

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

**SISTEMA DE REMOÇÃO DE ÁGUA DE LODO GERADO EM  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM DUAS FASES:  
DESAGUAMENTO INICIAL EM LEITO DE DRENAGEM SEGUIDO  
DE BIOSSECAGEM**

**RENAN FELICIO DOS REIS**

São Carlos

2017

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

**SISTEMA DE REMOÇÃO DE ÁGUA DE LODO GERADO EM  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM DUAS FASES:  
DESAGUAMENTO INICIAL EM LEITO DE DRENAGEM SEGUIDO  
DE BIOSSECAGEM**

**RENAN FELICIO DOS REIS**

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

Orientação: Prof. Dr. João Sergio Cordeiro

São Carlos

2017

Reis, Renan Felício dos

Sistema de Remoção de Água de Lodo Gerado em Estação de Tratamento de Esgoto com Duas Fases: Desaguamento Inicial em Leito de Drenagem Seguido de Biossecagem / Renan Felício dos Reis. -- 2017.

255 f. : 30 cm.

Tese (doutorado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador: João Sérgio Cordeiro

Banca examinadora: Xavier Font, Marcelo Zaiat, Cali Laguna Achon,

Jorge Akutsu

Bibliografia

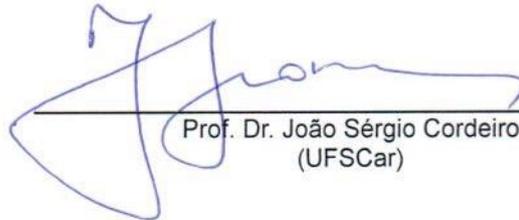
1. Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto. 2. Leito de Drenagem. 3. Biossecagem. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.



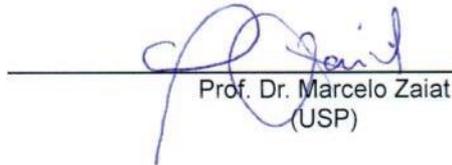
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

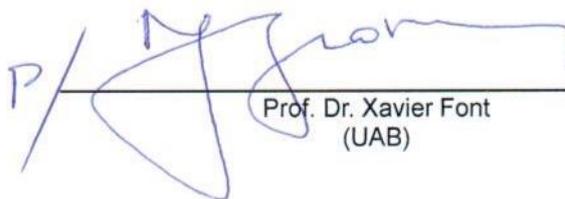
Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a defesa de tese de doutorado do candidato Renan Felício dos Reis, realizada em 26/05/2017:



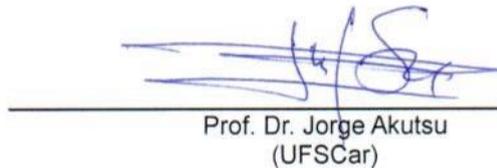
Prof. Dr. João Sérgio Cordeiro  
(UFSCar)



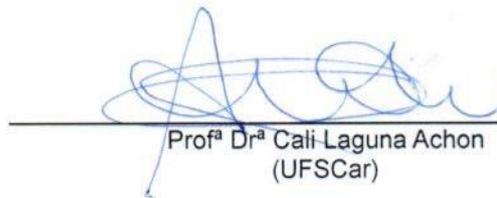
Prof. Dr. Marcelo Zaiat  
(USP)



Prof. Dr. Xavier Font  
(UAB)



Prof. Dr. Jorge Akutsu  
(UFSCar)



Profª Drª Cali-Laguna Achon  
(UFSCar)

Certifico que a sessão de defesa foi realizada com a participação à distância do membro Prof. Dr. Xavier Font e, depois das arguições e deliberações realizadas, o participante à distância está de acordo com o conteúdo do parecer da comissão examinadora redigido no relatório de defesa do aluno Renan Felício dos Reis.



Prof. Dr. João Sérgio Cordeiro  
Presidente da Comissão Examinadora  
(UFSCar)

*Dedico este trabalho à minha esposa, Miriã, e aos  
meus filhos, Rebeca e Samuel*

## AGRADECIMENTOS

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

À minha esposa, Miriã, que está sempre presente, me auxiliando, apoiando e torcendo pelo meu sucesso. Certamente minhas conquistas não ocorreriam sem ela em minha vida.

Aos meus filhos Rebeca e Samuel, que me ensinam a cada dia o significado de carinho, amor e cuidado com o jeito abençoado que têm.

À minha mãe, Vanda (*in memoriam*), por ter sido uma educadora diferenciada e de reconhecida excelência na arte de ensinar, em quem me inspiro atualmente na função de professor.

Ao meu pai, Osvaldo, pela prestatividade indescritível, amor, paciência, confiança e incentivo.

Ao meu irmão, Deyvison, de quem muito me orgulho e agradeço pela amizade e carinho que sempre demonstrou por mim e minha família. À minha cunhada, Joana, sobrinhas e sobrinho por me proporcionarem ainda mais alegria na tarefa de tio e pela proximidade e torcida de sempre.

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

À parceira de pesquisa, aconselhadora, incentivadora, auxiliadora e professora Dr<sup>a</sup>. Cali Laguna Achon por toda contribuição e acreditação prestados durante os trabalhos experimentais realizados neste período de doutorado.

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

em forma de pesquisa científica. Em especial, agradeço aos professores Dr. Jorge Akutsu e Dr. Erich Kellner do DECiv/UFSCar e professor Dr. João E. M. Perea Martins da UNESP, câmpus de Bauru-SP.

Ao Eng. MSc. André Estêvão Silva, em nome da Huesker Ltda., que forneceu as mantas geotêxteis para realização dos ensaios de desaguamento em leito de drenagem.

Ao professor, amigo e orientador durante o período no exterior Dr. Xavier Font, que foi um dos grandes responsáveis por despertar ideias e desafios que resultaram na elaboração desta tese.

À pesquisadora de pós-doutorado Raquel Barrena Gómez, que foi fundamental no acompanhamento e auxílio dos trabalhos desenvolvidos durante o período na *UAB*, junto ao *GICOM*. Ao prof. Dr. Dimitrios Komillis da *Democritus University of Thrace* por toda ajuda prestada durante o período de PDSE, e a todos os colegas de trabalho do grupo *GICOM*, da *UAB*, em especial, ao Oscar Mauricio Martínez Avila, Natividad Almeira, Pedro Jiménez Peñalver e Ahmad Mohamed Ahmad Abo Markeb.

