



**Erro!**

**Não é possível criar objetos a partir de códigos de campo de edição.**

1) funil de Bunchner nº 2; 2) bomba de vácuo; 3) cronômetro; 4) medidor de vácuo; 5) proveta graduada de 25 mL; 6) filtro de papel Whatman 42; 7) anel de borracha vedante; 8) mangueira para ligar a proveta a bomba; 9) cadinho de porcelana.

Fonte: Di Bernardo et al (2011)

Figura 22– Foto dos equipamentos utilizados no teste de resistência específica



Fonte: Do Autor (2012)

#### 4.4 INFLUÊNCIA DA EXECUÇÃO DE SUCESSIVOS DESAGUAMENTOS NA MANTA GEOTÊXTIL

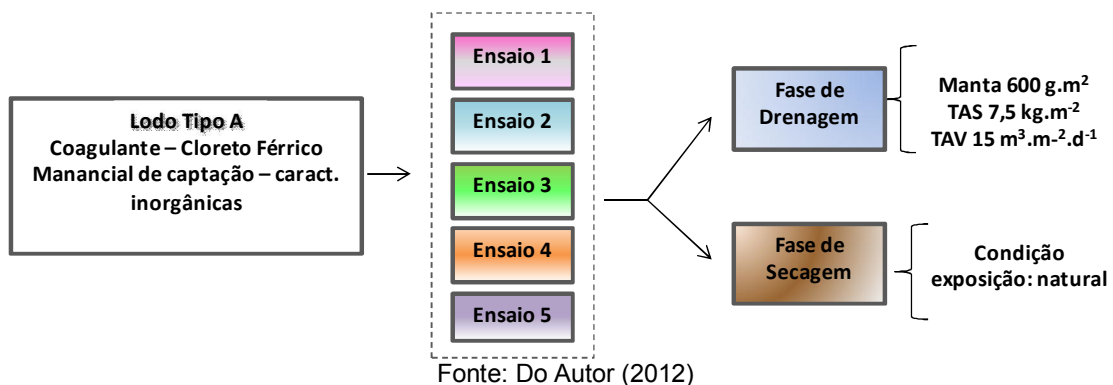
Com o objetivo de avaliar influência da execução de sucessivos desaguamentos na manta geotêxtil foram realizados 5 (cinco) ensaios de desaguamento sucessivos em escala reduzida, aplicando os mesmos parâmetros de projeto apresentados no item 4.3.1, utilizando somente o lodo tipo A.

Os parâmetros considerados nos ensaios foram a duração da fase de drenagem e a qualidade dos lodos drenados produzidos em função do tempo em cada ensaio, através dos valores de turbidez.

Após a secagem do lodo retido sob condição natural de exposição, o material sólido seco presente na manta geotêxtil foi descartado e a manta disponibilizada para desaguamento subsequente. É importante destacar que para limpeza da manta procedeu-se somente a retirada do material seco, sem aplicação de água para lavagem da mesma.

Na Figura 23 é apresentado o organograma dos sucessivos ensaios de desaguamentos com manta geotêxtil.

Figura 23 – Organograma dos sucessivos ensaios de desaguamentos com manta geotêxtil  
**Sucessivos ensaios de desaguamento com manta geotêxtil / Escala Reduzida**



#### 4.5 DISPOSIÇÃO FINAL DA TORTA DE LODO

A forma mais comum de disposição final do lodo de ETAs após a desidratação é feita em aterros sanitários. Com o objetivo de proporcionar ao lodo de ETA desidratado um destino mais nobre, Rodriguez *et. al.* (2011) estudaram a viabilidade da substituição do solo utilizado como camada de cobertura ou de impermeabilização de fundo, pelo lodo desidratado da ETA Cafezal de Londrina – PR (lodo tipo A) e traços solo-lodo. Após avaliação do comportamento mecânico do lodo desidratado bem como de traços solo-lodo e comparação com o comportamento mecânico do solo laterítico da região de Londrina, utilizado como impermeabilização de fundo e cobertura em aterro sanitário, o estudo revelou que sob esse ponto de vista, o solo pode ser substituído pelo lodo de ETA desidratado compactado ou por traços de solo-lodo.

Com o intuito de avaliar os riscos à saúde e possíveis impactos ambientais resultantes dessa prática, foram realizados para os lodos desaguados tipos A e B, o teste de lixiviação e a classificação, de acordo com as NBRs 10.004, 10.005 e 10.006 (ABNT, 2004).

##### 4.5.1 Ensaio em colunas de lixiviação

Para avaliar os efeitos de lixiviação simulando uma possível situação de precipitação em campo quando o lodo de ETA desaguado for usado como

cobertura de células em aterros sanitários, foi proposto um ensaio em colunas de lixiviação em protótipos de escala reduzida e ensaios em laboratório.

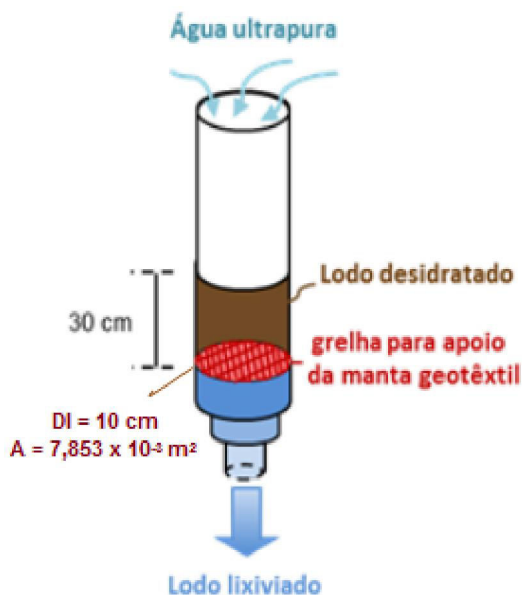
As colunas foram construídas usando tubos de PVC DN 100, com altura de 50 cm e diâmetro de 10 cm, na base foi adaptado um CAP com fundo recortado, acrescido de uma grelha e uma manta geotêxtil (gramatura de  $150 \text{ g.m}^{-2}$ ) para suporte da camada de lodo, para coleta do líquido percolado foi adaptado um dispositivo de fundo cônico. Cada coluna foi preenchida com um tipo de lodo até uma altura de 30 cm.

Segundo dados do IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná, a precipitação média anual de Londrina é de 1610 mm, ocorrendo em média em 121 dias do ano. Baseado nesses dados e na área dos protótipos em escala reduzida utilizados nesse teste, simulou-se uma condição crítica de precipitação contínua de  $3,5 \text{ mL.min}^{-1}$  (equivalente a 50 vezes o valor da precipitação média anual de Londrina-PR), aplicadas por 3 mangueiras / protótipo, simulando uma distribuição mais uniforme no lodo por um período de 6 dias.

A simulação da precipitação foi realizada com água ultrapura simultaneamente nas colunas de lodo tipos A e B através de uma bomba peristáltica previamente regulada para a vazão definida.

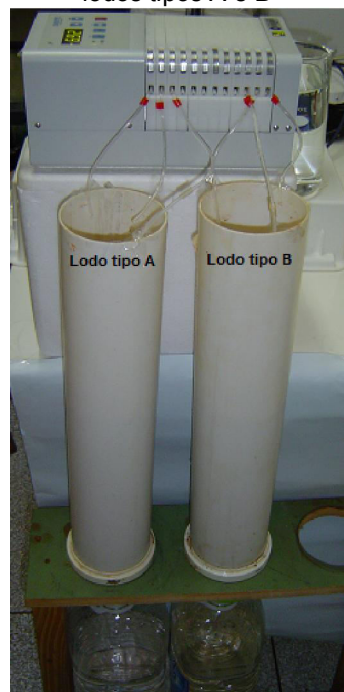
A Figura 24 e Figura 25 mostram um esquema e a foto do ensaio em colunas de lixiviação, respectivamente.

Figura 24 - Esquema do ensaio de lixiviação dos lodos tipos A e B



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 25 - Foto do ensaio de lixiviação dos lodos tipos A e B



Fonte: Do Autor (2012)

Todo o líquido / lodo lixiviado das colunas foi coletado diariamente em recipientes de 5 L, e reservados para posterior constituição das amostras compostas. As amostras compostas dos lixiviados foram caracterizadas quanto aos parâmetros físicos e químicos apresentados na Tabela 10, seguindo procedimentos da APHA, AWWA e WEF (2005) com adaptações. As análises para quantificação dos metais foram realizadas por um laboratório credenciado por prestação de serviço.

Tabela 10 - Parâmetros e métodos / equipamentos utilizados na caracterização dos líquidos drenados das colunas de lixiviação

Parâmetro	Método
Turbidez (uT)	Nefelométrico – 2130 B
Cor aparente (uH)	Espectrofotométrico 2120 C
pH	Potenciométrico – 4500
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO <sub>5d, 20°C</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	Teste DBO 5 dias a 20°C – 5210
Demanda Química de Oxigênio DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	Refluxo fechado / 5220 D
Série de sólidos (mg.L <sup>-1</sup> )	Sólidos secos a 103-105°C; Sólidos voláteis incinerados a 550°C - 2540
Alúminio, Cádmio, Cálcio, Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Fósforo, Magnésio, Manganês, Níquel, Potássio, Silício, Sódio, Titânio, Zinco Totais (mg.L <sup>-1</sup> )	ICP-OES Plasma/ 3125

#### 4.5.2 Classificação dos lodos de ETAs segundo a NBR 10.004 / 04

A NBR 10.004 (2004) classifica os lodos provenientes do sistema de tratamento de água, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível, como resíduos sólidos.

Para efeitos dessa norma, os resíduos sólidos são classificados em:

- Resíduos Classe I – Perigosos: resíduos que apresentem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e / ou patogenicidade.
- Resíduos Classe II A – Não inertes: aqueles resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos perigosos ou inertes. Podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos Classe II B – Inertes: quaisquer resíduos que quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme a NBR 10.006 (2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção do aspecto cor, turbidez, dureza..

Segundo a NBR 10.004 (2004) a classificação dos resíduos sólidos envolve a identificação dos processos ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com a listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

Para classificação dos lodos tipos A e B, as amostras de lodos desidratadas com teor de sólidos na faixa de 80%, foram enviadas a um laboratório credenciado e contratado para realizar os ensaios de lixiviação e solubilização, conforme estabelecido pela NBR 10.004 (2004).

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados de acordo com as NBRs 10.005 e 10.006 (ABNT, 2004), respectivamente. As análises dos parâmetros nos extratos lixiviados e solubilizados foram realizadas de acordo com a metodologias descritas em APHA, AWWA e WEF (2005).

Após o ensaio de lixiviação, para classificação do resíduo os resultados obtidos para cada parâmetro analisado foram comparados com os limites máximos nos extratos lixiviados estabelecidos no Anexo F da NBR 10.004 (2004).

A NBR 10.006 (ABNT, 2004) fixa os requisitos exigíveis para obtenção do extrato de solubilização de resíduos sólidos visando diferenciar os resíduos classificados na NBR 10.004 como classe II A – Não inertes – e classe II B – Inertes. Os resultados obtidos para cada parâmetro analisado foram comparados com os limites máximos no extrato solubilizado, estabelecidos no Anexo G da NBR 10.004 (2004).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de desaguamento em escala reduzida – Etapa I e em escala piloto – Etapa II. Os resultados relacionados a avaliação da influência da execução de sucessivos desaguamentos na manta geotêxtil, bem como, os resultados dos estudos realizados visando a disposição final da torta de lodo desidratada em aterros sanitários.

### **5.1 ETAPA I – DESAGUAMENTO DE LODO DE DECANTADORES DE ETAs EM PROTÓTIPOS DE ESCALA REDUZIDA**

Inicialmente são apresentados os resultados referentes a caracterização física, química e microbiológica dos lodos de estudo utilizados nos ensaios de desaguamento em escala reduzida – Etapa I, e na sequência, os resultados referentes às fases de drenagem e de secagem.

#### **5.1.1 Caracterização dos lodos de estudo utilizados nos protótipos em escala reduzida**

Segundo Di Bernardo & Dantas (2005) as características dos lodos de decantadores são bastante particulares e variáveis em função das características da água bruta, dos produtos químicos utilizados, processos de tratamento adotados e métodos de limpeza dos decantadores. Na Tabela 11 estão mostrados os resultados da caracterização física, química e microbiológica dos lodos de estudo coletados no mês de abril. Pode-se verificar que os lodos tipos A e B apresentaram diferenças em suas características, o que pode ser justificado principalmente pelas propriedades do coagulante e pelas características da água bruta utilizada nas duas ETAs.

Tabela 11 – Características físicas, químicas e microbiológicas dos lodos de estudo utilizadas nos ensaios em escala reduzida – Etapa I e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para enquadramento em corpos de água doce Classes I e II

Parâmetro	Lodo tipo A	Lodo tipo B	Classe I	Classe II
Turbidez (uT)	20.000	18.000	100	40
Cor aparente (uH)	63.460	55.117	--	--
Cor verdadeira (uH)	75,8	50,6	Nível de cor natural do corpo de água	75
ST (mg.L <sup>-1</sup> )	15.658	16.920	--	--
SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	4318	3312	500	500
DBO <sub>5d, 20°C</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	77,3	49,8	3	5
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	1587,9	2781,6	--	--
Coliformes Totais (NMP/100mL)	4,5E+05	3,5E+05	--	--
<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)	776	6510	200	1.000

Segundo Fontana (2004) e Reali (1999), a concentração de sólidos varia bastante de um sistema para outro podendo alcançar teores de sólidos totais de até 3%, no entanto na maioria dos casos de descargas completas de decantadores, esse teor se encontra abaixo de 1%. Os lodos em estudo apresentaram teor de sólidos totais em conformidade com os valores citados, de 1,5 e 1,6% para os lodos tipos A e B, respectivamente. Os elevados teores de sólidos totais - ST nos lodos podem ser justificados pelo método de limpeza (manual) e periodicidade das limpezas dos decantadores na ETAs.

Embora o lodo tipo B seja proveniente do tratamento de um manancial que contém material orgânico em maior quantidade – Rio Tibagi, os resultados de DBO, DQO e cor verdadeira obtidos para os lodos tipos A e B não corresponderam a essa indicação. Esse fato pode ser justificado pela época em que foi realizada a coleta de lodo – mês de abril, uma vez que os eventos de florações de microalgas e cianobactérias que ocorrem no manancial são observados nos meses de estiagem – entre setembro e outubro.

Segundo Reali (1999) as características analisadas nos lodos em estudo apresentadas na Tabela 11, são influenciadas principalmente pelas características do manancial, não sofrendo influência significativa dos produtos químicos utilizados na ETA.

A Resolução 357/05 do Conama dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece, no capítulo III, as condições de enquadramento baseado na qualidade das águas. Na Tabela 11 são apresentados valores limites máximos permitidos para cada parâmetro analisado, em corpos de água doce

Classe I e II. É observado que os parâmetros analisados nos lodos em estudo apresentaram-se acima do limite aceitável pela legislação. Portanto, sem dúvida, o lançamento desses lodos *in natura* em corpos de água doce Classe I e II com as características apresentadas, acarretaria impactos negativos ao corpo receptor, especialmente em relação à turbidez, sólidos dissolvidos totais, DBO e contagem de *E.Coli*. O que comprova a necessidade de um tratamento prévio ao descarte no corpo hídrico.

O valor reduzido de contagem de *E.Coli* encontrado no lodo tipo A deve-se provavelmente, ao emprego da pré-cloração da água na ETA. Esta informação foi obtida após consulta direta ao gerente de produção da ETA.

### 5.1.2 Fase de drenagem / Escala reduzida

A Tabela 12 mostra as porcentagens de volume de lodos drenados tipos A e B que atenderam às condições I, II e III estabelecidas no item 4.3 em relação ao volume total de água drenada durante o ensaio de desaguamento.

Tabela 12 – Porcentagens de volume de drenado que atenderam a cada condição na escala reduzida

	Condição I (<40 uT)	Condição II (<100 uT)	Condição III (<10 uT)
Lodo tipo A	78%	80%	76%
Lodo tipo B	91%	91%	89%

No Gráfico 3 e no Gráfico 4 são apresentados os gráficos típicos dos resultados da fase de drenagem dos lodos tipos A e B.



De acordo com o Gráfico 3 e Gráfico 4 foram observadas algumas particularidades nas fases de drenagem dos lodos tipos A e B, mostradas na Tabela 13.

Tabela 13 – Observações da fase de drenagem dos lodos tipos A e B / escala reduzida – Etapa I

Observações	Lodo tipo	
	A	Lodo tipo B
Tempo requerido para extinção da lâmina líquida (h)	41	43
Redução do volume total de lodo aplicado (%)	94	94
Tempo requerido para produção de água drenada com turbidez $\leq 100$ uT (min)	29	14
Tempo requerido para produção de água drenada com turbidez $\leq 40$ uT (min)	37	14
Tempo requerido para produção de água drenada com turbidez $\leq 10$ uT (min)	48	22
Valor de turbidez da água drenada ao final do desaguamento (uT)	0,7	0,5
Valor de cor aparente da água drenada ao final do desaguamento (uH)	40	30

A Figura 26 e Figura 27 mostram as fotos dos lodos drenados tipos A e B, dispostos por ordem de coleta durante a drenagem, de onde pode-se observar a melhoria na qualidade dos drenados com o passar do tempo.

Figura 26 - Frascos de drenados coletados durante a drenagem do lodo tipo A



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 27- Frascos de drenados coletados durante a drenagem do lodo tipo B



Fonte: Do Autor (2012)

Nota-se que para o lodo tipo B, a qualidade do drenado é melhorada logo no início das coletas, uma vez que, de um total de 25 frascos, apenas nas três primeiras coletas, a água drenada apresentou cor e turbidez elevada, corroborando as observações da Tabela 13. Consequentemente, as porcentagens de volume de drenado que atenderam às condições de enquadramento I e II e de reaproveitamento III para o lodo tipo B foram da ordem de 89-91%, superiores às obtidas para o lodo tipo A, da ordem de 76-80%, conforme apresentado na Tabela 12.

Conforme apresentado no item 4.3, foram constituídas amostras compostas dos drenados tipos A e B para cada condição de enquadramento – ACD I e II condição de reaproveitamento – ACD III e condição global de produção – ACD IV. Posteriormente, procedeu-se a caracterização física, química e microbiológica dessas amostras a fim de avaliar possíveis riscos à saúde e impactos ao meio ambiente, considerando o seu lançamento em corpos hídricos Classe I e II.