Aos alunos de Iniciação Científica, Paulo Ricardo Santos Coimbra e Tayná Barros Mazer Lucatti, que foram fundamentais para a condução dos ensaios realizados no Brasil, na UFSCar.

Aos funcionários do SAAE (ETE Monjolinho – São Carlos), por toda contribuição, compreensão e disposição que demonstraram em relação ao desenvolvimento do presente trabalho, a mim e ao restante da equipe pesquisadora que coleta material da ETE para estudo.

Aos amigos do PPGEU/UFSCar pela confiança e torcida.

A todos meus familiares, amigos e colegas que me incentivaram e apoiaram nos “altos e baixos” vividos por mim como doutorando.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e ao Antonio Carlos Pepino pela ajuda, paciência, prestatividade, apoio e auxílios confiados a mim para desenvolver esta pesquisa e crescer em experiência, conhecimento e *network*.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa e apoio financeiro para realização desta pesquisa no período desenvolvido no Brasil e em Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE).

*“É o Senhor quem dá sabedoria; a sabedoria  
e o entendimento vêm dEle.”*

(Provérbios 2:6)

## RESUMO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) têm se destacado cada vez mais por aspectos quantitativos de produção ou por necessidade de se desenvolver oportunidades para sua gestão sustentável (ex. PNRS). Dentre os RSU insere-se o lodo de ETE que apresenta basicamente duas problemáticas principais: necessidade de remoção de água (extremamente úmido/fluido) e aproveitamento. Buscando contribuir com tais necessidades, a presente pesquisa foi conduzida a partir de ensaios de remoção de água referentes à etapa de desaguamento e de secagem de lodo de esgoto. Em relação à primeira, utilizou-se protótipos de Leito de Drenagem (LD) em escala laboratorial (estudos de drenagem) e em escala piloto (estudos de evaporação). Foi utilizado lodo anaeróbio proveniente de reator UASB, cujos resultados de desaguamento referentes aos estudos de drenagem, variando três tipos de manta geotêxteis e altura da camada de lodo, demonstraram que a manta HaTe<sup>®</sup> 55/55 UV apresentou maior capacidade de drenagem, embora os resultados das análises referentes à qualidade do drenado tenham sido os de menor qualidade no que se refere à cor aparente, turbidez e condutividade em relação às demais mantas experimentadas. Nos estudos da fase de evaporação do LD foi possível verificar e discutir a relação das variáveis climáticas com a perda de umidade, principalmente no que se refere à precipitação, umidade relativa do ar e temperatura. Além disso, devido à realização de revolvimento, observou-se que, quando é realizado, obtém-se maior teor de Sólidos Totais (ST) na amostra de lodo em menor tempo do que quando não se faz o revolvimento. No que se refere à etapa de secagem, foram realizados experimentos de biossecagem, cujos métodos e resultados foram separados em exterior e Brasil. Nos ensaios conduzidos no exterior (14 dias de duração) foi utilizado lodo misturado (originado de processo de tratamento anaeróbio, anóxico e aeróbio) e cavaco de madeira ( $\leq 7,1\text{mm}$ ) como estruturante, na proporção de 2:1 (v/v). Os resultados mostraram que o processo de biossecagem promove a remoção de água ligada (intersticial, superficial e intracelular) do lodo e que a realização de revolvimento durante o processo de biossecagem é fundamental para retomar a atividade biológica e, assim, aumentar novamente a temperatura e obter amostra final com maior teor de ST. Ao final, o reator que resultou em produto biosseco com maior teor de ST (reator Biossecagem II) alcançou 63,1% de ST, com Poder Calorífico Superior (PCS) de 17551,9kJ/kg<sub>ST</sub>, sendo superior a muitos parâmetros encontrados na literatura consultada. Quanto aos ensaios de biossecagem conduzidos no Brasil (UFSCar), estes duraram 20 dias e se deram com lodo anaeróbio (UASB) previamente desaguado em LD, misturados com cavacos de madeira (entre 5 e 15mm) na proporção 5:4 (v/v), com revolvimentos no 6º, 12º, 15º e 18º dias. Os resultados também comprovaram a ocorrência de atividade biológica, contudo não alcançou condições termofílicas. A este comportamento sugeriu-se como causa a utilização de lodo desaguado em sistema natural (LD) ou lodo anaeróbio, ambas situações ainda não relatadas na literatura para processo de biossecagem. No reator com melhor comportamento (reator Biossecagem B) obteve-se teor de ST final de 47,4%, com PCS de 14661kJ/kg<sub>ST</sub> e Poder calorífico Inferior (PCI) de 14659,9kJ/kg<sub>ST</sub>. Além disso, este trabalho relata e compila dados de ensaios de biossecagem de lodo de esgotos encontrados na literatura em uma tabela síntese, discutindo e comparando as diversas variáveis e suas implicações no processo, permitindo contribuir no que se refere ao controle e entendimento da biossecagem, além de demonstrar a importância e ganhos advindos da gestão adequada deste resíduo.

**Palavras-chave:** Estação de Tratamento de Esgoto; Lodo; Etapa de Desaguamento; Etapa de Secagem; Leito de Drenagem; Biossecagem; Aproveitamento Energético.