O Gráfico 5 e Gráfico 6 mostram os resultados em relação às análises de turbidez, cor verdadeira, sólidos dissolvidos totais, DBO, DQO, coliformes totais e *E.Coli* dos lodos iniciais e das amostras compostas dos drenados dos lodos tipos A e B, respectivamente.

Gráfico 5 - Resultados da caracterização do lodo inicial tipo A e amostras compostas dos drenados – ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala reduzida

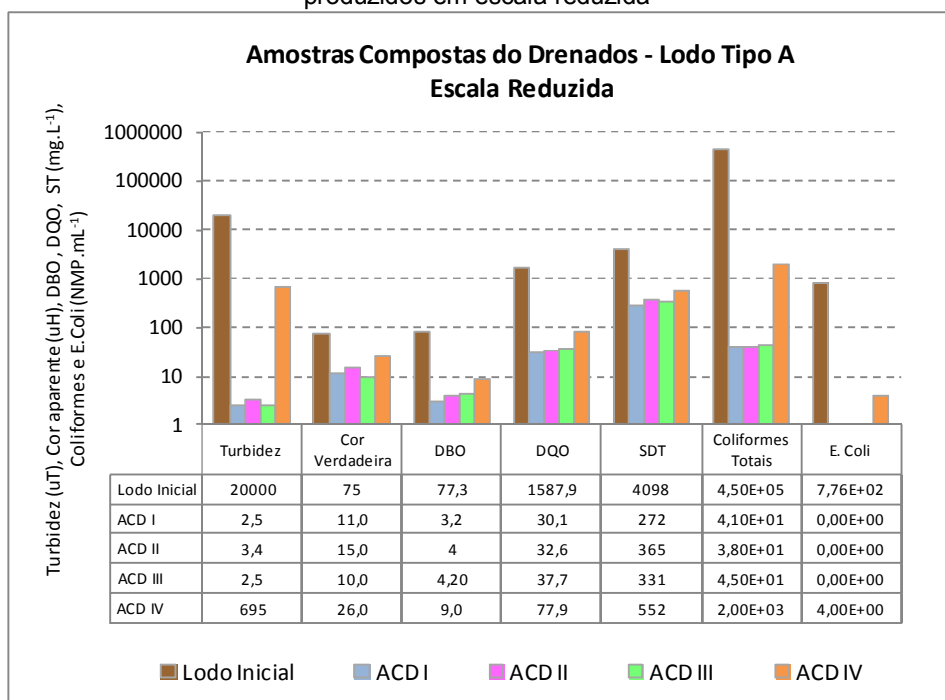
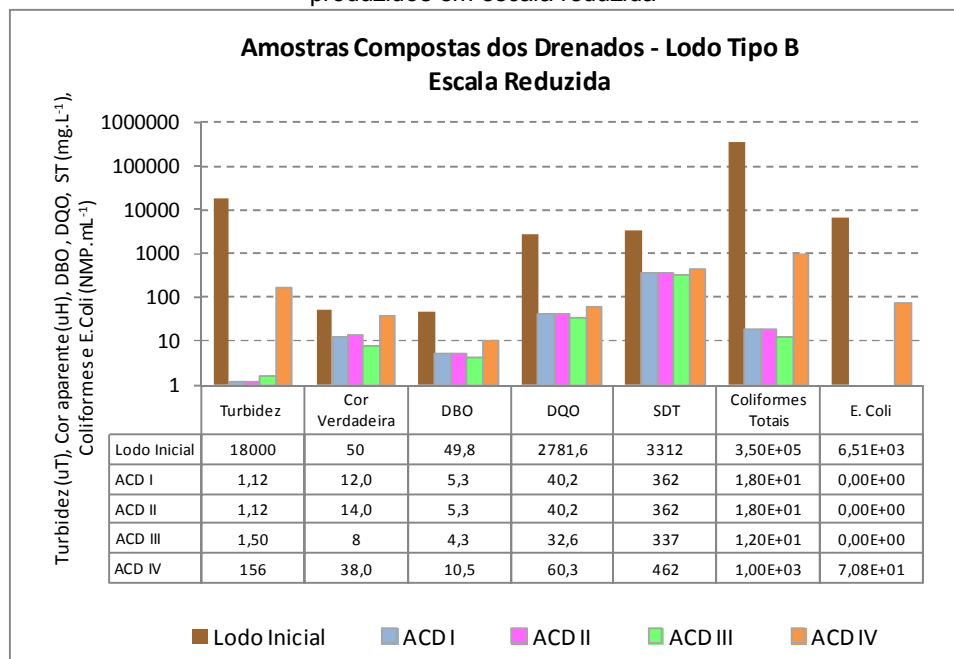


Gráfico 6 - Resultados da caracterização do lodo inicial tipo B e amostras compostas dos drenados – ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala reduzida



A Resolução 357/05 do Conama estabelece que corpos de água doce classe II devem apresentar cor verdadeira inferior a 75 uH e corpos de água doce classe I devem apresentar cor natural (Tabela 11). Como pode ser observado, os lodos iniciais tipos A e B apresentaram valores de cor verdadeira de 75 e 50 uH, respectivamente, e portanto, em conformidade com os valores limites da Resolução 357/05 do Conama.

A Legislação Estadual SEMA/07 do IAP – Instituto Ambiental do Paraná estabelece o limite de DQO de 125 mg.L<sup>-1</sup> como padrão de lançamento em corpos de água doce classes I e II. Todas as amostras compostas dos drenados dos lodos tipos A e B atendem a esse limite.

O limite de DBO estabelecido pela Resolução 357/05 do Conama para rios classe I é de 3 mg.L<sup>-1</sup> e para rios classe II é de 5 mg.L<sup>-1</sup>. Todas as amostras compostas dos lodos drenados tipos A e B referentes as condições I, II e III apresentaram valores da mesma ordem de grandeza (entre 3 e 5 mg.L<sup>-1</sup>), podendo-se considerar relativamente aceitáveis.

Os valores de SDT em todas as amostras compostas dos drenados dos lodos tipos A e B apresentaram-se abaixo do limite estabelecido para SDT pela Resolução 357/05 do Conama de 500 mg.L<sup>-1</sup>, com exceção da ACD IV do lodo tipo A

que apresentou valor de  $550 \text{ mg.L}^{-1}$ , porém este valor que pode ser considerado aceitável.

A Resolução 357/05 do Conama não menciona o limite aceitável para coliformes totais, e estabelece os valores de 200 e 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mL de amostra, para corpos de água classe I e II, respectivamente. Foi observado que todas as amostras compostos dos lodos drenados tipos A e B atenderam aos limites estabelecidos pela referida resolução.

Vale ressaltar que as condições estabelecidas neste trabalho estão relacionadas às condições de enquadramento do corpo de água doce e não de lançamento de efluentes. Assim, a análise dos resultados de qualidade da água drenada em relação às condições estabelecidas constitui uma situação desfavorável de atendimento, uma vez que o fator de diluição não foi considerado nas análises e discussões.

### **5.1.3 Fase de secagem / Escala reduzida**

#### **5.1.3.1 Fase de secagem na condição de verão**

O teor de sólidos totais inicial nas tortas de lodo tipos A e B utilizadas durante a secagem na condição controlada de verão foram de 15,3% e 14,1%, respectivamente. Nas tortas de lodo utilizadas durante a secagem na condição natural de verão os teores de sólidos foram 15,7% no lodo tipo A e 13,9% no lodo tipo B.

A Figura 28 e Figura 29 mostram fotos dos lodos retidos na manta ao final da fase de drenagem. É possível observar uma diferença na coloração dos lodos, ocasionada principalmente pelas características do manancial e pelo coagulante utilizado no tratamento de água nas ETAs.

Figura 28 – Torta de lodo tipo A logo após a fase de drenagem (ST 15,7%)



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 29 – Torta de lodo tipo B logo após a fase de drenagem (ST 13,9%)



Fonte: Do Autor (2012)

O método operacional do sistema proposto pressupõe que a duração total das fases de drenagem e secagem varie entre 7 e 15 dias, visando atender uma condição de demanda operacional crítica, passível de aplicação em ETAs de pequeno porte. Portanto, como a fase de drenagem dos lodos tipos A e B tiveram duração de aproximadamente 2 dias (41 e 43 h), a duração da fase de secagem foi limitada entre 5 e 13 dias.

O Gráfico 7 e Gráfico 8 mostram os resultados da fase de secagem obtidos na simulação da condição controlada de verão para os lodos tipos A e B, respectivamente.

Gráfico 7 - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo A na condição controlada de verão

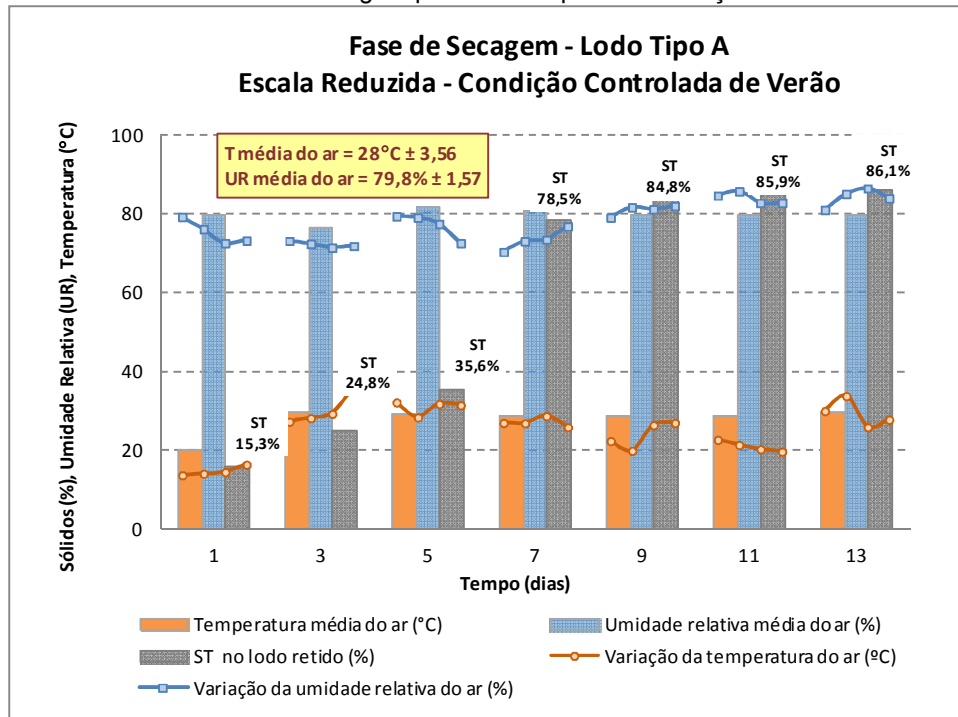
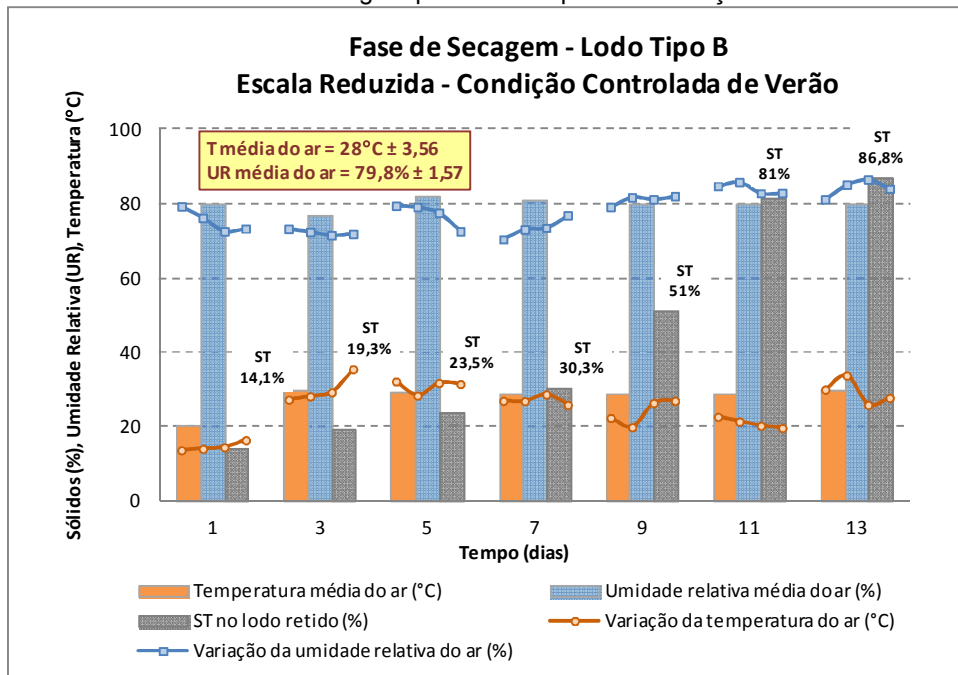


Gráfico 8 - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo B na condição controlada de verão



Assim, na condição controlada de verão, pôde-se observar que:

- Após 5 dias de exposição, com temperatura média -  $T$   $26,5^{\circ}\text{C} \pm 5,6$  e umidade relativa média -  $UR$   $79,4\% \pm 2,59$ , o teor de sólidos totais -  $ST$  final foi de  $35,6\%$  e  $23,5\%$  para os lodos tipos A e B, respectivamente;

- Após 13 dias de exposição com temperatura média -  $T 28\text{ °C} \pm 3,56$  e umidade relativa média -  $UR 79,8\% \pm 1,57$ , o teor de sólidos totais - ST final foi de 86,1% e 86,8% para os lodos tipos A e B, respectivamente.

No Gráfico 9 e Gráfico 10 são apresentados os resultados da secagem dos lodos tipos A e B na condição natural de verão.

Gráfico 9 - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo A na condição natural de verão

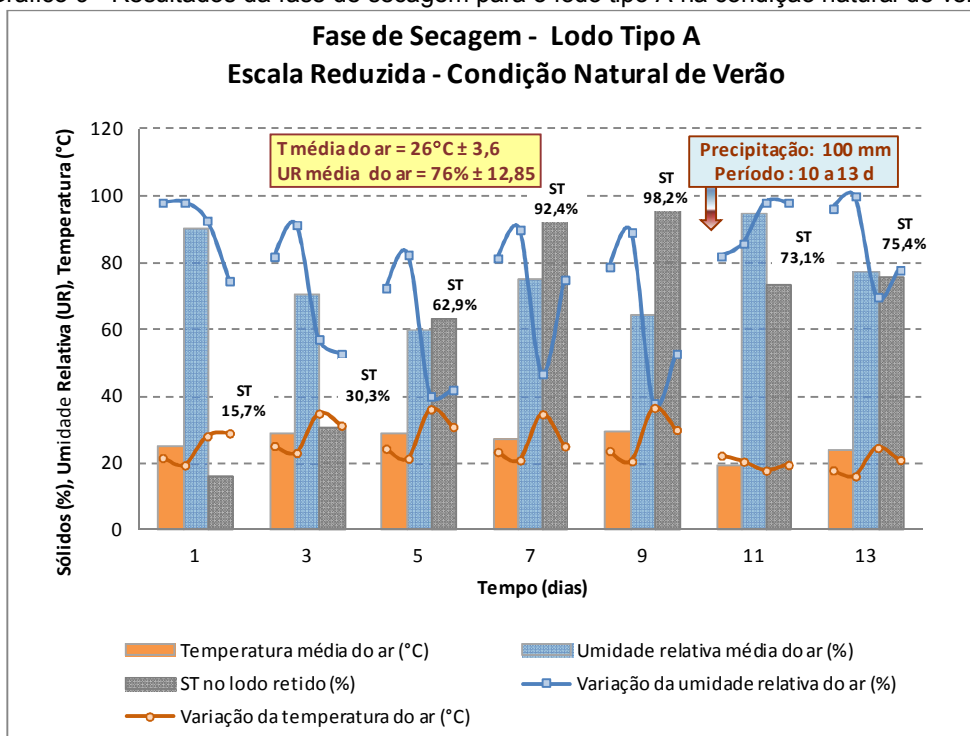
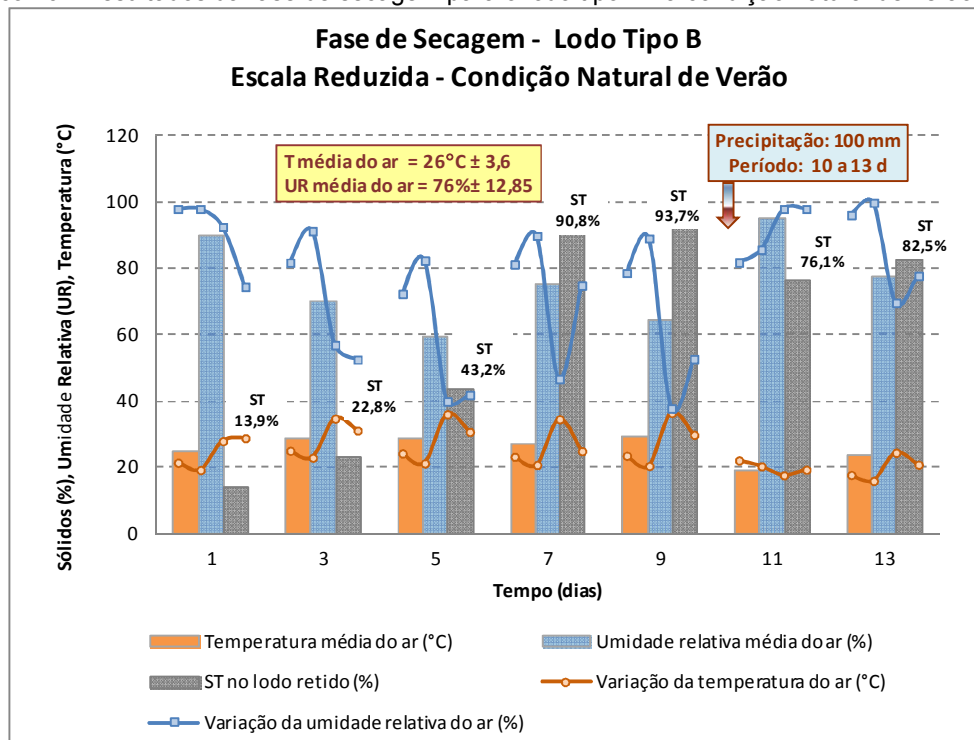


Gráfico 10 - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo B na condição natural de verão



Assim, na condição natural de verão, pôde-se observar que:

- Após 5 dias de exposição com temperatura média -  $T 27,3^{\circ}\text{C} \pm 2,06$  e umidade relativa média -  $UR 73,2\% \pm 15,41$ , o teor de ST foi de 62,9% e 43,2% para os lodos tipos A e B, respectivamente;
- Após 13 dias de exposição com temperatura média -  $T 25,9^{\circ}\text{C} \pm 3,6$  e umidade relativa média -  $UR 75,9\% \pm 12,9$ , o teor de ST foi de 75,4% e 82,5% para os lodos tipos A e B, respectivamente.

No 10º ao 13º dia de secagem na condição natural de verão houve a ocorrência de precipitação intensa, com conseqüente redução da temperatura e aumento da umidade relativa do ar. Essa mudança proporcionou a redução no teor de sólidos nos lodos, ocasionada principalmente pela incorporação da água da chuva nas tortas expostas, chegando a valores da ordem de 73% para o lodo tipo A e 76% para o lodo tipo B, sem no entanto, prejudicar seu manejo e disposição final.

Com esses resultados, pôde-se constatar que além da temperatura e umidade do ar, outros fatores climáticos e físicos contribuíram de forma significativa para a secagem do lodo na condição natural de verão, uma vez que apesar das variações de temperatura e principalmente de umidade serem menores ao longo de

24h do dia – condição que favorece a secagem, a ausência de vento e radiação solar por exemplo, contribuíram para que os teores de ST resultassem menores que os obtidos na condição natural.

Em relação à secagem de verão, pôde-se constatar que após 5 dias, independentemente do tipo de exposição, controlada ou natural, o lodo retido apresentou teores de ST da ordem de 25 a 30%, com características compatíveis para seu manejo e disposição final, uma vez que este, pôde ser retirado da manta com relativa facilidade, possibilitando assim, a finalização do desaguamento do lodo em 7 dias. As Figuras 30 e 31 mostram os aspectos das tortas de lodo tipos A e B durante a fase de secagem na condição natural de verão.

Figura 30 – Fotos da torta de lodo tipo A retida na manta logo após a fase de drenagem e após 3, 5 e 13 dias de secagem em condição natural de verão

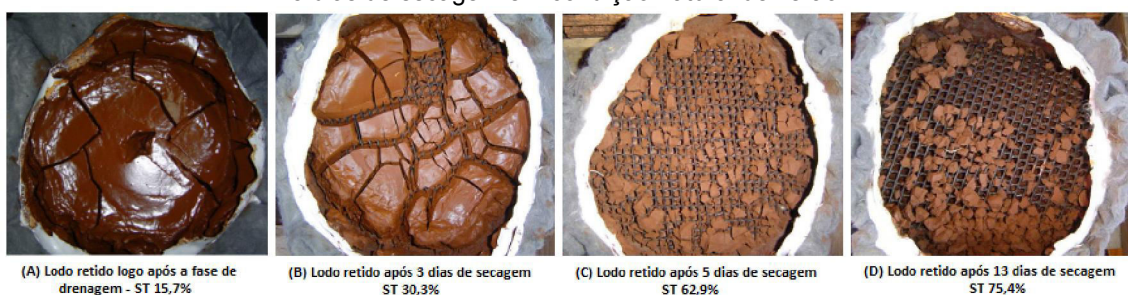


Figura 31 – Fotos da torta de lodo tipo B retida na manta logo após a fase de drenagem e após 3, 5 e 13 dias de secagem em condição natural de verão



### 5.1.3.2 Fase de secagem na condição de inverno

Para avaliar a evolução da secagem das tortas de lodo na condição de inverno realizou-se desaguamentos com os mesmos parâmetros de projeto aplicados nos desaguamentos anteriores (Tabela 8).

Os teores de ST nas tortas de lodo tipos A e B utilizadas durante a secagem na condição controlada de inverno foram de 14,8% e 14,1%,

respectivamente. Nas tortas de lodo utilizadas durante a secagem na condição natural de inverno os teores de sólidos foram 12,9% no lodo tipo A e 11,2% no lodo tipo B.

O Gráfico 11 e Gráfico 12 mostram os resultados da secagem dos lodos tipos A e B na condição controlada de inverno, e o Gráfico 13 e Gráfico 14, na condição natural de inverno, durante 13 dias de monitoramento.

Gráfico 11 - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo A na condição controlada de inverno

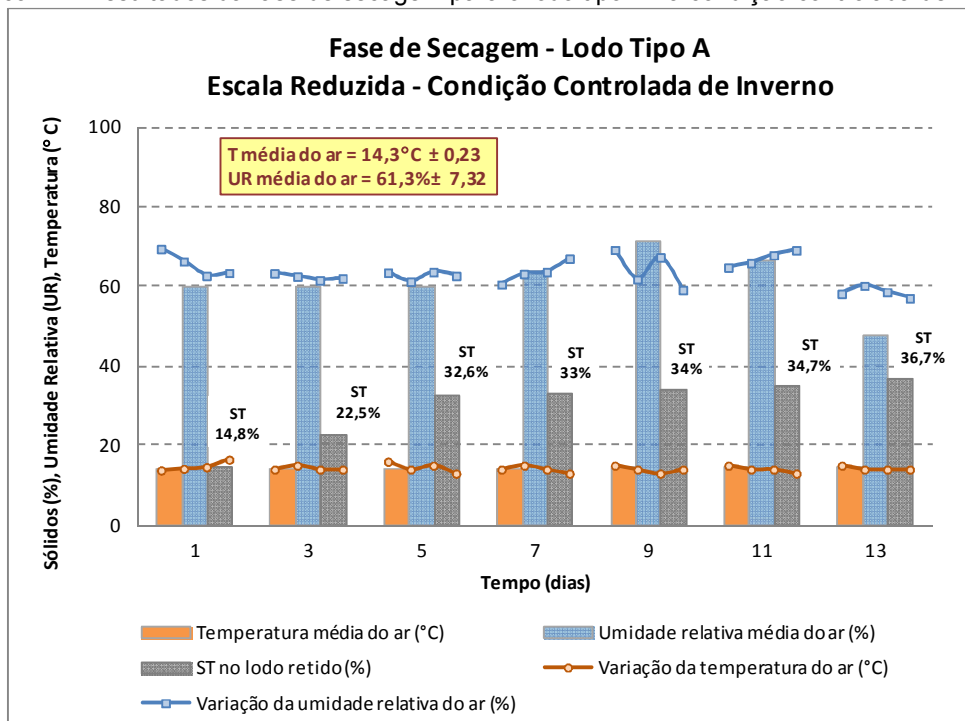
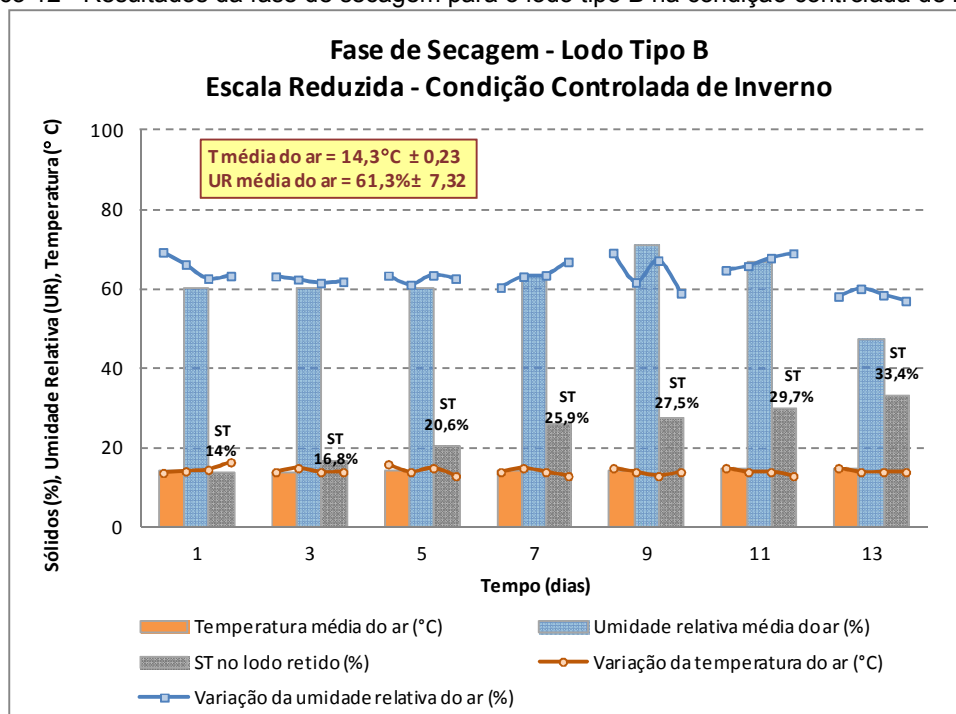


Gráfico 12 - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo B na condição controlada de inverno



Assim, na condição controlada de inverno, pôde-se observar que:

- Após 5 dias de exposição, com temperatura média -  $T 14,1 \text{ °C} \pm 0,17$  e umidade relativa média -  $UR 60\% \pm 0,05$ , o teor de sólidos totais - ST final foi de 32,6% e 20,6% para os lodos tipos A e B, respectivamente;
- Após 13 dias de exposição com temperatura média -  $T 14,3 \text{ °C} \pm 0,23$  e umidade relativa média -  $UR 61,3\% \pm 7,32$ , o teor de sólidos totais - ST final foi de 36,7% e 33,4% para os lodos tipos A e B, respectivamente.

Comparando o ST ao 5º dia e ao 13º dia, observa-se um aumento pouco significativo, constando-se que a ocorrência constante de baixas temperaturas limita a secagem da torta de lodo.

Gráfico 13 - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo A na condição natural de Inverno

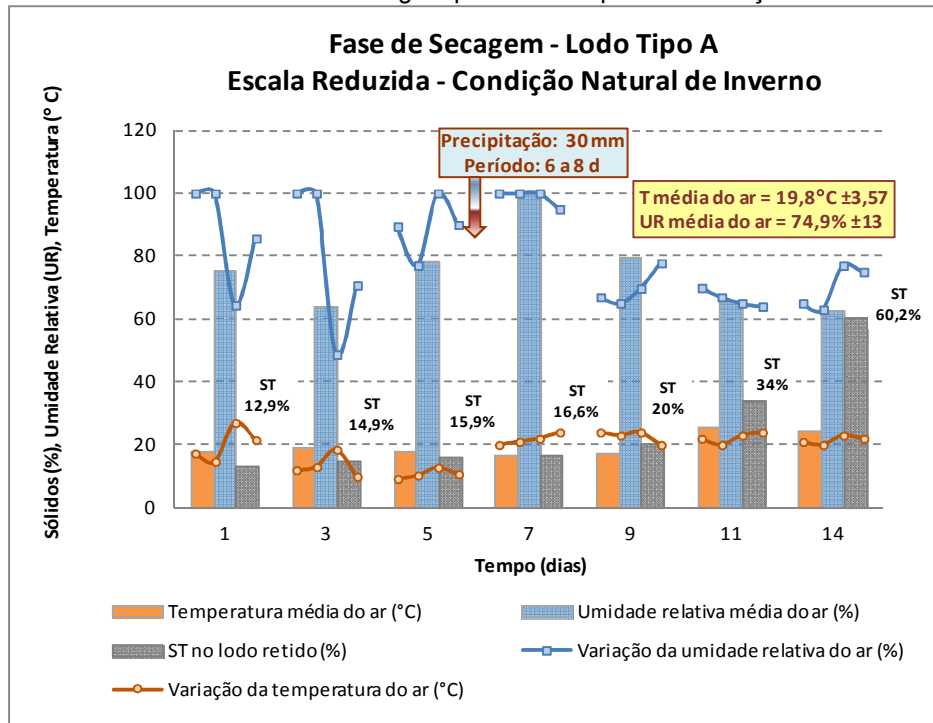
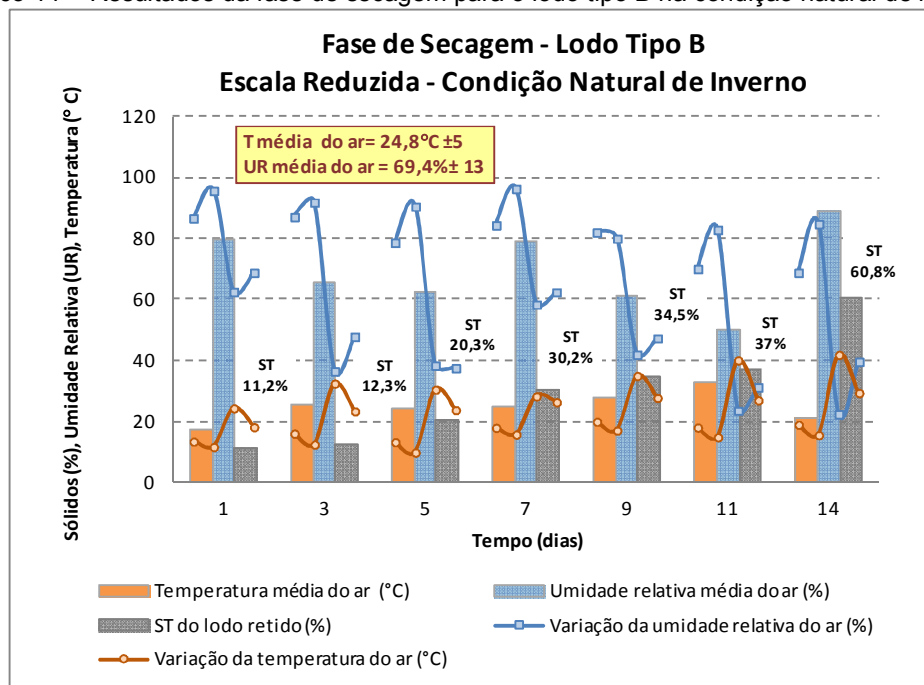


Gráfico 14 - Resultados da fase de secagem para o lodo tipo B na condição natural de inverno



Assim, na condição natural de inverno, pôde-se observar que:

- Após 5 dias de exposição, o lodo tipo A exposto a temperatura média – T 18,2°C ± 0,87 e umidade relativa média – UR 72% ± 7,3 apresentou teor de sólidos totais

- ST final de 15,9% e no lodo tipo B exposto a temperatura média – T  $22,3^{\circ}\text{C} \pm 4,42$  e umidade relativa média – UR  $69,1\% \pm 9,05$ , o teor de sólidos totais - ST final foi 20,3%;
- Após 13 dias de exposição, o teor de sólidos totais – ST final no lodo tipo A exposto a temperatura média – T  $19,8^{\circ}\text{C} \pm 3,57$  e umidade relativa média – UR  $74,9\% \pm 13,05$  foi de 60,2% e no lodo tipo B exposto a temperatura média – T  $24,83^{\circ}\text{C} \pm 5$  e umidade relativa média – UR  $69,46\% \pm 13,38$ , o teor de sólidos totais - ST foi 60,8%.

Entre o 6º e 8º dia de exposição na condição natural da torta de lodo tipo A houve precipitação de aproximadamente 30 mm, o que desfavoreceu a secagem nesse período. Fontana (2004) relata que a ocorrência de precipitação antes da “abertura” da massa de lodo é potencialmente prejudicial na secagem do lodo. No entanto, foi observado que após o 10º dia, com aumento da temperatura do ar e ausência de precipitação a secagem do lodo foi acelerada, de forma que no 14º dia o teor de sólidos foi de 60%, como mostra o Gráfico 13.

A exposição às condições de inverno resultaram em teores de ST inferiores aos obtidos nas condições de verão, mesmo para as tortas submetidas à exposição natural, indicando que nessa estação, os efeitos de fatores climáticos e físicos são minimizados, podendo em algumas situações, requerer um tempo superior a 5 dias para secagem adequada. Por outro lado, os valores de ST obtidos podem ser considerados relativamente satisfatórios, uma vez que Mendes (2001) ao final do desaguamento mecânico em filtro prensa obteve valores de teor de ST que variaram de 21% a 32%.

A Figura 32 a Figura 35 mostram as tortas de lodos tipos A e B retidos nas mantas após 5 dias de secagem nas condições controladas de verão e inverno. Em ambas as condições nota-se considerável redução do volume de lodo, quando comparados ao final da fase de drenagem (Figura 28 e Figura 29), com destaque à maior redução de volume durante a exposição na condição de verão.

Figura 32 – Torta de lodo tipo A após 5 dias de secagem na condição controlada de verão (ST 35,6%)



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 33 – Torta de lodo tipo B após 5 dias de secagem na condição controlada de verão (ST 23,5%)



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 34 - Torta de lodo tipo A após 5 dias de secagem na condição controlada de inverno (ST 32,6%)



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 35 -Torta de lodo tipo B após 5 dias de secagem na condição controlada de inverno (ST 20,3%)



Fonte: Do Autor (2012)

Na Tabela 14 são apresentados de forma resumida as temperaturas e umidades relativas médias após 5 e 13 dias de secagem para as condições controladas e naturais de verão e inverno, com respectivos teores de sólidos obtidos, para os lodos tipos A e B.

Tabela 14 – Resultados da fase de secagem nas condições controladas e naturais de verão e inverno dos lodos tipos A e B

Condições	Lodo Tipo A					
	5º dia			13º dia		
	T <sub>média</sub> (°C)	UR <sub>média</sub> (%)	ST (%)	T <sub>média</sub> (°C)	UR <sub>média</sub> (%)	ST (%)
Controlada Verão	26,5 ± 5,6	79,4 ± 2,6	35,6	28 ± 3,6	79,8 ± 1,6	86,1
Natural Verão	27,3 ± 2,1	73,7 ± 15,4	62,9	25,9 ± 3,6	75,9 ± 12,8	75,4
Controlada Inverno	14,1 ± 0,2	60 ± 0,05	32,6	14,3 ± 0,2	61,3 ± 7,3	36,2
Natural Inverno	18,2 ± 0,9	72 ± 7,3	15,9	19,8 ± 3,6	79,5 ± 13,0	60,2
Condições	Lodo Tipo B					
	5º dia			13º dia		
	T <sub>média</sub> (°C)	UR <sub>média</sub> (%)	ST (%)	T <sub>média</sub> (°C)	UR <sub>média</sub> (%)	ST (%)
Controlada Verão	26,47 ± 5,6	79,4 ± 2,6	23,5	28 ± 3,6	79,8 ± 1,6	86,8
Natural Verão	27,3 ± 2,0	73,7 ± 15,4	43,2	25,9 ± 3,6	75,9 ± 12,8	82,5
Controlada Inverno	14,1 ± 0,2	60 ± 0,05	20,6	14,3 ± 0,2	61,3 ± 7,3	33,4
Natural Inverno	22,3 ± 4,4	69,1 ± 9,1	20,3	24,8 ± 5	69,4 ± 13,4	60,8

## 5.2 ETAPA II - DESAGUAMENTO DE LODO DE DECANTADORES DE ETAS EM PROTÓTIPOS EM ESCALA PILOTO

Inicialmente são apresentadas os resultados referentes à caracterização física, química e microbiológica dos lodos de estudo tipos A e B utilizados nos ensaios de desaguamento em escala piloto – Etapa II, e em seguida, os resultados referentes as fases de drenagem e de secagem dos ensaios de desaguamento.