## ABSTRACT

The Municipal Solid Wastes (MSW) has stood out increasingly for quantitative aspects of generation or by necessity to develop opportunities for their sustainable management (e.g. Brazilian PNRS). Among the MSW is the WWTP sludge which basically presents two main problems: necessity of water removal (extremely humid/fluid) and utilization. Seeking to contribute to such necessities, this present research was conducted by water removal assays related to dewatering and drying of sewage sludge steps. In relation to the first, it was used Drainage Bed (DB) prototype in lab scale (studies of drainage) and in pilot scale (studies of evaporation). It was used anaerobic sludge from UASB reactor, whose dewatering results about studies of drainage, varying three types of geotextile blanket and height of sludge layer, showed that the HaTe<sup>®</sup> 55/55 UV blanket brought greater drainage capacity, although the analyses results about drained liquid quality was worse in apparent color, turbidity and conductivity when compared to other blankets experienced. In studies of evaporation in DB it was possible to verify and discuss the relation of climate variables with moisture loss, mainly in relation to precipitation, air relative humidity and temperature. Moreover, due to the turning applied, it was observed that, when is made, higher Total Solids (TS) content is obtained in the sludge sample in shorter time than when the turning is not applied. With regard to the drying step, it was conducted biodrying assays, whose methods e results was separated in abroad and Brazil. In the assays conducted abroad (lasting 14 days) it was used mixed sludge (originated from anaerobic, anoxic and aerobic sewage treatment) and wood chips ( $\leq 7,1\text{mm}$ ) as bulking agent, in proportion of 2:1 (v/v). The results showed that biodrying process promote the removal of bound water (interstitial, surface and intracellular) from sludge and that the turning applying during the biodrying is fundamental to retake biological activity and, thus, increase the temperature again and obtain final sample with higher TS content. At the end, the reactor which resulted in biodried product with higher TS content (reactor Biossecagem II) reached 63,1% of TS, with High Heating Value (HHV) of 17551,9kJ/kg<sub>TS</sub>, being superior to many parameters found in literature consulted. About the biodrying assays conducted in Brazil (UFSCar), they lasted 20 days and was performed using anaerobic sludge (UASB) previously dewatered in DB, mixed with wood chips (5-15mm) in 5:4 (v/v) proportion, with turning in 6<sup>th</sup>, 12<sup>th</sup>, 15<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> days. The results also confirmed the occurrence of biological activity, but did not reached thermophilic conditions. To this behavior, it was suggested as reason the use of dewatered sludge in natural system (DB) or anaerobic sludge, both situations still not reported in the literature for biodrying process. In the reactor with the best behavior (reactor Biossecagem B) it was obtained final TS content of 47,4%, with HHV of 14661kJ/kg<sub>TS</sub> and Low Heating Value (LHV) of 14659,9kJ/kg<sub>TS</sub>. Furthermore, this thesis reports and compiles data from biodrying assays of sewage sludge found in the literature in a synthesis table, as well as discuss and compare the numerous variables and their implications in the process, allowing to contribute to the control and understanding of the biodrying, in addition to demonstrating the importance and gains derived from the proper management of this waste.

**Key-words:** Waste Water Treatment Plant; Sludge; Dewatering Step; Drying Step; Drainage Bed; Biodrying; Energy Utilization.

## Lista de Figuras

<b>Figura 3.1</b> – Ilustração dos quatro componentes que compõem o sistema de saneamento básico.....	32
<b>Figura 3.2</b> – <i>Déficit</i> em afastamento dos esgotos sanitários por macrorregião e Brasil, 2008. ....	34
<b>Figura 3.3</b> – Volume de esgotos coletados e tratados por macrorregião e Brasil, 2008. ....	35
<b>Figura 3.4</b> – Representação e descrição das etapas do tratamento do lodo de ETE no que se refere à remoção de água.....	53
<b>Figura 3.5</b> – Apresentação esquemática da água no lodo de esgoto: A – água livre; B – água intersticial; C – água superficial; D – água intracelular. ....	58
<b>Figura 3.6</b> – Esquema dos métodos de desaguamento de lodo de ETE.....	65
<b>Figura 3.7</b> – Representação esquemática de leito de secagem (corte). ....	66
<b>Figura 3.8</b> – Leitos de secagem – ETA de Nova Odessa-SP. ....	68
<b>Figura 3.9</b> – Leito de secagem, ETE de São Domingos das Dores (MG).....	68
<b>Figura 3.10</b> – Esquema da evolução do leito de secagem tradicional (esquerda) para o leito de drenagem (direita). ....	69
<b>Figura 3.11</b> – Protótipos de leitos solares (esquerda) e vista interior do leito (direita). ....	71
<b>Figura 3.12</b> – Vista esquemática do protótipo de secagem solar coberto. ....	72
<b>Figura 3.13</b> – Bags instalados na ETE de Presidente Prudente – SP. ....	73
<b>Figura 3.14</b> – Corte do tecido para remoção dos sólidos de um bag. ....	74
<b>Figura 3.15</b> – ETE Limoeiro (Presidente Prudente-SP), com destaque (vermelho) para a extensa área ocupada pelos bags utilizados para desaguamento do lodo. Imagem de 26/08/2016.....	75
<b>Figura 3.16</b> – Representação de filtro prensa de esteira.....	77
<b>Figura 3.17</b> – Representação de centrífuga. ....	78
<b>Figura 3.18</b> – Fenômeno eletrocinético durante o desaguamento.....	80
<b>Figura 3.19</b> – Esquema dos métodos de secagem de lodo de ETE. ....	82
<b>Figura 3.20</b> – Exemplos representativos de alguns secadores industriais convectivos de lodo: (a) secador de correia, (b) secador de flash, (c) secador de leito fluidizado, (d) secador rotativo. ....	83