Conforme já apresentado, a fase de secagem do experimento em escala piloto – Etapa II foi realizada para a condição crítica de exposição - condição natural de inverno, desprotegida da ação de intempéries.

### 5.2.1 Caracterização dos lodos de estudo utilizados na escala piloto

Na Tabela 15 e Tabela 16 são mostradas as características físicas, químicas e microbiológicas dos lodos tipos A e B, coletados nos meses de junho e julho, respectivamente.

Foi observado que os lodos apresentam algumas diferenças que são justificáveis, segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011) principalmente em função da qualidade da água bruta e produtos químicos aplicados na coagulação química.

Tabela 15 – Características do lodo tipo A utilizado na escala piloto e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água doce Classe I e II

Parâmetro	Fração total	Fração dissolvida	Classe I	Classe II
Turbidez (uT)	10.136	N.A	100	40
Cor aparente (uH)	50.700	N.A	--	--
Cor verdadeira (uH)	76	N.A	Nível de cor natural	75
DBO <sub>5d, 20°C</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	44,2	N.A	3	5
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	814,5	N.A	--	--
ST (mg.L <sup>-1</sup> )	9.150	N.A	--	--
SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	2070	N.A	500	500
Coliformes Totais (NMP/100mL)	3,2 E+09	N.A	--	--
<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)	2,E+04	N.A	200	1.000
Alúminio (mg.L <sup>-1</sup> )	237,6	0,05	0,1 *	0,1 *
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	< L.Q	N.D	0,001	0,001
Cálcio (mg.L <sup>-1</sup> )	23,18	10,65	--	--
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,41	N.D	0,01	0,01
Cobalto (mg.L <sup>-1</sup> )	0,22	N.D	0,05	0,05
Cobre (mg.L <sup>-1</sup> )	1,29	0,031	0,009 *	0,009 *
Cromo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,34	N.D	0,05	0,05
Ferro(mg.L <sup>-1</sup> )	545,60	N.D	0,3 *	0,3 *
Fósforo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,66	N.D	0,02	0,03
Magnésio (mg.L <sup>-1</sup> )	7,12	3,29	--	--
Manganês (mg.L <sup>-1</sup> )	13,71	N.D	0,1	0,1
Níquel (mg.L <sup>-1</sup> )	0,094	N.D	0,025	0,025
Potássio (mg.L <sup>-1</sup> )	1,0	0,70	--	--
Silício (mg.L <sup>-1</sup> )	58,15	6,97	--	--
Sódio (mg.L <sup>-1</sup> )	4,3	2,10	--	--
Titânio (mg.L <sup>-1</sup> )	14,88	0,003	--	--
Zinco (mg.L <sup>-1</sup> )	0,42	N.D	0,18	0,18

Fração dissolvida - lodo filtrado em membrana de fibra de vidro de 0,45 µm

<L.Q – Abaixo do limite de quantificação

N.D – Não detectado

N.A – Não analisado

-- limite não estabelecido pela Resolução

\* valor referente ao composto na forma dissolvida

L.Q Cádmio – 0,002 mg.L<sup>-1</sup>

Tabela 16 – Características dos lodos tipo B utilizado na escala piloto e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água doce Classe I e II

Parâmetro	Fração total	Fração dissolvida	Classe I	Classe II
Turbidez (uT)	19.200	N.A	100	40
Cor aparente (uH)	51.200	N.A	--	--
Cor verdadeira (uH)	50	N.A	Nível de cor natural do corpo de água	75
DBO <sub>5d, 20°C</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	23,4	N.A	3	5
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	2.540	N.A	--	--
ST (mg.L <sup>-1</sup> )	12.790	N.A	--	--
SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	610	N.A	500	500
Coliformes Totais (NMP/100mL)	1,6 E+06	N.A	--	--
<i>E. Coli</i> (NMP/100mL)	3,E+04	N.A	200	1.000
Alúminio (mg.L <sup>-1</sup> )	757,7	0,077	0,1 *	0,1 *
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.D	N.D	0,001	0,001
Cálcio (mg.L <sup>-1</sup> )	16,30	10,88	--	--
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	< L.Q	N.D	0,01	0,01
Cobalto (mg.L <sup>-1</sup> )	0,10	N.D	0,05	0,05
Cobre (mg.L <sup>-1</sup> )	0,60	0,031	0,009 *	0,009 *
Cromo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,24	N.D	0,05	0,05
Ferro(mg.L <sup>-1</sup> )	324,30	N.D	0,3 *	0,3 *
Fósforo (mg.L <sup>-1</sup> )	8,69	N.D	0,02	0,03
Magnésio (mg.L <sup>-1</sup> )	17,20	2,46	--	--
Manganês (mg.L <sup>-1</sup> )	7,72	N.D	0,1	0,1
Níquel (mg.L <sup>-1</sup> )	0,10	N.D	0,025	0,025
Potássio (mg.L <sup>-1</sup> )	9,60	2,40	--	--
Silício (mg.L <sup>-1</sup> )	7,54	1,99	--	--
Sódio (mg.L <sup>-1</sup> )	4,20	4,90	--	--
Titânio (mg.L <sup>-1</sup> )	5,39	N.D	--	--
Zinco (mg.L <sup>-1</sup> )	0,55	N.D	0,18	0,18

Fração dissolvida - lodo filtrado em membrana de fibra de vidro de 0,45 µm

<L.Q – Abaixo do limite de quantificação

N.D – Não detectado

N.A – Não analisado

-- limite não estabelecido pela Resolução

\* valor referente ao composto na forma dissolvida

L.Q.Chumbo – 0,01 mg.L<sup>-1</sup>

Pôde-se observar que de uma maneira geral, os valores dos parâmetros físicos e químicos determinados nos lodos coletados para os ensaios de desaguamento em escala piloto – Etapa II foram da mesma ordem de grandeza e similares aos encontrados nos lodos coletados para os ensaios de desaguamento em escala reduzida – Etapa I.

No entanto, os valores de contagem de coliformes totais e de *E. coli* do lodo tipo A coletado para os ensaios de desaguamento em escala piloto – Etapa II foram significativamente maiores. Essa variação pode ter ocorrido em função da suspensão da aplicação de cloro ou mesmo da variação de sua dosagem na

chegada de água bruta, conforme já constatado nos lodos coletados para os ensaios de desaguamento em escala reduzida.

Os lodos utilizados nos desaguamentos em escala piloto apresentaram valores de turbidez, sólidos dissolvidos totais, DBO, contagem de *E.Coli* e cobre dissolvido superiores aos limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água doce classes I e II.

Sabe-se que parte dos metais nos lodos de ETA podem ser resultantes da adição de coagulantes químicos aplicados no tratamento de água, o que impõe a necessidade do controle de qualidade do produto químico utilizado, bem como a avaliação de possíveis riscos de contaminação.

Nos lodos de estudo, as concentrações de alumínio e ferro total foram de 237 mg.L<sup>-1</sup> e 545 mg.L<sup>-1</sup> no lodo tipo A e 757 mg.L<sup>-1</sup> e 324 mg.L<sup>-1</sup> no lodo tipo B, respectivamente. Esses valores encontram-se dentro da faixa citada por Cordeiro (2001), que relata que a quantidade de ferro e alumínio em três ETAs avaliadas variou de 2,16 a 11.000 mg.L<sup>-1</sup> de alumínio e 214 a 5.000 mg.L<sup>-1</sup> de ferro. No entanto, deve-se ressaltar que a fração de ferro e alumínio dissolvidos nos lodos iniciais tipos A e B, apresentaram-se abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para enquadramento em corpos de água Classes I e II.

Segundo Rocha *et al.* (1991) apud Teixeira (2008), a região do município de Londrina é formada por solo laterítico e composição mineralógica composta em sua maioria por óxidos e hidróxidos de ferro, com elevados teores de ferro e alumínio no material de origem. A pesquisa realizada por Teixeira (2008) mostrou que o solo de Londrina apresenta teores de ferro da ordem de 140 g.kg<sup>-1</sup> e ressaltou que 99% desse valor faz parte da rede cristalina dos minerais, de forma que somente 1% do ferro está na forma livre ou trocável. Assim, além dos coagulantes químicos, o solo da região pode também ter contribuído para os teores de metais, especialmente de ferro e alumínio nos lodos tipos A e B.

Além do ferro e alumínio, foi determinada a presença de metais pesados, como chumbo, cobalto, cobre, cromo, níquel e zinco, especialmente na fração total. Por outro lado, na fração dissolvida, apenas o cobre apresentou valores superiores ao limite estabelecido pela Resolução 357/05 do Conama para enquadramento em corpos de água Classes I e II.

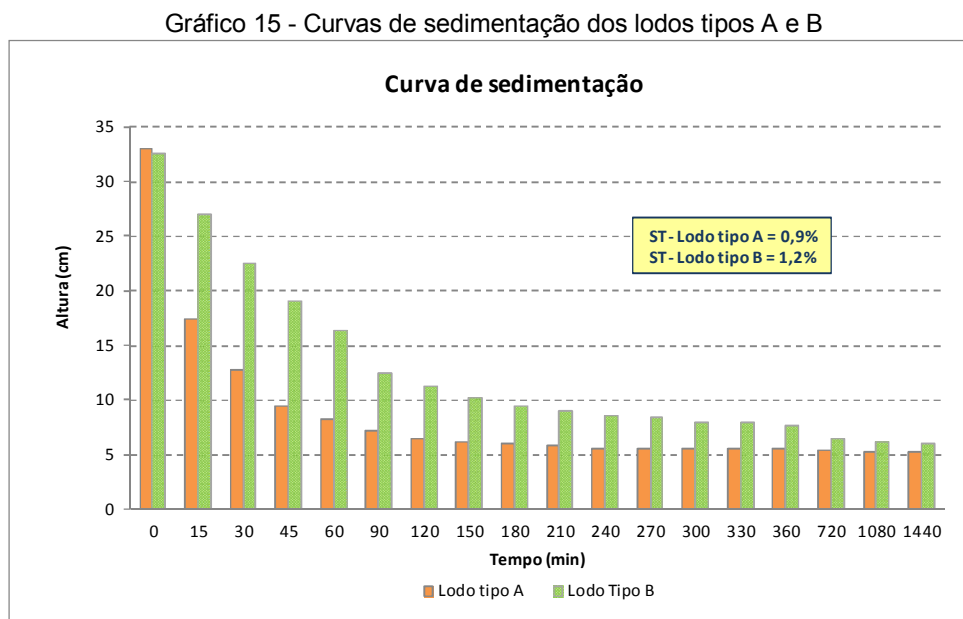
Os resultados da caracterização dos lodos iniciais reforçam a necessidade de se realizar um tratamento prévio ao descarte do mesmo em corpos hídricos receptores, uma vez que o lançamento *in natura* pode trazer grandes impactos à biota aquática, especialmente pela elevada concentração de sólidos totais, turbidez, microrganismos e metais.

### 5.2.1.1 Teste de sedimentabilidade – Ensaios em coluna de sedimentação

O Gráfico 15 apresenta os resultados do teste de sedimentabilidade dos lodos tipos A e B realizado através de ensaios em coluna de sedimentação – provetas de 1L.

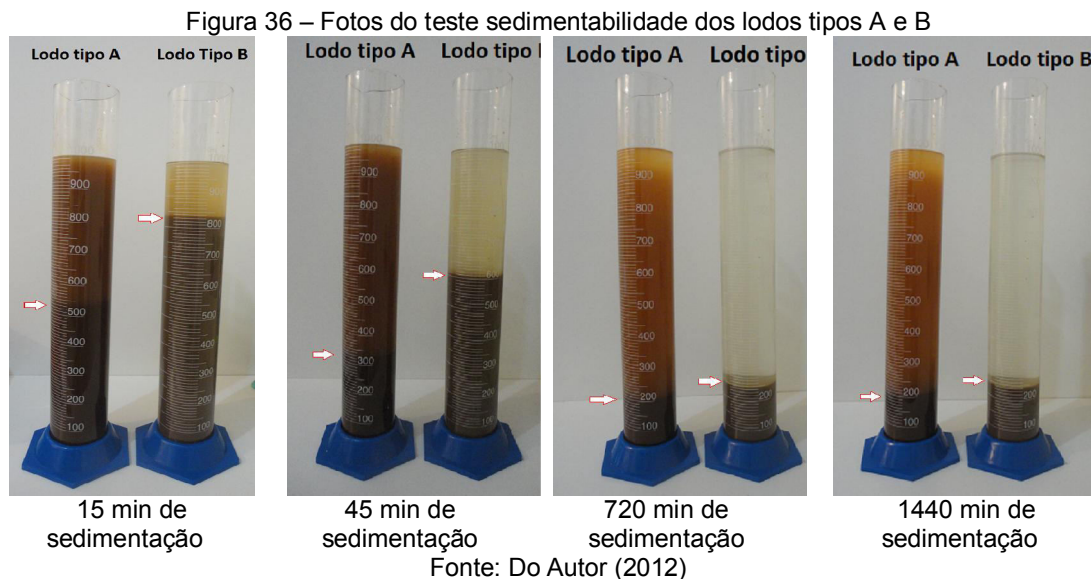
O lodo tipo A apresentou velocidade de sedimentação máxima de  $1,04 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  em um intervalo de 15 min (500 mL). A partir de 45 min (320 mL) sua velocidade de sedimentação foi reduzindo gradativamente, apresentando após 120 min (240 mL) velocidade praticamente estável.

O lodo tipo B apresentou velocidade de sedimentação máxima de  $0,3 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  em um intervalo de 45 min. Com tendência de estabilizar após 240 min de sedimentação.



A Figura 36 mostra as fotos do teste de sedimentabilidade dos lodos tipos A e B nos tempos de 15, 45, 720 e 1440 min. Foi observado que apesar do

lodo tipo B apresentar uma velocidade de sedimentação menor, produz um clarificado de melhor qualidade que o lodo tipo A.



### 5.2.1.2 Teste de resistência específica

O lodo tipo A apresentou resistência específica de  $0,035 \times 10^{12} \text{ m.Kg}^{-1}$ , enquanto o lodo tipo B apresentou resistência específica de  $4,789 \times 10^{12} \text{ m.Kg}^{-1}$ .

Segundo Fontana (2004) quanto maior a resistência específica menor a capacidade de filtração da água. Segundo ASCE & AWWA (1996) lodos com resistência específica superior a  $1 \times 10^{12} \text{ m.Kg}^{-1}$  são considerados de difícil filtração, e inferior a  $1 \times 10^{12} \text{ m.Kg}^{-1}$  são considerados de fácil filtrabilidade.

Dessa forma, pode-se dizer que o lodo tipo A apresentou maior facilidade de filtração quando comparado ao lodo tipo B, resultado comprovado pela diferença de tempo requerido para extinção da lâmina líquida entre os lodos tipos A e B, conforme apresentado no item 5.2.2.

### 5.2.2 Fase de Drenagem / Escala piloto

O Gráfico 16 e Gráfico 17 mostram os resultados obtidos na fase de drenagem em escala piloto dos lodos tipos A e B, respectivamente.

Gráfico 16 - Resultados da fase de drenagem para o tipo A na escala piloto / Etapa II

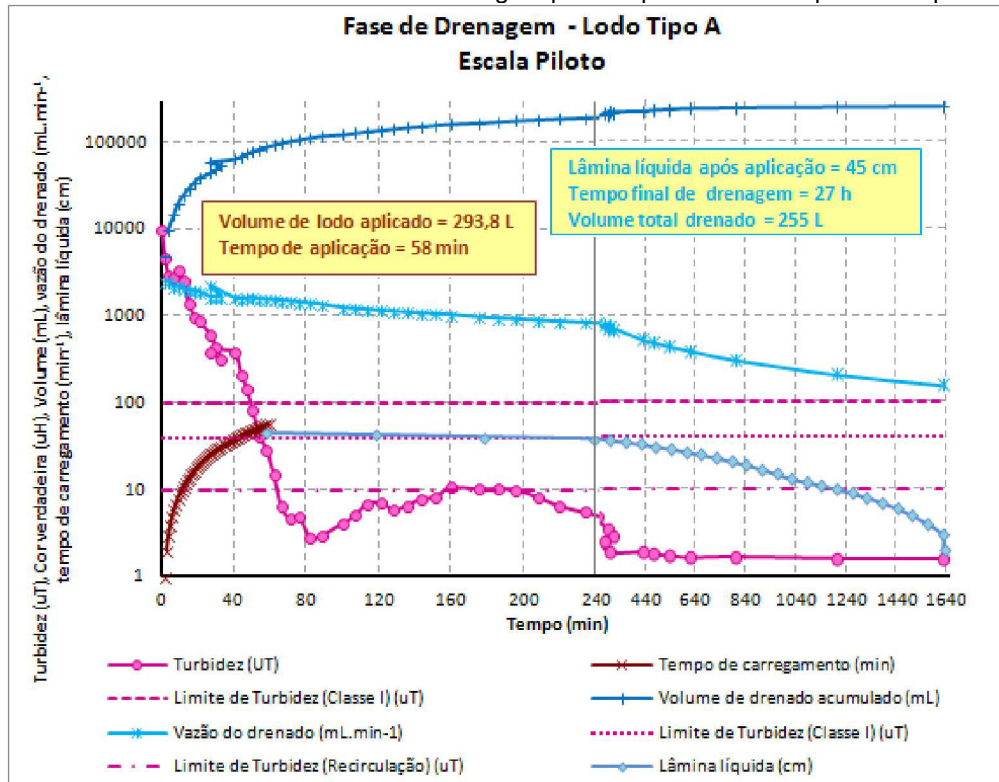
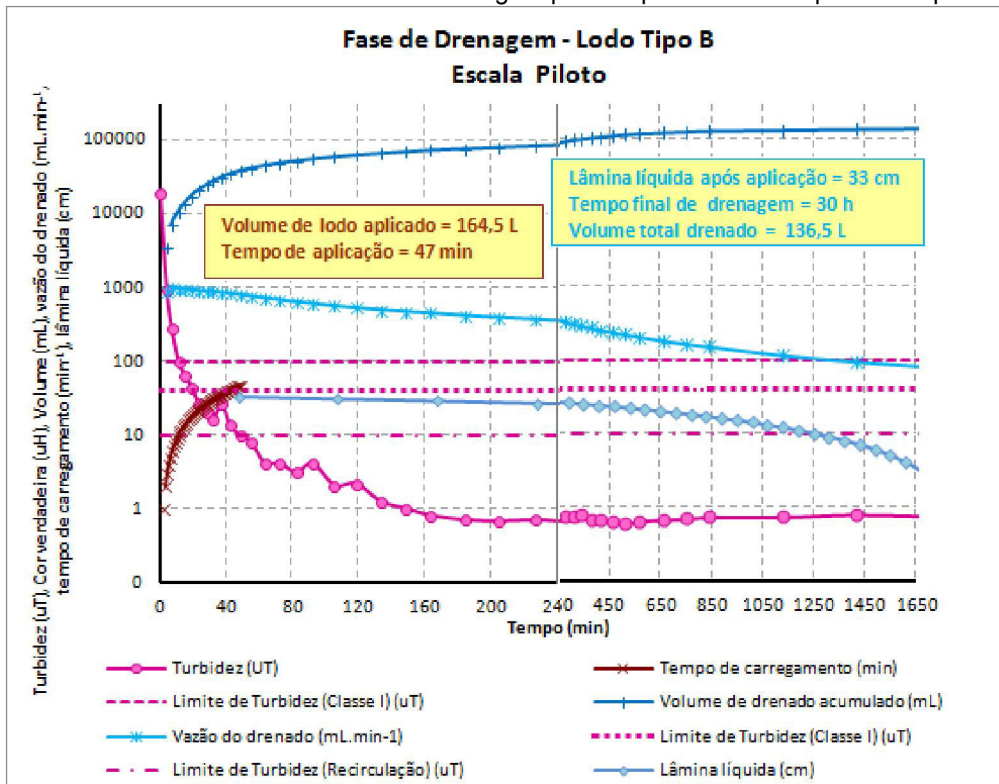


Gráfico 17 - Resultados da fase de drenagem para o tipo B na escala piloto / Etapa II



A Tabela 17 relaciona algumas diferenças observadas entre as fases de drenagem dos lodos tipos A e B em escala piloto.