- Figura 3.21** – Exemplos representativos de alguns secadores industriais condutivos de lodo: (a) secador de disco, (b) secador de pás, (c) secador de filme fino..... 84
- Figura 3.22** – Esquema simplificado do processo de compostagem..... 87
- Figura 3.23** – Exemplo genérico da evolução da temperatura de uma leira em compostagem. .... 88
- Figura 3.24** – Principais tecnologias de secagem térmica existentes..... 90
- Figura 3.25** – Esquema representativo de um secador térmico de aquecimento: secagem condutiva por agitação. .... 92
- Figura 3.26** – Esquema representativo de um secador térmico de aquecimento: secagem em tambor..... 92
- Figura 3.27** – Curvas de remoção de água de sistema modificado por Cordeiro (1993) e remodelado em 2000. .... 112
- Figura 3.28** – Protótipo leito de drenagem – Vista frontal..... 112
- Figura 3.29** – Protótipo leito de drenagem..... 112
- Figura 3.30** – Planta baixa do protótipo leito de drenagem. .... 113
- Figura 3.31** – Vista perspectiva do protótipo leito de drenagem. .... 113
- Figura 3.32** – Leito de drenagem construído na ETA de Cardoso-SP. Sequência ilustrando (a) o despejo do lodo no leito; (b) a água livre drenada; (c) o lodo “seco”. .... 114
- Figura 3.33** – ETA de Guanhães-MG: (a) despejo de lodo em leito de drenagem; (b) leito de drenagem com lodo bruto; (c) remoção de lodo desaguado; (d) leito de drenagem pronto para receber novo despejo. .... 114
- Figura 3.34** – Leito de drenagem ETA de Guaíra-SP: (a) disposição da manta geotêxtil; (b) leitos cheios; (c) leito de drenagem com lodo desaguado; (d) lodo “seco”. .... 115
- Figura 3.35** – Representação de aparato experimental para biossecagem de lodo. .... 121
- Figura 3.36** – Estrutura do experimento de biossecagem de lodo de esgoto (unidade: m)... 123
- Figura 3.37** – Análise de mapa de aquecimento de comunidades bacterianas, mostrando sua distribuição em nível de filo. O agente estruturante (BA – *Bulking Agent*) e o lodo de esgoto (SS – *Sewage Sludge*) foram coletados a 22,5°C; as amostras do dia 0 (D0) foram coletadas a 25,5°C e as do 2º dia (D2) foram coletadas a 48,5°C durante a fase mesofílica; as amostras do 6º dia (D6) foram coletadas a 68,3°C durante a primeira fase termofílica; as do 11º dia (D11) foram coletadas a 50,3°C durante a segunda fase termofílica; no 16º dia (D16) coletou-se as amostras a 38,7°C durante a fase de esfriamento; e, por fim, no 20º dia (D20) foram coletadas a 21,9°C que correspondeu ao final do processo de biossecagem..... 126
- Figura 3.38** – Representação sumarizada dos procedimentos e resultados obtidos, e estrutura da área do experimento de biossecagem de lodo de esgoto. .... 129

- Figura 3.39** – Taxa de remoção de água, teor de umidade, ou sólidos voláteis na biossecagem de lodo de esgoto. a – Taxa de remoção de água durante o processo de biossecagem de lodo de esgoto. As áreas separadas por linhas tracejadas são: I – fase mesofílica, II – primeira fase termofílica, III – segunda fase termofílica, e IV – fase de resfriamento. b – Teor de umidade e teor de sólidos voláteis na biossecagem de lodo de esgoto. .... 131
- Figura 4.1** – Reator semi-hermético de 10L de capacidade, utilizado no experimento de biossecagem. .... 154
- Figura 4.2** – Reatores semi-herméticos de 10L de capacidade, utilizados no experimento de biossecagem, equipados com sensor de temperatura, e mangueiras de entrada e saída de ar. .... 154
- Figura 4.3** – Reatores semi-herméticos de 10L de capacidade, um de controle (fechado) e dois de biossecagem (abertos após o terceiro dia). .... 154
- Figura 4.4** – Aparato de mangueira com quatro pontos de entrada de ar alocado ao fundo do reator, melhorando a distribuição ao longo da massa, do fundo para o topo. .... 154
- Figura 4.5** – Interface do sistema computacional do *software* utilizado no laboratório do *GICOM*. .... 155
- Figura 4.6** – Rotômetros utilizados para controle da vazão de ar (fixo) após atingir a máxima temperatura (apenas dois em utilização). .... 155
- Figura 4.7** – Lodo de esgoto misturado (anaeróbico, anóxico e aeróbico) e desaguado em centrífuga, da ETE *Bèsos*, Barcelona, Espanha. .... 156
- Figura 4.8** – Madeira triturada e peneirada utilizada como material estruturante ( $\leq 7,10\text{mm}$ ). .... 156
- Figura 4.9** – Peneira utilizada para peneirar a madeira de *pallets* triturada, com abertura de 7,10mm. .... 157
- Figura 4.10** – Três protótipos de leito de drenagem em escala piloto alocados ao lado do reator UASB, para estudo da evaporação (um com capacidade volumétrica de 260L e dois com 50L). .... 158
- Figura 4.11** – Protótipos de leito de drenagem em escala piloto (menores). .... 158
- Figura 4.12** – Protótipo de leito de drenagem em escala piloto (maior). .... 158
- Figura 4.13** – Protótipos de leito de drenagem em escala laboratorial, para estudo da drenagem das mantas (com capacidade volumétrica de 25L). .... 158
- Figura 4.14** – Hate<sup>®</sup> 55/55 UV. .... 159
- Figura 4.15** – Hate<sup>®</sup> 80/80 UV. .... 159
- Figura 4.16** – Hate<sup>®</sup> 105/105 DW. .... 159
- Figura 4.17** – Reator semi-hermético com sensor de temperatura ao centro e mangueiras de entrada e saída de ar. .... 160

<b>Figura 4.18</b> – Reatores semi-herméticos utilizados nos experimentos de biossecagem no Brasil. ....	160
<b>Figura 4.19</b> – Tampa do reator de biossecagem ilustrando canais de entrada e saída de ar e local para sensor de temperatura. ....	160
<b>Figura 4.20</b> – Interface do <i>software</i> específico utilizado para monitoramento da temperatura interna nos reatores semi-herméticos. ....	161
<b>Figura 4.21</b> – Rotômetros utilizados para controle da vazão de ar. ....	161
<b>Figura 4.22</b> – Lodo anaeróbico previamente desaguado em leito de drenagem (sistema natural). ....	162
<b>Figura 4.23</b> – Material estruturante (cavaco de madeira) com dimensões entre 5 e 15mm..	162
<b>Figura 4.24</b> – Fluxograma geral resumido dos métodos realizados para elaboração da tese, com destaque para quatro tópicos principais (cinza). ....	164
<b>Figura 4.25</b> – Fluxograma representando os métodos adotados para os experimentos conduzidos no exterior. ....	166
<b>Figura 4.26</b> – Representação da configuração do experimento conduzido no exterior. ....	168
<b>Figura 4.27</b> – Representação esquemática do experimento de biossecagem conduzido no exterior. ....	168
<b>Figura 4.28</b> – Fluxograma representando os métodos adotados para ensaios da etapa de desaguamento. ....	170
<b>Figura 4.29</b> – Representação dos ensaios conduzidos nos estudos de evaporação em leito de drenagem. ....	172
<b>Figura 4.30</b> – Fluxograma representando os métodos adotados para os experimentos da etapa de secagem conduzidos no Brasil. ....	173
<b>Figura 4.31</b> – Representação da configuração do experimento de biossecagem conduzido na UFSCar. ....	175
<b>Figura 5.1</b> – Esquema geral da estação de tratamento de esgotos de Manresa, Espanha. ....	176
<b>Figura 5.2</b> – Digestor anaeróbico da ETE de Manresa. ....	179
<b>Figura 5.3</b> – Vista lateral de um dos filtros prensa de correia da ETE de Manresa. ....	180
<b>Figura 5.4</b> – Lodo afluente ao filtro prensa de correia. ....	180
<b>Figura 5.5</b> – Lodo efluente ao filtro prensa de correia. ....	180
<b>Figura 5.6</b> – Dois dos três tanques de armazenamento de biogás, ao lado do digestor anaeróbico. ....	181
<b>Figura 5.7</b> – Canais de aeração e revolvimento das leiras de compostagem. ....	184