Tabela 17 - Observações da fase de drenagem dos lodos tipos A e B / escala piloto – Etapa II

Observações	Lodo tipo A	Lodo tipo B
Tempo requerido para extinção da lâmina líquida (h)	27	30
Redução do volume total de lodo aplicado (%)	86	83
Tempo requerido para produção de água drenada com turbidez $\leq$ 100 uT (min)	50	15
Tempo requerido para produção de água drenada com turbidez $\leq$ 40 uT (min)	58	23
Tempo requerido para produção de água drenada com turbidez $\leq$ 10 uT (min)	66	48
Valor de turbidez da água drenada ao final do desaguamento (uT)	1,5	0,7
Valor de cor aparente da água drenada ao final do desaguamento (uH)	15	5

A diferença no tempo requerido para extinção da lâmina líquida entre os lodos tipos A e B, comprovam novamente os resultados obtidos no teste de resistência específica, que revelaram que o lodo tipo A apresenta maior facilidade de filtração que o lodo tipo B.

As porcentagens de volume de drenados tipos A e B que atenderam a cada condição estabelecida, em relação ao volume total de água drenada durante os ensaios de desaguamento são mostradas na Tabela 18.

Tabela 18 - Porcentagens de volume de drenado que atenderam a cada condição na escala piloto

	Condição I ( $<40$ uT)	Condição II ( $<100$ uT)	Condição III ( $<10$ uT)
Lodo tipo A	66%	69%	62%
Lodo tipo B	84%	89%	71%

Assim como observado nos ensaios de desaguamento em escala reduzida, na escala piloto, as porcentagens de volume de drenado que atenderam às condições de enquadramento I e II e de reaproveitamento III para o lodo tipo B foram superiores às obtidas para o lodo tipo A, mas em porcentagens inferiores em às obtidas em escala reduzida (Tabela 12).

Foram constituídas amostras compostas dos drenados tipos A e B para cada condição de enquadramento – ACD I e II, condição de reaproveitamento – ACD III e condição global de produção – ACD IV. Posteriormente fez-se a caracterização física, química e microbiológica das amostras compostas a fim de

avaliar possíveis riscos à saúde e impactos ao meio ambiente, considerando o seu lançamento em corpos hídricos Classe I e II.

O Gráfico 18 e Gráfico 19 mostram os resultados em relação às análises de turbidez, cor verdadeira, sólidos dissolvidos totais, DBO, DQO, coliformes totais e *E.Coli* dos lodos iniciais e das amostras compostas dos drenados dos lodos tipos A e B, respectivamente.

Gráfico 18 - Resultados da caracterização do lodo inicial tipo A e amostras compostas dos drenados – ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala piloto

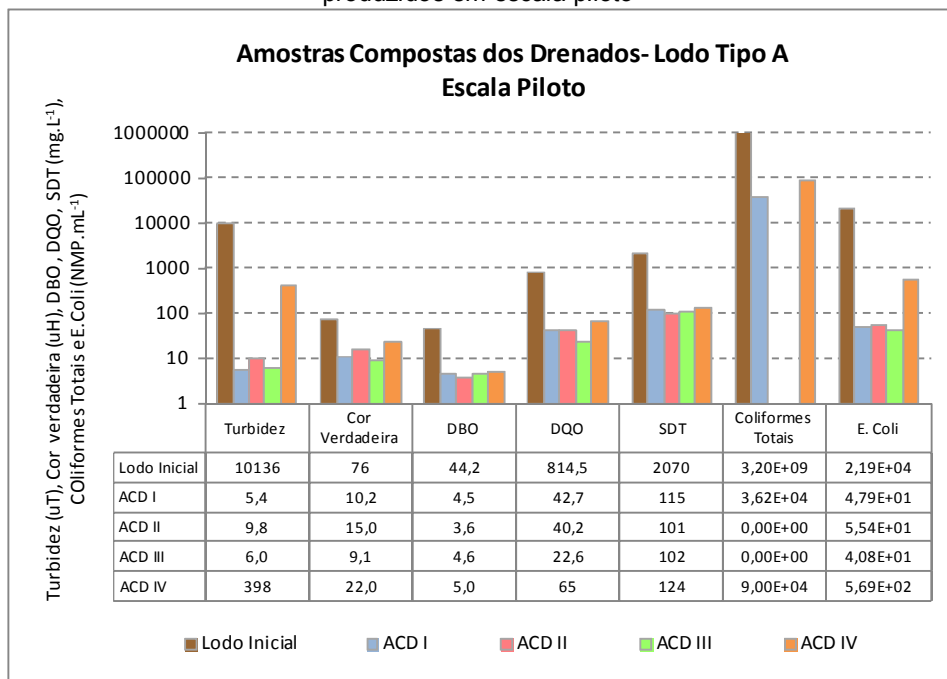
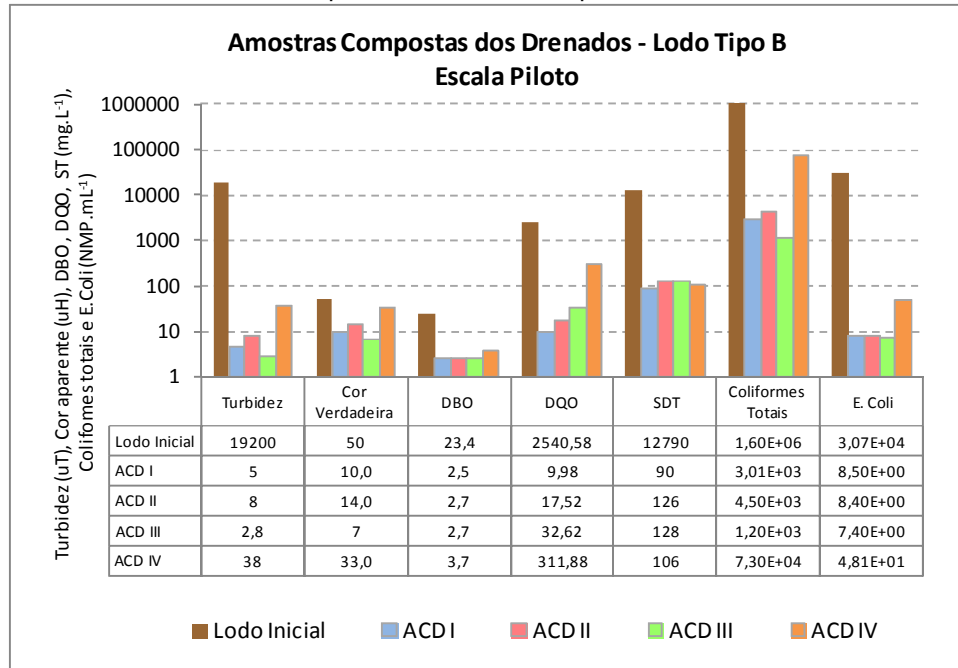


Gráfico 19 - Resultados da caracterização do lodo inicial tipo B e amostras compostas dos drenados – ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala piloto



Como pode ser observado, os lodos tipos A e B apresentaram valores de cor verdadeira de 76 e 50 uH, respectivamente, e portanto, em conformidade com os valores limites da Resolução 357/05 do Conama.

A Resolução 357/05 do Conama não estabelece valor limite de DQO, porém pode ser observado em ambos os desaguamentos que houve uma redução significativa dos valores desse parâmetro nos drenados produzidos. No entanto, a Legislação Estadual SEMA/07 do IAP – Instituto Ambiental do Paraná estabelece o limite de DQO de 125 mg.L<sup>-1</sup> como padrão de lançamento. Constatou-se que todas as amostras compostas dos drenados do lodo tipo A atenderam a esse limite, enquanto nos drenados do lodo tipo B, somente a amostra composta global – condição IV, apresentou-se acima de 125 mg.L<sup>-1</sup>.

Em relação à DBO, todas as amostras compostas dos drenados dos lodos tipos A e B apresentaram valores entre 3 e 5 mg.L<sup>-1</sup>, limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água Classe I e II, respectivamente.

O limite estabelecido para SDT pela Resolução 357/05 do Conama é de 500 mg.L<sup>-1</sup> para corpos de água Classe I e II. Os valores de SDT para as amostras compostas dos lodos drenados tipos A e B apresentaram-se abaixo desse

limite, com valores máximos de 124 mg.L<sup>-1</sup> e 106 mg.L<sup>-1</sup> nas ACD IV, respectivamente.

A Resolução 357/05 do Conama não menciona o limite aceitável para coliformes totais, e estabelece os valores de 200 e 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mL de amostra, para corpos de água classe I e II, respectivamente. Para as amostras compostas dos drenados do lodo tipo A pode-se verificar que somente o volume de drenado referente à Condição IV (ACD IV) não atende ao limite estabelecido para corpos de água classe I, ao passo que as amostras compostas dos drenados do lodo tipo B enquadraram-se em todos os limites estabelecidos considerados.

Esses resultados comprovam a elevada eficiência do desaguamento de lodos de decantadores de ETAs pela concepção proposta - leitos de drenagem / secagem com manta geotêxtil.

A Tabela 19 e Tabela 20 mostram os valores de metais nos lodos iniciais e amostras compostas dos drenados dos lodos tipos A e B para cada condição estabelecida.

Tabela 19 - Resultados da quantificação de metais no lodo inicial tipo A e amostras compostas dos drenados – ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala piloto

Parâmetro	Lodo Inicial	ACD I	ACD II	ACD III	ACD IV
Alúminio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	237,6	0,32	0,26	0,18	11,29
Ferro Total (mg.L <sup>-1</sup> )	545,60	1,78	0,85	0,36	50,20
Cádmio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	< L.Q	N.D	N.D	N.D	N.D
Cálcio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	23,18	7,08	7,64	6,75	8,19
Chumbo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,41	N.D	N.D	N.D	N.D
Cobalto Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,22	N.D	N.D	N.D	N.D
Cobre Total (mg.L <sup>-1</sup> )	1,29	0,05	0,046	0,046	0,10
Cromo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,34	N.D	N.D	N.D	0,01
Fósforo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,66	0,05	<L.Q	<L.Q	<L.Q
Magnésio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	7,12	2,12	2,28	2,01	2,52
Manganês Total (mg.L <sup>-1</sup> )	13,71	1,43	1,55	1,34	2,09
Níquel Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,094	N.D	N.D	N.D	N.D
Potássio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	1,0	<L.Q	<L.Q	<L.Q	<L.Q
Silício Total (mg.L <sup>-1</sup> )	58,15	4,72	4,73	4,13	17,93
Sódio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	4,3	1,50	1,50	1,40	1,90
Titânio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	14,88	<L.Q	N.D	N.D	0,77
Zinco Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,42	N.D	N.D	N.D	N.D

Tabela 20 – Resultados da quantificação de metais no lodo inicial tipo B e amostras compostas dos drenados – ACD para cada condição de enquadramento (I e II), reaproveitamento (III) e drenado global (IV) produzidos em escala piloto

Parâmetro	Lodo Inicial	ACD I	ACD II	ACD III	ACD IV
Alumínio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	757,7	0,17	0,35	0,24	1,28
Ferro Total (mg.L <sup>-1</sup> )	324,30	<L.Q	0,60	0,10	2,72
Cádmio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Cálcio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	16,30	5,20	5,88	5,66	6,34
Chumbo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	< L.Q	N.D	N.D	N.D	N.D
Cobalto Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,10	N.D	N.D	N.D	N.D
Cobre Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,60	0,045	0,046	0,046	0,043
Cromo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,24	N.D	N.D	N.D	N.D
Fósforo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	8,69	N.D	<L.Q	0,093	0,06
Magnésio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	17,20	1,51	1,75	1,69	1,88
Manganês Total (mg.L <sup>-1</sup> )	7,72	0,93	1,08	1,05	1,17
Níquel Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,10	N.D	N.D	N.D	N.D
Potássio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	9,60	1,0	<L.Q	1,0	1,10
Silício Total (mg.L <sup>-1</sup> )	7,54	2,28	2,94	2,42	4,04
Sódio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	4,20	2,70	2,90	3,0	3,20
Titânio Total (mg.L <sup>-1</sup> )	5,39	N.D	N.D	N.D	0,04
Zinco Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,55	N.D	N.D	N.D	N.D

Como pôde-se observar, dentre os metais analisados nos lodos iniciais, o ferro e o alumínio apresentaram-se em maiores concentrações, devido principalmente, aos tipos de coagulante químico empregados nas ETAs.

No entanto, conforme apresentado na Tabela 15 e Tabela 16, a fração de ferro e alumínio dissolvidos nos lodos iniciais tipos A e B, apresentaram-se abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para enquadramento em corpos de água Classes I e II.

Em relação às amostras compostas dos drenados, pode-se observar que no desaguamento do lodo tipo A, a redução mínima da concentração de ferro total foi de 90,8% na amostra composta referente a condição IV (50,2 mg.L<sup>-1</sup>) e máxima de 99,93% na amostra composta referente a condição III (0,36 mg.L<sup>-1</sup>), o que comprovam a elevada eficiência do sistema.

As elevadas concentrações de metais na fração suspensa quantificadas na amostra composta referente a condição IV do lodo tipo A, revelam que o lançamento direto do drenado mesmo após o tratamento poderá incrementar significativamente as concentrações de metais e causar impactos negativos aos corpos receptores classes I e II.

No desaguamento do lodo tipo B, a redução mínima da concentração de alumínio total foi de 99,83% na amostra composta referente a condição IV (1,28

mg.L<sup>-1</sup>) e máxima de 99,97% na amostra composta referente a condição I (0,17 mg.L<sup>-1</sup>), reduzindo substancialmente os prejuízos à qualidade do corpo receptor.

Como em relação à fração dissolvida dos metais nos lodos tipos A e B, apenas o cobre apresentou valores superiores ao limite estabelecido pela Resolução 357/05 do Conama para enquadramento em corpos de água Classes I e II, o mesmo pode ocorrer para as amostras compostas dos drenados, especialmente para a ACD IV.

Apesar da turbidez ser um parâmetro indireto e inespecífico, seu uso como parâmetro de controle de eficiência foi de fundamental importância, por possibilitar:

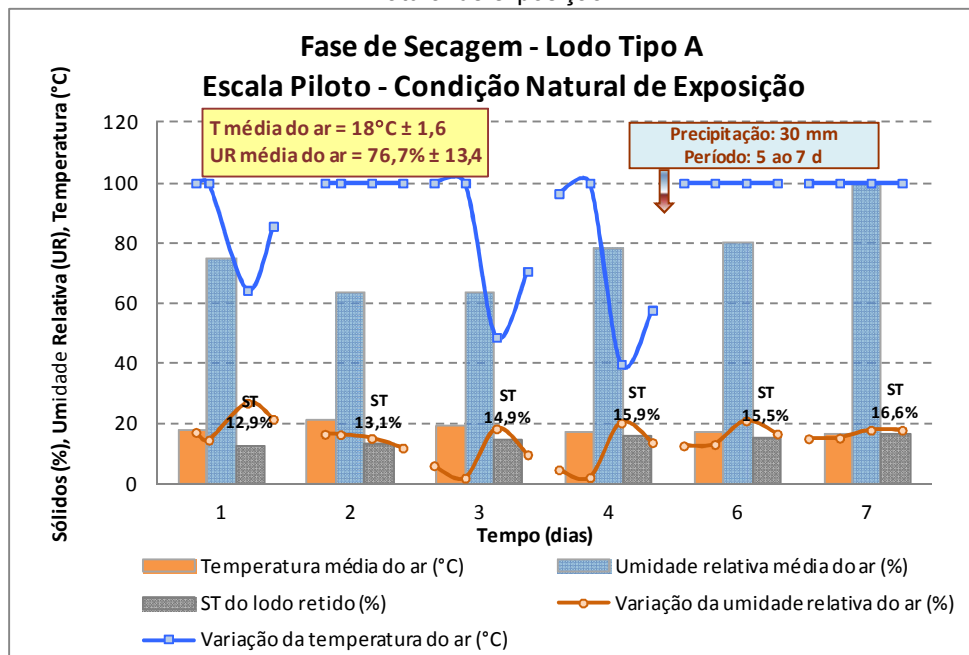
- a sistematização dos resultados em relação à qualidade da água drenada de acordo com as condições de enquadramento (Condição I e II) e de reaproveitamento (Condição III);
- a comprovação de que o lançamento direto da produção global de drenados (Condição IV) poderá trazer impactos negativos aos corpos de água receptores classes I e II e que portanto, requer a implantação de um sistema on-line de separação do drenado produzido mediante controle de qualidade a exemplo do sistema proposto neste trabalho;
- as amostras compostas de água drenada que atenderam às condições de enquadramento I e II em relação a este parâmetro de controle – turbidez, apresentaram de maneira geral, qualidade compatível às condições de enquadramento consideradas;
- a constatação de que grande parcela do volume de drenado produzido (valores superiores a 62 % para o lodo tipo A e 71% para o lodo tipo B na escala piloto – Etapa II) poderá ser reaproveitado para produção de água na própria ETA, o que contribuirá para o manejo e destino adequado dos resíduos da mesma.