<b>Figura 5.8</b> – Galpão de armazenamento do composto produzido.....	185
<b>Figura 5.9</b> – Vista aproximada do composto produzido na ETE de Manresa.....	185
<b>Figura 5.10</b> – Esquema representativo do processo de biossecagem da estação de Zutphen (Holanda) incluindo: tratamento mecânico do lodo, reatores de biossecagem, troca de calor para recuperação/reaproveitamento de calor e lavador de gases para recuperação de nitrogênio, bem como filtro/leito biológico para controle de odor. ....	187
<b>Figura 5.11</b> – Centrífuga utilizada para desaguar o lodo afluyente ao processo de biossecagem. ....	188
<b>Figura 5.12</b> – Aspecto do lodo desaguado em centrífuga. ....	189
<b>Figura 5.13</b> – Material estruturante (madeira triturada) utilizado na mistura. ....	189
<b>Figura 5.14</b> – Material (lodo “biosseco”) retido na peneira de 12mm utilizado em nova mistura, retornando ao início do processo.....	189
<b>Figura 5.15</b> – Interior de um reator de biossecagem com preenchimento parcial de mistura lodo:estruturantes. ....	190
<b>Figura 5.16</b> – Interior de um reator após aberto, em processo de remoção da massa para submeter à peneira rotativa. ....	190
<b>Figura 5.17</b> – Leito biológico utilizado para tratamento do ar de saída dos reatores. ....	191
<b>Figura 5.18</b> – Curva de temperatura ao longo do processo de biossecagem, destacando as quatro zonas ao longo da variação deste parâmetro. ....	191
<b>Figura 5.19</b> – Lodo biosseco, chamado biogranulado, após o processo completo de biossecagem. ....	192
<b>Figura 5.20</b> – Apecto do lodo afluyente (lodo “bruto”, à esquerda) e efluente (lodo biosseco ou biogranulado, à direita) ao processo de biossecagem. ....	193
<b>Figura 5.21</b> – Temperatura (°C) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II. ....	195
<b>Figura 5.22</b> – Vazão de ar injetada (mL/min) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II. ....	195
<b>Figura 5.23</b> – Perda de massa acumulada (g) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II. ....	196
<b>Figura 5.24</b> – Teor de ST (%) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II. ....	196
<b>Figura 5.25</b> – Teor de SV (%) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II. ....	197
<b>Figura 5.26</b> – Mistura do lodo com estruturante (proporção volumétrica 2:1).....	201
<b>Figura 5.27</b> – Realização de revolvimento nos reatores denominados Biossecagem. ....	202

<b>Figura 5.28</b> – Reatores após 14 dias de experimento (final do experimento) – Biossecagem I, Biossecagem II e Controle (da esquerda para direita).....	202
<b>Figura 5.29</b> – Aspecto do resíduo processado no reator Biossecagem I.....	202
<b>Figura 5.30</b> – Aspecto do resíduo processado no reator Biossecagem II.....	203
<b>Figura 5.31</b> – Aspecto do resíduo processado no reator Controle. ....	203
<b>Figura 5.32</b> – Estratificação de secagem no reator Controle (fundo do reator acima e topo abaixo).....	204
<b>Figura 5.33</b> – Gráfico da vazão de drenagem (mL/min) nos primeiros 60 minutos dos seis ensaios (A1, A2, B1, B2, C1, C2). ....	209
<b>Figura 5.34</b> – Gráfico do volume drenado acumulado (mL) ao longo dos 120 minutos dos seis ensaios (A1, A2, B1, B2, C1, C2). ....	210
<b>Figura 5.35</b> – Condições climáticas monitoradas para os ensaios da série A. ....	214
<b>Figura 5.36</b> – Condições climáticas monitoradas para os ensaios da série B. ....	214
<b>Figura 5.37</b> – Condições climáticas monitoradas para os ensaios da série C. ....	214
<b>Figura 5.38</b> – Comparação entre a precipitação diária dos ensaios das séries A, B e C.....	215
<b>Figura 5.39</b> – Gráfico do teor de Sólidos Totais em % e da precipitação em mm, em função do tempo para os ensaios da série A. ....	217
<b>Figura 5.40</b> – Gráfico do teor de Sólidos Totais em % e da precipitação em mm, em função do tempo para os ensaios da série B.....	217
<b>Figura 5.41</b> – Gráfico do teor de Sólidos Totais em % e da precipitação em mm, em função do tempo para os ensaios da série C.....	217
<b>Figura 5.42</b> – Comparação entre resultados do teor de Sólidos Totais em % dos ensaios no Leito 1 (h=50cm), EA1, EB1 e EC1. ....	218
<b>Figura 5.43</b> – Comparação entre resultados do teor de Sólidos Totais em % dos ensaios no Leito 2 (h=20cm), EA2, EB2 e EC2. ....	219
<b>Figura 5.44</b> – Comparação entre resultados do teor de Sólidos Totais em % dos ensaios no Leito 3 (h=10cm), EA3, EB3 e EC3. ....	219
<b>Figura 5.45</b> – Camada superficial de lodo ressecada (a) e camada úmida logo abaixo (b). .	221
<b>Figura 5.46</b> – Aspecto do lodo no LD 3 após 21 dias nos ensaios EA3 (a), EB3 (b) e EC3 (c). ....	222
<b>Figura 5.47</b> – Temperatura (°C) x tempo (h) ao longo do experimento de biossecagem para o Reator A e Reator B. ....	227
<b>Figura 5.48</b> – Vazão de ar (L/min.kg <sub>ST</sub> ) x tempo (h) ao longo do experimento de biossecagem para o Reator A e Reator B. ....	227

<b>Figura 5.49</b> – Teor de Sólidos Totais (%) x tempo (h) ao longo do experimento de biossecagem para o Reator A e Reator B.....	227
<b>Figura 5.50</b> – Condensação de água evaporada da massa na parte interna da tampa dos reatores A e B durante o experimento.....	230
<b>Figura 5.51</b> – Aspecto “seco” da parte interna da tampa do Reator A quando da abertura no fim do experimento. ....	230
<b>Figura 5.52</b> – Realização da mistura L:E para início do experimento. ....	232
<b>Figura 5.53</b> – Abertura dos reatores A (esquerda) e B (direita) ao final do experimento.....	232
<b>Figura 5.54</b> – Aspecto do resíduo do Reator A ao final do experimento.....	232
<b>Figura 5.55</b> – Aspecto do resíduo do Reator B ao final do experimento.....	233
<b>Figura 5.56</b> – Aspecto final da amostra de lodo biosseco submetida à análise de PCS.....	237

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 3.1</b> – Volume total de esgoto tratado por dia, por tipo/grau de tratamento, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação – 2008.....	37
<b>Tabela 3.2</b> – Municípios, total e com tratamento do esgoto sanitário realizado nas Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs, por tipo de tratamento, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação – 2008.....	38
<b>Tabela 3.3</b> – Municípios, total e com tratamento do esgoto sanitário realizado nas Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs, por destino do lodo gerado no processo de tratamento do esgoto, segundo as macrorregiões e Unidades da Federação – 2008.....	39
<b>Tabela 3.4</b> – Composição físico-química do lodo de esgotos de acordo com o tipo de tratamento do esgoto (anaeróbico e aeróbico). .....	44
<b>Tabela 3.5</b> – Comparação das concentrações de macronutrientes, e de carbono em lodo de esgotos em diferentes estudos no Brasil.....	44
<b>Tabela 3.6</b> – Presença de metais em lodos de ETEs – estudos de casos brasileiros. ....	45
<b>Tabela 3.7</b> – Concentração de Coliformes Termotolerantes, <i>Salmonellas spp.</i> e ovos de helmintos encontrados no lodo de esgoto em estudos diversos realizados no Brasil. ....	46
<b>Tabela 3.8</b> – Dados de alguns exemplos de implantações em escala real de leito de drenagem em ETAs.....	113
<b>Tabela 3.9</b> – Compilação de dados de ensaios de biossecagem para lodo de esgoto dos artigos existentes até o momento e com acesso a partir da base de dados <i>Web of Science</i> . ....	138
<b>Tabela 4.1</b> – Denominação e definição dos ensaios de desaguamento para os estudos de drenagem (escala laboratorial) em LD.....	170
<b>Tabela 4.2</b> – Denominação e definição dos ensaios de desaguamento para os estudos de evaporação (escala piloto) em LD.....	171
<b>Tabela 5.1</b> – Dados de digestão anaeróbia e geração de energia do ano de 2014, da ETE Manresa, na Espanha. ....	183
<b>Tabela 5.2</b> – Característica do composto gerado no processo de compostagem no ano de 2014, na ETE Manresa, na Espanha.....	186
<b>Tabela 5.3</b> – Resultados das análises de caracterização do lodo desaguado em centrífuga, proveniente de tratamento anaeróbico/anóxico/aeróbico, da ETE Bèsos, Barcelona, Espanha. ....	194
<b>Tabela 5.4</b> – Resultados das análises de ST e SV da mistura 2:1(v/v), sendo lodo:estruturante, antes de iniciar os experimentos simultaneamente nos três reatores. ....	194
<b>Tabela 5.5</b> – Resumo dos resultados dos principais parâmetros analisados, antes e após o processo. ....	205

<b>Tabela 5.6</b> – Resultados das análises de caracterização do lodo anaeróbio (UASB) bruto, da ETE Monjolinho, São Carlos-SP. ....	207
<b>Tabela 5.7</b> – Resultados de análises de Sólidos Totais, Sólidos Fixos, Sólidos Voláteis, cálculo da Taxa de Aplicação de Sólidos e características de cada ensaio. ....	208
<b>Tabela 5.8</b> – Resultados de vazão de drenagem (mL/min) calculada a partir da Equação 4.1 para os seis ensaios (A1, A2, B1, B2, C1, C2). ....	208
<b>Tabela 5.9</b> – Resultados de volume drenado acumulado (mL) para os seis ensaios (A1, A2, B1, B2, C1, C2). ....	210
<b>Tabela 5.10</b> – Resultados referentes à qualidade do drenado ao longo do tempo, para os ensaios de drenagem A1 e A2, utilizando manta HaTe <sup>®</sup> 55/55 UV. ....	211
<b>Tabela 5.11</b> – Resultados referentes à qualidade do drenado ao longo do tempo, para os ensaios de drenagem B1 e B2, utilizando manta HaTe <sup>®</sup> 80/80 UV. ....	212
<b>Tabela 5.12</b> – Resultados referentes à qualidade do drenado ao longo do tempo, para os ensaios de drenagem C1 e C2, utilizando manta HaTe <sup>®</sup> 105/105 DW. ....	212
<b>Tabela 5.13</b> – Resultados de análises de ST, SF e SV a cada série de ensaios. ....	213
<b>Tabela 5.14</b> – Resultados da Taxa de Aplicação de Sólidos para os ensaios das séries A, B e C dos estudos de evaporação. ....	213
<b>Tabela 5.15</b> – Resultados do teor de Sólidos Totais em %, para os ensaios das séries A, B e C referentes aos estudos de evaporação. ....	216
<b>Tabela 5.16</b> – Resultados das análises de caracterização do lodo anaeróbio (UASB) desaguado em leito de drenagem, da ETE Monjolinho, São Carlos-SP. ....	224
<b>Tabela 5.17</b> – Resultados das análises de caracterização da mistura (L:E) utilizada no experimento de biossecagem. ....	225
<b>Tabela 5.18</b> – Comparação dos dados da mistura (L:E) obtidos para o experimento com os levantados na literatura consultada (Tabela 3.9). ....	226
<b>Tabela 5.19</b> – Medida entre superfície da massa interna ao reator e a borda do reator antes e após os respectivos revolvimentos, para os reatores A e B. ....	228
<b>Tabela 5.20</b> – Resultados das análises de teor de ST e SV para a mistura (L:E) antes do início do experimento e para o produto biosseco dos reatores A e B, separadamente. ....	233
<b>Tabela 5.21</b> – Resultados das análises de caracterização do produto biosseco do Reator B após 20 dias de processo de biossecagem. ....	234
<b>Tabela 5.22</b> – Resultados das análises de sulfito, sulfato e metais pesados do produto biosseco do Reator B após 20 dias de processo de biossecagem. ....	235
<b>Tabela 5.23</b> – Resultados das análises elementares (C, H, N) e de Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) do produto biosseco do Reator B após 20 dias de processo de biossecagem. ....	236