### **5.2.3 Fase de Secagem / Escala piloto**

A fase de secagem das tortas de lodos retidos tipos A e B produzidos em escala piloto foi realizada em condição natural de exposição e desprotegida da ação de intempéries.

Os teores de sólidos totais iniciais nas tortas de lodo tipos A e B foram de 12,9% e 11,2%, respectivamente. O Gráfico 20 apresenta os resultados da secagem da torta de lodo tipo A, realizada para a condição crítica de secagem observada nos desaguentamentos em escala reduzida - natural de inverno, durante 7 dias de monitoramento.

Gráfico 20 - Resultados da fase de secagem do lodo tipo A em escala piloto / Etapa II - Condição natural de exposição



Em relação a secagem do lodo tipo A, pôde-se observar que após 7 dias de exposição, com temperatura média de 18,3°C ± 1,6, umidade relativa média de 76,7% ± 13,4 e ocorrência de precipitação no 6º ao 7º dia, o teor de sólidos totais final foi de 16,6%.

A Figura 37 à Figura 39 mostram fotos da torta do lodo tipo A, respectivamente logo após a drenagem, no 4º dia de secagem sem a ocorrência de precipitação e após o 7º dia de secagem, onde é possível observar que a incorporação da água da chuva na torta prejudicou a secagem do lodo. Como pode-se observar na Figura 38, mesmo com um teor de sólidos relativamente baixo (15%) foi possível desprender o lodo retido na manta com relativa facilidade para disposição adequada.

Figura 37 - Torta do lodo tipo A logo após a fase de drenagem (ST 12,9%)



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 38 - Torta do lodo tipo A no 4º dia de secagem (ST 15%)



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 39 - Torta do lodo tipo A após 7 dias de secagem (ST 16,6%)

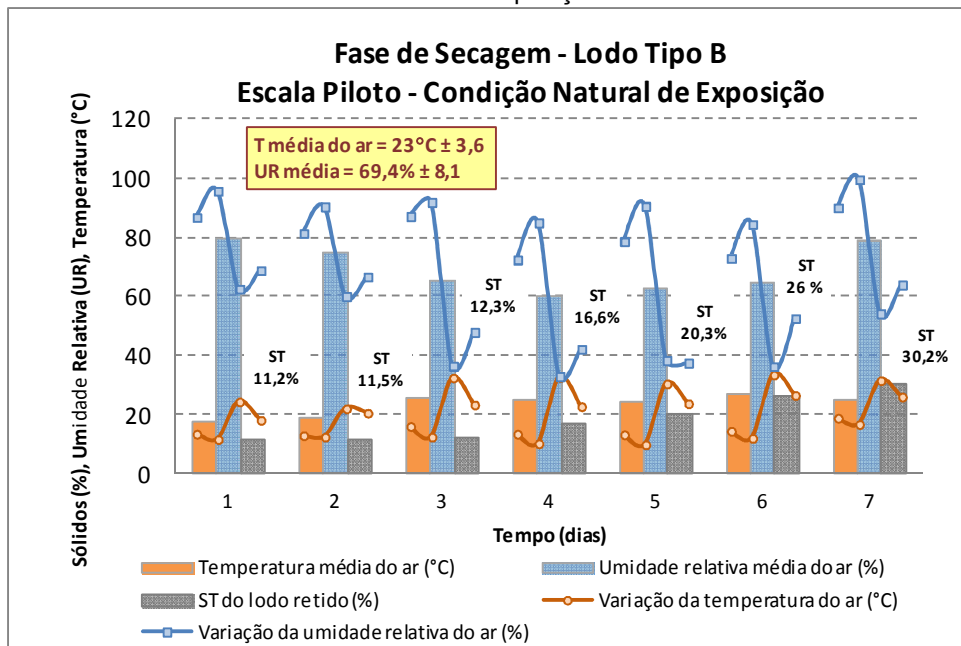


Fonte: Do Autor (2012)

O Gráfico 21 apresenta os resultados da secagem da torta de lodo tipo

B.

Gráfico 21 - Resultados da fase de secagem do lodo tipo B em escala piloto – Etapa II – condição natural de exposição



Pôde-se observar que após 7 dias de secagem, com temperatura média de  $23,2^\circ\text{C} \pm 3,6$  e umidade relativa média de  $69,4\% \pm 8,1$  o teor de sólidos totais final foi de 30,2%.

A Figura 40 e Figura 41 mostram fotos do lodo tipo B retido na manta ao final da fase de drenagem e após sete dias de secagem.

Figura 40 - Torta do lodo tipo B logo após a fase de drenagem (ST 11,2%)



Fonte: Do Autor (2012)

Figura 41 - Torta de lodo do lodo tipo B após 7 dias de secagem (ST 30,2%)



Fonte: Do Autor (2012)

A secagem dos lodos tipos A e B em condições naturais críticas de exposição de inverno, desprotegidos de precipitação possibilitou a obtenção de teores de sólidos da ordem de 16 e 30% após 7 dias de secagem, valores da

mesma ordem de grandeza dos produzidos por técnicas mecânicas de desaguamento.

Os resultados comprovaram a eficiência do sistema de desaguamento composto por leitos de drenagem / secagem com manta geotêxtil, mesmo para a condições naturais críticas de exposição de inverno e sujeito à radiação solar, ventilação e precipitações durante a fase de secagem.

### **5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESAGUAMENTO EM ESCALA REDUZIDA – ETAPA I E ESCALA PILOTO – ETAPA II**

A Tabela 21 mostra a compilação dos dados quantitativos das fases de drenagem e secagem em escala reduzida – Etapa I e escala piloto – Etapa II.

Tabela 21 – Dados quantitativos das fases de drenagem e secagem nas Etapas I e II

	Escala Reduzida – Etapa I		Escala Piloto – Etapa II	
	Lodo A	Lodo B	Lodo A	Lodo B
<b>Fase de Drenagem</b>				
Teor de sólidos totais - ST (%)	1,5	1,6	0,91	1,27
Manta (g.m <sup>-2</sup> )	600	600	600	600
Taxa de aplicação de sólidos - TAS (kg.m <sup>-2</sup> )	7,5	7,5	7,5	6,5
Taxa de aplicação volumétrica - TAV (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )	15	15	20	14
Volume de lodo aplicado (L)	26,5	24,8	293,8	164,5
Vazão de aplicação (mL.min <sup>-1</sup> )	550	550	5.000	3.500
Lâmina líquida após aplicação (cm)	37	39	45	33
Tempo final de drenagem ou Tempo de extinção da lâmina líquida (h)	41	43	27	30
Volume total drenado (L)	25	23,5	255	135,6
Volume que atendeu a Condição I (%)	78	91	66	84
Volume que atendeu a Condição II (%)	80	91	69	89
Volume que atendeu a Condição III (%)	76	89	62	71
Redução do volume de lodo aplicado (%)	94	94	87	82
<b>Fase de Secagem</b>				
Tempo para obtenção de teor de ST de 30 % (d) (Cond. Controlada:Verão)	5	7	--	--
Tempo para obter teor de ST de 30 % (d) (Cond. Natural:Verão)	3	4	--	--
Tempo para obtenção de ST de 30 % (d) (Cond. Controlada:Inverno)	5	13	--	--
Tempo para obtenção de ST de 30 % (d) (Cond. Natural:Inverno)	11	7	--	--
Tempo para obtenção de teor de ST de 30 % (d) (Cond.Natural de exposição)	--	--	N.O	7

N.O – Não foi possível obter ST de 30%

-- Não realizado

Como observado os tempos necessários para extinção da lâmina líquida nos ensaios em escala reduzida – Etapa I e escala piloto – Etapa II, para o lodo de cloreto férrico (lodo tipo A), foram respectivamente, 41 e 27 horas. Para o lodo de PACI (lodo tipo B), os tempos necessários para extinção da lâmina líquida nos ensaios em escala reduzida e escala piloto, foram 43 e 30 horas, respectivamente.

Barroso (2007) e Achon, Barroso e Cordeiro (2008) avaliaram o desaguamento em leitos de drenagem / secagem com manta geotêxtil (600 g.m<sup>-2</sup>) de lodos de sulfato de alumínio e PACI. Os tempos necessários para extinção da lâmina líquida encontrados pelos autores, foram da ordem de 6 horas para o lodo de sulfato de alumínio e 1 hora para o lodo de PACI. Entretanto, as TAS e os volumes de lodo aplicados por Barroso (2007) e Achon, Barroso e Cordeiro (2008) foram

significativamente inferiores aos aplicados neste estudo, justificando as diferenças entre os tempos de drenagem.

Constatou-se que os tempos de drenagem ou os tempos necessários para extinção da lâmina líquida nos ensaios em escala reduzida – Etapa I resultaram sempre superiores quando comparados aos da escala piloto – Etapa II. Por outro lado, na fase de drenagem dos lodos tipos A e B, as porcentagens de volume de água drenada que atenderam a cada condição (I, II e III) e as porcentagens de redução do volume de lodo foram superiores nas escalas reduzidas – Etapa I quando comparadas às obtidas nas escalas pilotos – Etapa II.

De modo geral, os resultados apresentados na Tabela 21 mostram que a escala adotada no leito de drenagem / secagem influencia nos resultados obtidos na drenagem e secagem do lodo, porém, não prejudica a eficiência do sistema de desaguamento.

Os resultados qualitativos da fase de secagem nas Etapas I e II são apresentados na Tabela 22 e Tabela 23. Os dados mostram que além da temperatura e umidade relativa do ar, a incidência de radiação solar e ventilação favorecem a secagem do lodo, pois na condição natural de verão, por exemplo, mesmo com valores de umidade relativa superiores, os lodos tipos A e B apresentaram ao 5º dia de secagem, teores de ST significativamente maiores que na condição controlada de verão.

Além disso, os resultados revelam que independente da condição de exposição, os lodos tipos A e B tem comportamento semelhantes na fase de secagem, apresentando teores de sólidos com valores próximos no 5º e 13º dias de secagem.

Tabela 22 – Dados qualitativos da fase de secagem dos lodos tipos A nas Etapas I e II

Condições	Lodo Tipo A					
	Escala Reduzida – Etapa I					
	5º dia			13º dia		
	T <sub>média</sub> (°C)	UR <sub>média</sub> (%)	ST (%)	T <sub>média</sub> (°C)	UR <sub>média</sub> (%)	ST (%)
Controlada Verão	26,5 ± 5,6	79,4 ± 2,6	35,6	28 ± 3,6	79,8 ± 1,6	86,1
Natural Verão	27,3 ± 2,1	73,7 ± 15,4	62,9	25,9 ± 3,6	75,9 ± 12,8	75,4
Controlada Inverno	14,1 ± 0,2	60 ± 0,05	32,6	14,3 ± 0,2	61,3 ± 7,3	36,2
Natural Inverno	18,2 ± 0,9	72 ± 7,3	15,9	19,8 ± 3,6	79,5 ± 13	60,2
Condições	Escala Piloto – Etapa II					
	7º dia			13º dia		
	Natural inverno	18,3 ± 1,6	76,7 ± 13,4	16,6	--	--

-- Não realizado

Tabela 23 – Dados qualitativos da fase de secagem dos lodos tipos B nas Etapas I e II

Condições	Lodo Tipo B					
	Escala Reduzida – Etapa I					
	5º dia			13º dia		
	T <sub>média</sub> (°C)	UR <sub>média</sub> (%)	ST (%)	T <sub>média</sub> (°C)	UR <sub>média</sub> (%)	ST (%)
Controlada Verão	26,5 ± 5,6	79,4 ± 2,6	23,5	28 ± 3,6	79,8 ± 1,6	86,8
Natural Verão	27,3 ± 2,1	73,7 ± 15,4	43,2	25,9 ± 3,6	75,9 ± 12,8	82,5
Controlada Inverno	14,1 ± 0,2	60 ± 0,05	20,6	14,3 ± 0,2	61,3 ± 7,3	33,4
Natural Inverno	22,3 ± 4,42	69,1 ± 9,05	20,3	24,8 ± 5	69,4 ± 13,38	60,8
Condições	Escala Piloto – Etapa II					
	7º dia			13º dia		
	Natural inverno	23,2 ± 3,6	69,4% ± 8,1	30,2	--	--

-- Não realizado

A Tabela 24 e Tabela 25 mostram os dados qualitativos da fase de drenagem nas Etapas I e II para os lodos tipos A e B, respectivamente.

Tabela 24 – Resultados qualitativos das fases de drenagem em escala reduzida – Etapa I e escala piloto – Etapa II para lodo tipo A e amostras compostas dos drenados – ACD I, II, III e IV e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água doce Classe I e II

	Escala Reduzida					Escala Piloto						Limites Conama	
	Lodo Inicial	ACD I	ACD II	ACD III	ACD IV	Lodo Inicial	Lodo Inicial	ACD I	ACD II	ACD III	ACD IV	Classe I	Classe II
Turbidez (uT)	20000,0	2,5	3,4	2,5	695,0	1013,4	N.A	5,4	9,8	6,0	398,0	100	40
Cor aparente (uH)	63460,0	47,4	49,0	49,0	299,5	50700,0	N.A	43,0	50,0	28,0	23,0	--	--
ST (mg.L <sup>-1</sup> )	15558,0	274,0	368,0	632,0	884,0	9150,0	N.A	118,0	108,0	108,0	420,0	--	--
SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	4318,0	282,0	365,0	452,0	631,0	2070,0	N.A	114,6	101,3	102,0	124,0	500	500
DBO (mg.L <sup>-1</sup> )	77,3	3,2	4,0	4,2	9,0	44,2	N.A	4,5	3,5	4,5	4,9	3	5
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	1587,9	30,1	32,6	37,5	77,9	814,5	N.A	42,6	40,1	22,5	65,3	--	--
Coliformes (NMP)	4,5E+05	4,1E+01	3,8E+01	4,5E+01	1,9E+03	3,2E+09	N.A	3,6E+04	4,0E+04	3,5E+04	9,0E+04	--	--
E.Coli (NMP)	7,7E+02	0,0	0,0	0,0	4 E+00	2,2E+04	N.A	4,8E+01	5,5E+01	4,1E+01	5,7E+02	2 E+02	1E+03
Alúminio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	237,6	N.A *	0,32	0,26	0,18	11,29	0,1 *	0,1 *
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	< L.Q	N.D*	N.D	N.D	N.D	N.D	0,3*	0,3*
Cálcio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	23,18	10,65 *	7,08	7,64	6,75	8,19	0,001	0,001
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,41	N.D*	N.D	N.D	N.D	N.D	--	--
Cobalto (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,22	N.D*	N.D	N.D	N.D	N.D	0,01	0,01
Cobre (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	1,29	0,031 *	0,05	0,046	0,046	0,10	0,05	0,05
Cromo (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,34	N.D*	1,78	0,85	0,36	50,20	0,009 *	0,009 *
Ferro(mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	545,60	N.D*	0,05	<L.Q	<L.Q	<L.Q	0,05	0,05
Fósforo (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,66	N.D*	2,12	2,28	2,01	2,52	0,02	0,03
Magnésio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	7,12	3,29*	1,43	1,55	1,34	2,09	--	--
Manganês (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	13,71	N.D*	N.D	N.D	N.D	N.D	0,1	0,1
Níquel (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,094	N.D*	<L.Q	<L.Q	<L.Q	<L.Q	0,0	0,025
Potássio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	1,0	0,70*	4,72	4,73	4,13	17,93	--	--
Silício (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	58,15	6,97*	1,50	1,50	1,40	1,90	--	--
Sódio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	4,3	2,10*	<L.Q	N.D	N.D	0,77	--	--
Titânio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	14,88	0,003 *	N.D	N.D	N.D	N.D	--	--
Zinco (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,42	N.D*	0,05	<L.Q	<L.Q	<L.Q	0,18	0,18

-- não estabelecido  
ND – não detectado

ACD – amostra composta do drenado de cada condição  
< L.Q - abaixo do limite de quantificação

N.A – não analisado  
\* valor referente ao composto na forma dissolvida

Tabela 25 - Resultados qualitativos das fases de drenagem em escala reduzida – Etapa I e escala piloto – Etapa II para o lodo tipo B e amostras compostas dos drenados – ACD I, II, III e IV e limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para corpos de água doce Classe I e II

	Escala Reduzida					Escala Piloto						Limites Conama	
	Lodo Inicial	ACD I	ACD II	ACD III	ACD IV	Lodo Inicial	Lodo Inicial	ACD I	ACD II	ACD III	ACD IV	Classe I	Classe II
Turbidez (uT)	18000,0	1,1	1,1	1,5	156,0	19.200	N.A	4,7	7,8	2,8	37,8	100	40
Cor aparente (uH)	55117,0	39,5	39,5	37,9	346,5	51.200	N.A	31,0	40,0	16,0	179,0	--	--
ST (mg.L <sup>-1</sup> )	16932,0	366,0	366,0	338,0	458,0	12.790	N.A	90,0	126,0	126,0	206,0	--	--
SDT (mg.L <sup>-1</sup> )	3312,0	362,6	362,6	337,2	264,5	610	N.A	83,5	120,5	126,0	182,5	500	500
DBO (mg.L <sup>-1</sup> )	49,8	5,4	5,4	4,8	10,5	23,4	N.A	1,6	1,6	1,9	2,7	3	5
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	2781,6	40,2	40,2	32,6	60,3	2.540	N.A	10,0	17,5	32,6	311,8	--	--
Coliformes (NMP)	3,5E+05	1,8E+01	1,8E+01	1,2E+01	1 E+03	1,6 E+06	N.A	3E+03	4,5E+03	1,2E+05	7,3E+04	--	--
E.Coli (NMP)	6510,0	0,0	0,0	0,0	70,8	3,E+04	N.A	8,5	8,4	7,4	48,1	200,0	1000
Alúminio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	2,E+04	N.A	0,17	0,35	0,24	1,28	0,1 *	0,1 *
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	237,6	0,05	N.D	N.D	N.D	N.D	0,3*	0,3*
Cálcio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	< L.Q	N.D	5,20	5,88	5,66	6,34	0,001	0,001
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	23,18	10,65	N.D	N.D	N.D	N.D	--	--
Cobalto (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,41	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0,01	0,01
Cobre (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,22	N.D	0,045	0,046	0,046	0,043	0,05	0,05
Cromo (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	1,29	0,031	N.D	N.D	N.D	N.D	0,009 *	0,009 *
Ferro(mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,34	N.D	<L.Q	0,60	0,10	2,72	0,05	0,05
Fósforo (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	545,60	N.D	N.D	<L.Q	0,093	0,06	0,02	0,03
Magnésio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,66	N.D	1,51	1,75	1,69	1,88	--	--
Manganês (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	7,12	3,29	0,93	1,08	1,05	1,17	0,1	0,1
Níquel (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	13,71	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0,0	0,025
Potássio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	0,094	N.D	1,0	<L.Q	1,0	1,10	--	--
Silício (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	1,0	0,70	2,28	2,94	2,42	4,04	--	--
Sódio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	58,15	6,97	2,70	2,90	3,0	3,20	--	--
Titânio (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	4,3	2,10	N.D	N.D	N.D	0,04	--	--
Zinco (mg.L <sup>-1</sup> )	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	14,88	0,003	N.D	N.D	N.D	N.D	0,18	0,18