---

**Tabela 5.24** – Valores de PCS e PCI de alguns materiais comumente utilizados em estções de incineração para geração de energia..... 237

## Lista de Quadros

<b>Quadro 3.1</b> – Principais grupos de micro-organismos patogênicos encontrados no lodo de esgoto. ....	45
<b>Quadro 3.2</b> – Vantagens e desvantagens do uso de leitos de secagem. ....	67
<b>Quadro 3.3</b> – Vantagens e desvantagens de alguns métodos de secagem de lodo de ETE. ...	95
<b>Quadro 3.4</b> – Análise SWOT dos métodos de aproveitamento energético do lodo de esgoto. ....	108
<b>Quadro 3.5</b> – Artigos obtidos em busca na plataforma <i>Web of Science</i> para biossecagem de lodo de esgoto.....	136
<b>Quadro 3.6</b> – Artigo extra obtido em busca na plataforma <i>Web of Science</i> para biossecagem de lodo de esgoto.....	137
<b>Quadro 3.7</b> – Legislações vigentes sobre lodos. ....	148

## Lista de Siglas e Abreviaturas

<b>B1</b>	Reator Biossecagem I (exterior)
<b>B2</b>	Reator Biossecagem II (exterior)
<b>b.u.</b>	Base úmida ( <i>wet basis</i> )
<b>C</b>	Reator Controle (exterior)
<b>Ca</b>	Cálcio
<b>Cd</b>	Cádmio
<b>CDR</b>	Combustível Derivado de Resíduo
<b>COT</b>	Carbono Orgânico Total
<b>Cr</b>	Cromo
<b>Cu</b>	Cobre
<b>C/N</b>	Relação Carbono/Nitrogênio
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxigênio
<b>DECiv</b>	Departamento de Engenharia Civil
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxigênio
<b>EAL</b>	Espaço de Ar Livre
<b>ETA</b>	Estação de Tratamento de Água
<b>ETE</b>	Estação de Tratamento de Esgoto
<b>Fe</b>	Ferro
<b>GEE</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>GICOM</b>	Grupo de pesquisa em compostagem (UAB)
<b>Hg</b>	Mercúrio
<b>INMET</b>	Instituto Nacional de Meteorologia
<b>K</b>	Potássio
<b>LD</b>	Leito de Drenagem
<b>L:E</b>	Lodo:Estruturante
<b>Mg</b>	Magnésio
<b>m/m</b>	Massa por massa
<b>Ni</b>	Níquel

<b>NTU</b>	Unidade de Turbidez Nefelometric
<b>N amoniacal</b>	Nitrogênio amoniacal
<b>N total</b>	Nitrogênio total
<b>OUR</b>	Taxa de consumo de oxigênio ( <i>Oxygen Uptake Rate</i> )
<b>P</b>	Fósforo
<b>Pb</b>	Chumbo
<b>PCI</b>	Poder Calorífico Inferior
<b>PCS</b>	Poder Calorífico Superior
<b>PDSE</b>	Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior
<b>pH</b>	Potencial hidrogeniônico
<b>PNRS</b>	Política Nacional de Resíduos Sólidos
<b>PPGEU</b>	Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana
<b>Qar</b>	Vazão de ar
<b>RSU</b>	Resíduos Sólidos Urbanos
<b>SAAE</b>	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
<b>SF</b>	Sólidos Fixos
<b>SPE</b>	Substâncias Poliméricas Extracelulares
<b>ST</b>	Sólidos Totais
<b>SV</b>	Sólidos Voláteis
<b>TAS</b>	Taxa de Aplicação de Sólidos
<b>TMB</b>	Tratamento Mecânico-Biológico
<b>UAB</b>	<i>Universitat Autònoma de Barcelona</i>
<b>UASB</b>	Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente
<b>UFSCar</b>	Universidade Federal de São Carlos
<b>UNESP</b>	Universidade Estadual Paulista
<b>v/v</b>	Volume por volume
<b>WPCF</b>	<i>Water Pollution Control Federation</i>
<b>Zn</b>	Zinco

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>29</b>
2.1. OBJETIVO GERAL .....	29
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	29
2.3. OBJETIVOS COMPLEMENTARES .....	29
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>31</b>
3.1. TRATAMENTO DE ESGOTO.....	31
<b>3.1.1. Panorama no Brasil .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.2. Tipologias de tratamento.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.3. Desafios para o sistema.....</b>	<b>40</b>
3.2. LODO DE ETE.....	41
<b>3.2.1. Lodo Aeróbio.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.2. Lodo Anaeróbio.....</b>	<b>49</b>
3.3. TRATAMENTO DA FASE SÓLIDA EM ETE .....	50
<b>3.3.1. Adensamento .....</b>	<b>59</b>
<b>3.3.2. Digestão.....</b>	<b>59</b>
3.3.2.1. <i>Digestão Aeróbia.....</i>	<i>61</i>
3.3.2.2. <i>Digestão Anaeróbia.....</i>	<i>61</i>
<b>3.3.3. Desaguamento .....</b>	<b>63</b>
3.3.3.1. <i>Desaguamento Natural .....</i>	<i>66</i>
<b>Leito de secagem.....</b>	<b>66</b>
<b>Leito de drenagem.....</b>	<b>68</b>
<b>Leito Solar .....</b>	<b>70</b>
<b>Bags.....</b>	<b>73</b>
3.3.3.2. <i>Desaguamento Mecânico .....</i>	<i>75</i>
<b>Filtração .....</b>	<b>75</b>
<b>Centrífuga .....</b>	<b>77</b>
<b>Eletrocínético .....</b>	<b>79</b>
<b>3.3.4. Secagem.....</b>	<b>81</b>
3.3.4.1. <i>Método Convectivo.....</i>	<i>82</i>