-- não estabelecido  
ND – não detectado

ACD – amostra composta do drenado de cada condição  
< L.Q - abaixo do limite de quantificação

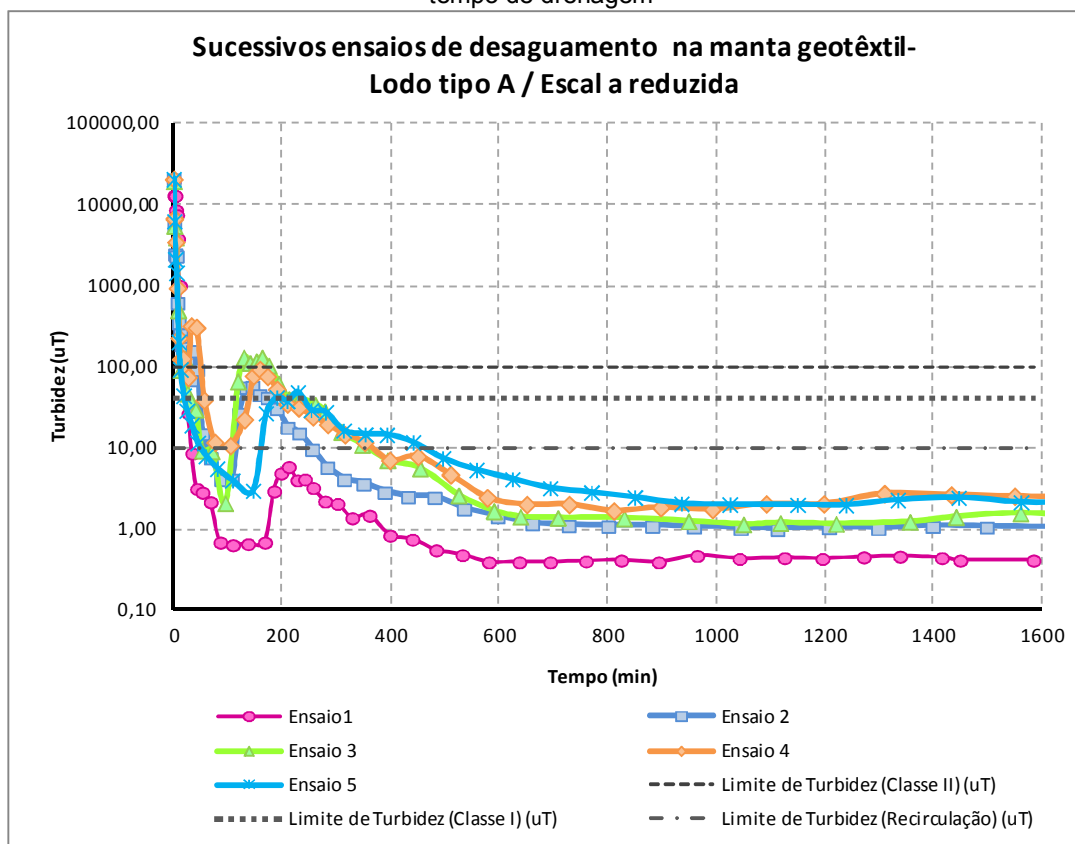
N.A – não analisado

\* valor referente ao composto na forma dissolvida

## 5.4 INFLUÊNCIA DA EXECUÇÃO DE SUCESSIVOS DESAGUAMENTOS NA MANTA GEOTÊXTIL

No Gráfico 22 são apresentados os resultados da fase de drenagem, dos 5 (cinco) desaguamentos em escala reduzida, realizados para avaliar influência da execução de sucessivos desaguamentos na manta geotêxtil e a influência desta prática no desempenho do sistema, especialmente em relação à duração da fase de drenagem e qualidade dos lodos drenados produzidos.

Gráfico 22 - Resultados de turbidez dos drenados produzidos nos Ensaios 1 ao 5 em função do tempo de drenagem



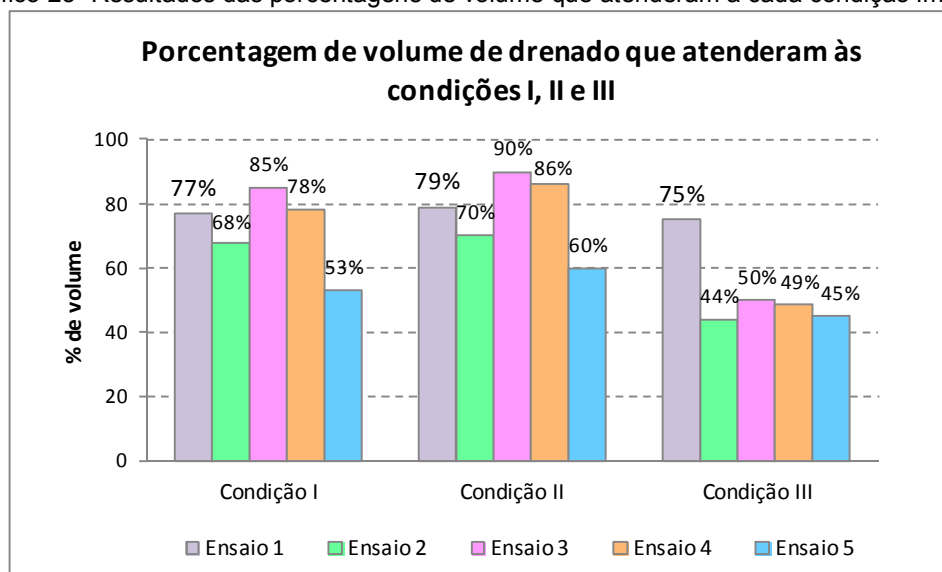
Em função da colmatção da manta e conseqüente redução de vazios entre as fibras que formam a manta, era esperado que a qualidade de água drenada fosse melhorada a cada ensaio, pois a colmatção dificultaria a passagem dos sólidos pela camada filtrante. No entanto, como pode ser observado no Gráfico 22, a qualidade dos lodos drenados em relação ao parâmetro turbidez, nos Ensaios 2, 3, 4

e 5 foi inferior à do Ensaio 1, porém com eficiências ainda elevadas e tendência de apresentar o mesmo comportamento em ensaios subseqüentes.

As variações na qualidade dos lodos drenados no início da drenagem (entre 130 e 200 min) não foram observadas nos ensaios realizados em escala reduzida – Etapa I e podem estar relacionadas ao desprendimento de sólidos previamente presentes na manta entre um desaguamento e outro, provocando os picos de turbidez observados.

O Gráfico 23 mostra os resultados das porcentagens de volume de água drenada em relação ao volume de lodo aplicado, que atenderam a cada condição de enquadramento (Condição I e II) e de reaproveitamento (Condição III) em cada ensaio de desaguamento.

Gráfico 23 - Resultados das porcentagens de volume que atenderam a cada condição imposta



As porcentagens de volume de água drenada que atenderam à condição de reaproveitamento (Condição III) nos Ensaios 2 a 5 foram inferiores às obtidas no Ensaio 1, mostrando que o uso sucessivo da manta geotêxtil influenciou de forma negativa na qualidade de água drenada produzido. Por outro lado, as porcentagens de volume de água drenada que atenderam às condições de enquadramento (Condições I e II) não apresentaram diferenças significativas entre os ensaios realizados.

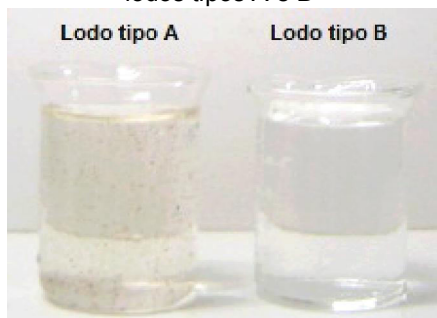
## 5.5 DISPOSIÇÃO FINAL DA TORTA DE LODO

### 5.5.1 Teste de lixiviação – Ensaio em colunas de lixiviação

Os lodos tipos A e B desaguados utilizados nas colunas de lixiviação apresentaram teor de sólidos de 77,8% e 79,5%, respectivamente. Após a lixiviação foi observado um aumento de umidade da ordem de 4% dos lodos, ocasionada pela incorporação da água nos materiais sólidos.

A Figura 42 mostra as amostras compostas dos lixiviados dos lodos tipos A e B.

Figura 42 - Foto das amostras compostas dos líquidos percolados das colunas de lixiviação dos lodos tipos A e B



Fonte: Do Autor (2012)

Na Tabela 26 é mostrada a caracterização físico, química e microbiológica das amostras compostas dos lixiviados dos lodos tipos A e B.

Tabela 26 – Caracterização das amostras compostas dos lixiviados dos lodos tipos A e B

Parâmetro	Amostra composta do lixiviado - lodo tipo A	Amostra composta do lixiviado - lodo tipo B
pH	5,5	5,1
Condutividade ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	44,5	39,7
Turbidez (uT)	3,3	0,58
Coraparente (uH)	89	6,67
DBO ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	2,9	2,9
DQO ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	54,84	27,59
Alúminio Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,12	0,05
Ferro Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,10	0,007
Cádmio Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	N.D	N.D
Cálcio Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	3,45	2,82
Chumbo Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	N.D	N.D
Cobalto Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	N.D	N.D
Cobre Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,04	0,03
Cromo Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	N.D	N.D
Fósforo Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	N.D	N.D
Magnésio Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	1,01	0,27
Mangânês Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,44	0,67
Níquel Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	N.D	N.D
Potássio Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,30	0,30
Silício Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	5,42	1,07
Sódio Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,50	0,40
Titânio Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,007	0,003
Zinco Total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	<L.Q	0,02

N.D – Não detectado

&lt;L.Q – Abaixo do limite de quantificação

O contato da água ultrapura com os lodos dispostos nas colunas de lixiviação provocou a alteração de alguns parâmetros, especialmente aumento da condutividade pela presença de sais nos lodos, DQO e alguns metais, em especial o cálcio e silício. Entretanto, esses valores não são considerados nocivos ao meio ambiente, pois apresentam-se abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama para enquadramento em corpos de água doce Classes I e II (Tabela 11).

Segundo Ferranti (2006) a concentração de metais predomina de forma sensível na fase sólida do lodo. O ensaio de lixiviação revelou que os metais presentes na fase sólida do lodo muito provavelmente não oferecerão riscos ao meio ambiente, por não serem disponibilizados facilmente a partir do contato com a água, mesmo para a condição crítica de precipitação aplicada.

### 5.5.2 Classificação dos lodos de ETA

Nas Tabela 27 à Tabela 30 são apresentados os resultados dos parâmetros analisados nos extratos lixiviados e solubilizados dos lodos tipos A e B.

Tabela 27 – Resultados dos parâmetros inorgânicos e orgânicos analisados nos extratos lixiviados do lodo tipo A

Parâmetros	L.Q	Limite NBR 10.004 Anexo F	Resultados
Arsênio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	1	< L.Q
Bário (mg.L <sup>-1</sup> )	0,07	70	< L.Q
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,5	< L.Q
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	1	< L.Q
Cromo total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	5	< L.Q
Fluoreto (mg.L <sup>-1</sup> )	0,014	150	< L.Q
Mercúrio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00006	0,1	< L.Q
Prata (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	5	< L.Q
Selênio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,008	1	< L.Q
Aldrin (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	0,003	N.D
Benzo(a)pireno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	0,07	N.D
Cloreto de vinila (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,5	N.D
Clorobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	100	N.D
Clorofórmio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	6	N.D
m-Cresol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	200	N.D
o-Cresol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	200	N.D
p-Cresol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	200	N.D
2,4-D (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	3	N.D
DDT (p,p-DDT + p,p-DDE + p,p-DDD) (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	0,2	N.D
1,4-Diclorobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	7,5	N.D
1,2-Dicloroetano (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	1	N.D
1,1-Dicloroetileno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	3	N.D
2 butanona (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,13	N.D
Endrin (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	0,06	N.D
Heptacloro hepóxido (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	0,003	N.D
Hexaclorobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	0,1	N.D
Hexaclorobutadieno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,5	N.D
Hexacloroetano (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	3	N.D
Metoxicloro (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	2	N.D
Nitrobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	2	N.D
Pentaclorofenol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,9	N.D
Piridina (mg.L <sup>-1</sup> )	2	5	N.D
2,4,5-T (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,2	N.D
Tetracloroeto de Carbono (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,2	N.D
Tetracloroetileno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	4	N.D
Toxafeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,02	0,5	N.D
2,4,5-TP (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	1	N.D
Tricloroetileno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	7	N.D
2,4,5-Triclorofenol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	400	N.D
2,4,6-Triclorofenol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	20	N.D
2,4 - dinitrotolueno	0,002	0,13	N.D

ND – não detectado

< L.Q - abaixo do limite de quantificação

Tabela 28 – Resultados dos parâmetros inorgânicos e orgânicos analisados nos extratos solubilizados do lodo tipo A

Parâmetros	L.Q	Limite NBR 10.004 Anexo G	Resultados
Alumínio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1	0,2	< L.Q
Arsênio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,01	< L.Q
Bário (mg.L <sup>-1</sup> )	0,07	0,7	< L.Q
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,005	< L.Q
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	0,01	< L.Q
Cianetos (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,07	< L.Q
Cloretos (mg.L <sup>-1</sup> )	2,5	250	84.23
Cromo total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	0,3	< L.Q
Cobre (mg.L <sup>-1</sup> )	0,009	2	< L.Q
Ferro (mg.L <sup>-1</sup> )	0,03	0,3	3,97
Fluoreto (mg.L <sup>-1</sup> )	0,14	1,5	< L.Q
Manganês (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	0,1	9,47
Merúrio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00006	0,001	< L.Q
Nitrato (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1	10	8,4
Prata (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	0,05	< L.Q
Selênio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,008	0,01	< L.Q
Sódio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1	200	4,9
Sulfato (mg.L <sup>-1</sup> )	25	250	83,8
Surfactantes (mg.L <sup>-1</sup> )	0,05	0,5	0,09
Zinco (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1	5	< L.Q
Aldrin e Dieldrin (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00003	3 x 10 <sup>-5</sup>	N.D
Clordano (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00003	2 x 10 <sup>-4</sup>	N.D
2,4-D (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,03	N.D
DDT 2,4-D (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00003	2 x 10 <sup>-3</sup>	N.D
Endrin	0,00003	6 x 10 <sup>-4</sup>	N.D
Fenóis totais	0,002	0,01	N.D
Hepptacloro hepóxido (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00003	3 x 10 <sup>-5</sup>	N.D
Hexaclorobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00003	1 x 10 <sup>-3</sup>	N.D
Metoxicloro (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00003	0,02	N.D
2,4,5-T (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	2 x 10 <sup>-3</sup>	N.D
Toxafeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	5 x 10 <sup>-3</sup>	N.D
2,4,5-TP (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,03	N.D

ND – não detectado

&lt; L.Q - abaixo do limite de quantificação

O ensaio de lixiviação do lodo tipo A teve duração de 18 horas, tendo sido coletado 1,72 L de extrato lixiviado. Os extratos lixiviado e solubilizado apresentaram pH da ordem de 5. O teor de umidade do extrato solubilizado foi de 3,89%. Analisando as Tabela 27 e Tabela 28, em relação as análises do lodo tipo A foram obtidos os seguintes resultados:

- Lixiviado: os parâmetros analisados no extrato lixiviado apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo F da NBR 10.004 (2004);
- Solubilizado: com exceção dos parâmetros ferro e manganês totais, os parâmetros analisados apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo G da NBR 10.004 (2004).

Tabela 29 – Resultados dos parâmetros inorgânicos e orgânicos analisados nos extratos lixiviados do lodo tipo B

Parâmetros	L.Q	Limite NBR 10.004 – Anexo F	Resultados
Arsênio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,04	1	< L.Q
Bário (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	70	0,37
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,003	0,5	< L.Q
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,03	1	< L.Q
Cromo total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	5	0,003
Fluoreto (mg.L <sup>-1</sup> )	0,05	150	<0,05
Mercurio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,0005	0,1	< L.Q
Prata (mg.L <sup>-1</sup> )	0,003	5	< L.Q
Selênio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,05	1	< L.Q
Aldrin e Dieldrin (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,003	< L.Q
Benzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	0,5	< L.Q
Benzo(a)pireno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,07	< L.Q
Clordano (isômeros) (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,02	< L.Q
Cloreto de vinila (mg.L <sup>-1</sup> )	0,4	0,5	< L.Q
Clorobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	100	< L.Q
Clorofórmio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	6	< L.Q
m-Cresol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	200	< L.Q
o-Cresol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	200	< L.Q
p-Cresol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	200	< L.Q
Cresol Total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	200	< L.Q
2,4-D (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	3	< L.Q
DDT (p,p-DDT + p,p-DDE + p,p-DDD) (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,2	< L.Q
1,4-Diclorobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	7,5	< L.Q
1,2-Dicloroetano (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	1	< L.Q
1,1-Dicloroetileno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	3	< L.Q
2,4-Dinitrotolueno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	0,13	< L.Q
Endrin (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,06	< L.Q
Heptacloro e seu epóxido (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,003	< L.Q
Hexaclorobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,1	< L.Q
Hexaclorobutadieno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	0,5	< L.Q
Hexacloroetano (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	3	< L.Q
Lindano (g BHC) (mg.L <sup>-1</sup> )	0,5	0,2	< L.Q
Metiletilcetona (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	200	< L.Q
Metoxicloro (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	2	< L.Q
Nitrobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	2	< L.Q
Pentaclorofenol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	0,9	< L.Q
Piridina (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	5	< L.Q
2,4,5-T (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	0,2	< L.Q
Tetracloroeto de Carbono (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	0,2	< L.Q
Tetracloroetileno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	4	< L.Q
Toxafeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,5	< L.Q
2,4,5-TP (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	1	< L.Q
Tricloroetileno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,004	7	< L.Q
2,4,5-Triclorofenol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	400	< L.Q
2,4,6-Triclorofenol (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	20	< L.Q

ND – não detectado

&lt; L.Q - abaixo do limite de quantificação

Tabela 30 – Resultados dos parâmetros inorgânicos e orgânicos analisados nos extratos solubilizados do lodo tipo B

Parâmetros	L.Q	Limite NBR 10.004 – Anexo G	Resultados
Alumínio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,05	0,2	< L.Q
Arsênio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,01	< L.Q
Bário (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	0,7	0,38
Cádmio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,003	0,005	< L.Q
Chumbo (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,01	< L.Q
Cianetos (mg.L <sup>-1</sup> )	0,005	0,07	0,0058
Cloretos (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	250	150
Cromo total (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,3	< L.Q
Cobre (mg.L <sup>-1</sup> )	0,003	2	< L.Q
Ferro (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,3	< L.Q
Fluoreto (mg.L <sup>-1</sup> )	0,05	1,5	0,059
Manganês (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,1	2,15
Mercúrio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,0005	0,001	< L.Q
Nitrato (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1	10	0,19
Prata (mg.L <sup>-1</sup> )	0,003	0,05	< L.Q
Selênio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	0,01	< L.Q
Sódio (mg.L <sup>-1</sup> )	0,05	200	3,97
Sulfato (mg.L <sup>-1</sup> )	1	250	16,6
Surfactantes (mg.L <sup>-1</sup> )	0,03	0,5	<0,03
Zinco (mg.L <sup>-1</sup> )	0,006	5	0,04
Aldrin e Dieldrin (mg.L <sup>-1</sup> )	2 x 10 <sup>-5</sup>	3 x 10 <sup>-5</sup>	< L.Q
Clordano (mg.L <sup>-1</sup> )	0,0002	2 x 10 <sup>-4</sup>	< L.Q
2,4-D (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	0,03	< L.Q
DDT 2,4-D (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	2 x 10 <sup>-3</sup>	< L.Q
Endrin	0,0002	6 x 10 <sup>-4</sup>	< L.Q
Fenóis totais	0,0011	0,01	0,035
Hepctacloro e seu epóxido (mg.L <sup>-1</sup> )	2 x 10 <sup>-5</sup>	3 x 10 <sup>-5</sup>	< L.Q
Hexaclorobenzeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	1 x 10 <sup>-3</sup>	< L.Q
Lindano (g BHC) (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	2 x 10 <sup>-3</sup>	< L.Q
Metoxicloro (mg.L <sup>-1</sup> )	0,001	0,02	< L.Q
2,4,5-T (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	2 x 10 <sup>-3</sup>	< L.Q
Toxafeno (mg.L <sup>-1</sup> )	0,002	5 x 10 <sup>-3</sup>	< L.Q
2,4,5-TP (mg.L <sup>-1</sup> )	0,01	0,03	< L.Q

ND – não detectado

&lt; L.Q - abaixo do limite de quantificação

O ensaio de lixiviação do lodo tipo B teve duração de 18 horas, tendo sido coletado 2 L de extrato lixiviado. Os extratos lixiviado e solubilizado apresentaram pH na ordem de 5. O extrato solubilizado apresentou teor de umidade de 12%.

Em relação as análises do lodo tipo B (Tabela 29 e Tabela 30) foram obtidos os seguintes resultados:

- Lixiviado: os parâmetros analisados no lixiviado apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo F da NBR 10.004 (2004);

- Solubilizado: com exceção do parâmetros manganês e fenóis totais, os parâmetros analisados apresentaram concentrações adequadas às indicadas no Anexo G da NBR 10.004 (2004).

Por apresentar constituintes que são solubilizados em concentrações superiores aos limites estabelecidos no Anexo G da NBR 10.004 (2004), os lodos tipos A e B foram classificados como resíduo Classe II A – Não inertes.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos protótipos em escala reduzida forneceram subsídios e parâmetros técnicos importantes para aplicação em ensaios em escala piloto e conseqüentemente para projetos em escala real, especialmente em relação à qualidade da água drenada ao longo do tempo, às porcentagens de volume de drenados que atenderam às condições estabelecidas, à taxa de aplicação de sólidos - TAS, taxa de aplicação volumétrica - TAV e densidade da manta geotêxtil.

De modo geral, nas condições de estudo, independente do tipo de lodo (tipo A ou B), o sistema de desaguamento de lodos de decantadores de ETAs composto por leitos de drenagem / secagem com uso de manta geotêxtil apresentou resultados promissores quanto aos aspectos quali / quantitativos de eficiência:

- Na fase de drenagem, por possibilitar a produção de águas drenadas com qualidade compatível para enquadramento em relação à classificação de corpos de água doce (classes I e II) estabelecidos pela Resolução 357/05 do Conama, visando à proteção dos corpos hídricos receptores ou ainda pela possibilidade de reaproveitamento da água drenada para produção de água tratada na própria ETA;
- Na fase de secagem, por possibilitar a redução do volume ou aumento da concentração de sólidos da torta de lodo retido sob condições críticas de secagem – condição natural de inverno sem proteção à interpéries, em 5 dias, com valores de concentrações de sólidos da mesma ordem de grandeza que os obtidos por desaguamentos mecânicos, possibilitando assim a finalização do desaguamento do lodo em 7 dias.

Os resultados da caracterização qualitativa nas fases de drenagem e secagem para os lodos de estudo mostraram algumas particularidades, especialmente em relação à(s):

- predominância de elevadas concentrações de ferro e alumínio na fração particulada, devido ao emprego de diferentes coagulantes químicos nos lodos tipos A e B, respectivamente;

- variações nas contagens de coliformes totais e de *E. Coli*, em função das dosagens de cloro e alterações na qualidade da água bruta da ETA associada ao lodo tipo A;
- resistência específica e velocidades de sedimentação diferenciadas para os lodos tipos A e B.

Apesar da turbidez ser um parâmetro indireto e inespecífico, seu uso como parâmetro de controle de eficiência possibilitou a sistematização dos resultados em relação à qualidade da água drenada, a comprovação de que o lançamento direto da produção global de drenados poderá trazer impactos negativos aos corpos de água receptores classes I e II.

Independentemente da escala adotada, a qualidade do drenado do lodo tipo B foi sistematicamente melhor comparado ao do lodo tipo A, resultando em porcentagens de volume de drenados que atenderam às condições estabelecidas mais elevadas, o que pode estar relacionado à qualidade da água bruta e / ou produtos químicos aplicados no tratamento de água.

Na escala piloto – Etapa II, as porcentagens de volume de drenado que atenderam às condições de enquadramento I e II e de reaproveitamento III foram de 66%, 69% e 62% para o lodo tipo A e de 84%, 89% e 71% para o lodo tipo B.

O desaguamento em escala piloto – Etapa II, proporcionou para o lodo tipo A, redução mínima da concentração de ferro total de 90,8% na amostra composta referente a condição IV e máxima de 99,93% na amostra composta referente a condição III. Para o lodo tipo B a redução mínima da concentração de alumínio total foi de 99,83% na amostra composta referente a condição IV e máxima de 99,97% na amostra composta referente a condição I, o que comprovam a elevada eficiência do sistema de desaguamento.

O desaguamento em escala piloto – Etapa II, quando comparado aos resultados obtidos na escala reduzida – Etapa I, favoreceu a extinção da lâmina líquida na fase de drenagem, sem alterações significativas na qualidade do drenado e tortas de lodo produzidos.

Os resultados obtidos na fase de secagem das tortas de lodo em condições naturais de exposição, mostraram que além da temperatura e umidade relativa do ar, outros fatores físicos e climáticos, como a incidência de radiação solar e exposição à ventilação, favorecem a secagem do lodo.

O uso da manta geotêxtil em sucessivos ensaios de desaguamento não influenciou significativamente na eficiência do sistema em relação à qualidade do drenado produzido e tampouco à duração da fase de drenagem.

O ensaio em colunas de lixiviação revelou que em relação aos aspectos analisados nesse estudo, os lodos de ETAs desaguados podem ser dispostos como cobertura de células em aterro sanitário, uma vez que os metais presentes não foram disponibilizados quando em contato com a água, mesmo para a condição crítica de precipitação aplicada, e portanto, muito provavelmente não oferecerão riscos ao meio ambiente.

Em relação à classificação dos lodos de ETAs segundo a NBR 10.004 (2004), os lodos tipos A e B foram classificados como resíduo Classe II A – Não inertes por apresentar constituintes que foram solubilizados em concentrações superiores aos limites estabelecidos no Anexo G da NBR 10.004 (2004).

## 7 RECOMENDAÇÕES

- Avaliar o desaguamento de lodo de ETA em leitos de drenagem / secagem em escalas maiores que as utilizadas neste trabalho;
- Avaliar os parâmetros de projeto aplicados considerando a variação das concentrações de sólidos em escala real;
- Avaliar a toxicidade do lodo inicial e da água drenada por meio de bioensaios utilizando organismos aquáticos padronizados.

**BIBLIOGRAFIA**

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. **NBR 10.004** – Resíduos sólidos - Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. **NBR 10.005** – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. **NBR 10.006** – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS – ABNT. **NBR 13373**: Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica – Método de ensaio com *Ceriodaphnia* spp (Cladocera, Crustacea), Rio de Janeiro, 2005.

APHA, AWWA, WEF, **Standard Methods For The Examination Of Water & Wastewater**, 21st Edition, 2005.

ANDRADE, P. S. **Avaliação do impacto ambiental da utilização de resíduos de estações de tratamento de água em indústrias de cerâmica vermelha: Estudo de caso**. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2005.

ALMEIDA, H. **Comunicação sobre ensaios realizados visando a utilização de lodo decantado como auxiliar de tratamento**. Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Salvador, 1975.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS; U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Management of Water Treatment Plant Residuals. American Society of Civil Engineers, New York, 1996.

ACHON, C. L., CORDEIRO, J. S. **Análise crítica de implantação de sistemas naturais de remoção de água livre de lodo de ETA.** 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville, Santa Catarina, 2003.

ACHON, C. L., BARROSO, M. M., CORDEIRO, J. S. **Desempenho do Leito de Drenagem para Desaguamento de Lodo de ETA que utilizam diferentes coagulantes considerando as variáveis climáticas.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

ACHON, C. L., MEGDA, C. R., SOARES, L. V. **Impactos ambientais provocados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Campo Grande – MS, 2005.

ACHON, C. L., BARROSO, M. M., CORDEIRO, J. S. **Leito de Drenagem : Sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 13, jan/mar 2008.

BARROSO, M. M. **Problemática dos metais e sólidos no tratamento de água (Estação Convencional de Ciclo Completo) e nos resíduos gerados.** Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos –SP, 2002.

BARROSO, M. M. **Influência das micro e macropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas nos Desaguamento por Leito de Drenagem.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2007.

BARBOSA, R.M. **Avaliação do impacto de efluentes (lodos) de ETAs a biota aquática através de testes de toxicidade.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, 2000.

BARBOSA, R. M., POVINELLI, J., ROCHA, O., ESPÍNDOLA, E. L. G. **A toxicidade de despejos (lodos) de estações de tratamento de água à Daphnia similis (cladocera, crustacea).** XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre – RS, 2000.

BARBOSA, M. J. **Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares**. Tese de doutorado apresentada a Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de doutor em Engenharia, Florianópolis, SC, 1997.

BRASIL. Crimes Ambientais: **Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998** – Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF, 1998.

BRASIL. Saneamento Básico. **Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes sobre saneamento básico e dá outras providências. Brasília, DF, 2007.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914 de 14 de dezembro de 2011**.. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Política Nacional do Meio Ambiente. **Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF, 1981.

BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. **Lei nº 9.433 de janeiro de 1997**. Instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento do Recursos Hídrico. Brasília, DF, 1997.

BRASIL. Política Nacional dos Resíduos Sólidos. **Lei 12.305 de agosto de 2010**. Instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 357 de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005.

CORNWELL, D. A. **Water treatment plant waste management**. Denver. Environmental Engineering & Technology, Inc., AWWA Research Foundation, 1987.

CARVALHO, E. H. **Disposição de resíduos de estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto com decantação primária**. Tese de Doutorado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000

CHAO, I. R. S. **Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água**. Dissertação de Mestrado apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CARVALHO, E. H., DI BERNARDO, L. **Interferência dos despejos de estações de tratamento de água nas estações de tratamento de esgoto**. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Rio de Janeiro – RJ, 1999.

CORDEIRO, J.S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água**. Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento– Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.

CORDEIRO, J. S. **Importância do tratamento e disposição adequada de lodos de ETAs** (Capítulo I). Coordenador: Reali, M. A. P. Noções gerais de tratamento e disposição de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CORDEIRO, J.S. **Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs)**. (Capítulo V). Coordenador: ANDREOLI, C.V. Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB 2, 2001.

CORDEIRO, J. S **Micro propriedades de lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água**. XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Cancun, México, 2002.

DI BERNARDO, L. **Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento.** ABES, Rio de Janeiro, 1995.

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.** Editora Rima, São Carlos – SP, 2002.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água** – Volume I e II, Rima Editora, São Carlos – SP, 2005.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água.** ABES, Rio de Janeiro. 1ª edição, 2008.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D., VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água.** Editora LDiBe, São Carlos – SP, 2011.

FERRANTI, E. M. **Desidratação de Lodos de Estação de Tratamento de água.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

FERREIRA FILHO, S. e ALEM SOBRINHO, P. Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 3/4, p. 128-136, jul/dez. 1998.

FONTANA, A. O. **Sistema de Leito de Drenagem e Sedimentador como solução para redução de volume de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros – Estudo de Caso – ETA Cardoso.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, 2004.

FREITAS, R. A. S. **Comportamento de Geotêxteis como filtro em resíduos – fosfogeno e lama vermelha.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

GRANDIN, S. R. **Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica-USP. Sao Paulo, 1992.

GUERRA, R. C. **Caracterização e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2005.

HAMILTON, M.A.; RUSSO, R.C.; THURSTON, R.V. **Trimmed Spearman-Kärber Method for Estimating Median Lethal Concentration in Toxicity Bioassays.** Environmental Science & Technology, Easton, v.11, n.7, 1977.

LIMA, M. S. P. **Desaguamento de lodo de ETAs por leito de drenagem com mantas geotêxteis em escala reduzida.** Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, 2010.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** Editora Átomo, 3º ed. Campinas – SP, 2010.

LOPES, L. N. A.; MACHADO, L. C. G. T.; LIMA, R. F.; PEREIRA, J. A. R. **Avaliação do desaguamento de lodo de ETA em leito de secagem.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Campo Grande – MT, 2005.

MACHADO, R.; LUCENA, C. L.; VIEIRA, E. L. **Análise comparativa entre leitos de secagem tradicional e modificado na desidratação de lodo de estações de tratamento de água.** XXX Congresso de La Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – AIDIS, Punta Del Leste, 2006.

MELO, A. A., LOVO, E. BUENO, R. C. R., NAPOLITANO, V. P. O. **Impactos do recebimento de lodos de ETA em uma ETE.** 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Joinville- SC, 2003.

MEGDA, C. R., SOARES, L. V., ACHON, C. L. **Propostas de aproveitamento de lodos gerados em ETAs.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Campo Grande – MT, 2005.

MORITA, D. M.; SAMPAIO, A. O.; MIKI, M. K.; DAVID, A. C. **Incorporação de lodos de estações de tratamento de água em blocos cerâmicos.** Revista SANEAS, v. 14. São Paulo, 2002.

MENDES, R. L. **Adensamento e desaguamento mecânicos de lodos gerados em estações de tratamento de água.** Dissertação de Mestrado apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

MACEDO, J. G. **Desaguamento de lodo de ETAs por leito de drenagem com mantas geotêxteis – Escalas piloto e reduzida.** Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

OLIVEIRA, N. S. **Estudo da secagem de lodo de estação de tratamento de água.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

REALI, M. A. P.. **Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs.** (Capítulo II). Coordenador: Reali, M. A. P. Noções gerais de tratamento e disposição de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

RIBEIRO, F. L. M. **Quantificação e caracterização química dos resíduos da ETA Itabirito – MG.** Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2007.

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

RICHTER, C. A.; AZEVEDO, de. J. M. **Tratamento de Água: tecnologia atualizada**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2003.

RODRIGUEZ, T. T.; TEIXEIRA, R. S. FERNANDES, F. OLIVEIRA JUNIOR, O. M.; MARTINS, F. B.; DANZIGER, F. A. B. **Estudo da compactação de lodo de ETA para uso em aterros sanitários**. In: VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO, Belo Horizonte, 2011.

SCALIZE, P. S.; DI BERNARDO, L. **Caracterização da água de lavagem de filtros rápidos de estações de tratamento de água e dos sobrenadantes e sedimentos obtidos após ensaios de clarificação utilizando polímero aniônico**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre – RS, 2000.

SCALIZE, P. S. **Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água estações de tratamento de esgoto**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOUZA, F. G. C. **Ocorrência de sólidos e metais na água tratada e nos resíduos gerados em ETA convencional de ciclo completo com descargas diárias**. Dissertação de Mestrado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SILVA JUNIOR, A. P. **Tratabilidade de lodo de decantadores convencional e de alta taxa**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

SANTOS, H. R.; PRADO, G. S.; VIDAL, C. M. S.; MORUZZI, R. B.; CAMPOS, J. R. **Aplicabilidade das Técnicas de Determinação de Tamanho de Partículas em Sistemas de Tratamento de Água e Esgoto Sanitário**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. v.9, n.4, pp.291-300. Out/Dez, 2004

SALES, A., CORDEIRO, J. S. **Imobilização da fase sólida do lodo de estações de tratamento de água (ETAs)**. PROSAB 2 – Resíduos Sólidos de Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. Editora Rima/ Abes, Rio de Janeiro, 2001.

SANTOS, I.S.S., RAMIRES, M. V. V., KAZMIERCZAK, C. S., SILVA, H. C., KERN, A. P., CAMARGO, S. A. **Caracterização e identificação do resíduo: Lodo de Estação de Tratamento do Município de São Leopoldo**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Porto Alegre – RS, 2000.

SÍGOLO, B. J. **Aplicação da geoquímica de superfície na análise da mobilidade e concentração de metais pesados em ambiente tropical**. 1998. 216 p. Tese Livre Docente - Departamento de Geologia Geral do Instituto de Geociências-USP, São Paulo.

TARTARI, R. **Incorporação de lodo gerado na ETA Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha**. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

TEIXEIRA, R. S. **Caracterização e avaliação da contaminação do solo laterítico da área do depósito de resíduos sólidos urbanos de Londrina por metais pesados**. Tese de Doutorado apresentada a Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 1º Ed. São Paulo – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.