3.3.4.2. Método Condutivo.....	83
3.3.4.3. Método Solar.....	85
3.3.4.4. Método Biológico.....	85
<b>Compostagem</b> .....	86
<b>Biossecagem</b> .....	89
3.3.4.5. Método Térmico.....	89
<b>Aquecimento Convencional</b> .....	91
<b>Micro-ondas</b> .....	92
<b>Fritura</b> .....	94
<b>3.3.5. Aproveitamento do Resíduo Tratado.....</b>	<b>95</b>
3.3.5.1. Construção Civil.....	96
3.3.5.2. Energia.....	98
3.4. LEITO DE DRENAGEM.....	111
3.5. BIOSSECAGEM.....	118
3.6. ASPECTOS LEGAIS.....	147
3.7. SÍNTESE E ANÁLISE CRÍTICA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	149
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>153</b>
4.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	153
4.2. MÉTODOS.....	163
<b>4.2.1. Exterior</b> .....	<b>166</b>
<b>4.2.2. Brasil</b> .....	<b>169</b>
<i>Desaguamento (leito de drenagem)</i> .....	169
<i>Secagem (biossecagem)</i> .....	173
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>176</b>
5.1. EXTERIOR.....	176
<b>5.1.1. Relatórios de visitas</b> .....	<b>176</b>
<i>ETE de Manresa</i> .....	176
<i>GMB BioEnergie</i> .....	186
<b>5.1.2. Experimentos conduzidos</b> .....	<b>193</b>
5.2. BRASIL.....	207
<b>5.2.1. Etapa de Desaguamento: Leito de Drenagem</b> .....	<b>207</b>
<b>5.2.2. Etapa de Secagem: Biossecagem</b> .....	<b>224</b>

---

<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>238</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>241</b>
7.1. PARA TRABALHOS FUTUROS .....	241
7.2. PARA CONSTRUÇÃO DE EXPERIMENTO DE BIOSSECAGEM .....	242
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>244</b>
<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR CONSULTADA .....</b>	<b>255</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema de saneamento básico no Brasil é compreendido basicamente como abastecimento de água, esgotamento sanitário, gestão dos resíduos sólidos urbanos, e drenagem urbana (Lei 11.445/2007). Estes quatro componentes são complementares e, portanto, devem ser geridos de maneira integrada, de forma que a má gestão de um deles compromete também a gestão de outro(s), e repercute diretamente na saúde pública. Cada um destes componentes ou subsistemas possui suas especificidades, e quando se trata de esgotamento sanitário, a coleta, o tratamento e o lançamento estão incluídos. Pode-se afirmar que o objetivo deste subsistema é coletar e transportar toda contribuição de esgoto de uma área territorial para um local de tratamento (Estação de Tratamento de Esgoto – ETE) e, após tratamento adequado e eficiente, realizar o lançamento do esgoto tratado em curso d’água ou reaproveitá-lo para outra finalidade. Infelizmente, mais de 50% dos domicílios brasileiros não contam com rede de coleta de esgoto, e quando se reflete sobre o tratamento, da parcela que é coletada, mais de 30% do volume é lançado *in natura* em cursos d’água, degradando a qualidade ambiental do corpo receptor (IBGE/PNSB, 2008; PLANSAB, 2014). Diante deste cenário, além da problemática relacionada à deficiência na coleta e transporte de esgoto até a ETE, muitos são os problemas relativos ao funcionamento desta última. A ETE pode ser classificada como um sistema com três fases de tratamento: tratamento da fase líquida, fase sólida e fase gasosa. Muitas são as tipologias de tratamento de esgoto existentes e, de maneira geral, a gestão inadequada e a falta de visão holística dos gerentes e diretores destas estações implicam na maioria dos problemas, com destaque para: falta de manutenção, falta de controle e monitoramento ao longo das etapas, tipologia de tratamento inadequada, indiferença quanto à busca pela melhoria contínua do processo, ineficiência de etapas do processo, e subconsideração ou descon sideração da fase sólida do tratamento, ou seja, do tratamento do lodo.

Ao longo do tratamento na ETE, o esgoto bruto (com características físicas, químicas e biológicas iniciais) é submetido ao tratamento preliminar, primário, secundário e, em alguns casos, terciário. Ao final do processo, o esgoto possui características distintas das iniciais, além de estar livre de partículas, que são removidas em cada grau de tratamento. As partículas removidas no tratamento preliminar são, de maneira geral, resíduos grosseiros retidos no gradeamento e areia removida no desarenador. Estas partículas normalmente são direcionadas a contêineres e, posteriormente, ao aterro sanitário. As demais partículas removidas na ETE constituem o lodo de esgoto e devem ser direcionadas ao tratamento da fase sólida. Por se apresentar de forma fluida, o desafio do tratamento do lodo de esgoto consiste principal e inicialmente na remoção de água deste resíduo.

Atualmente existem muitas possibilidades para se trabalhar o lodo de esgoto. No entanto, muitas vezes demanda-se mais que uma simples etapa, método ou tecnologia para que seja realizada uma gestão adequada, o que desestimula gestores que enxergam o lodo como um problema e não como oportunidade. Por esta razão, a maioria das ETEs brasileiras que tratam o lodo apenas removem parte da água livre presente no resíduo e o destinam com cerca de 15 a 25% de teor de sólidos aos aterros sanitários. Com o advento da Lei 12.305/2010 – que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – esta prática se tornou ilegal no Brasil desde 02 de agosto de 2014, prazo estabelecido para implantação e operação adequada de unidades de disposição de rejeitos, bem como tratamento e aproveitamento de resíduos pelos órgãos e entidades gestoras.

Dessa forma, a justificativa principal da presente pesquisa consistiu na busca por soluções adequadas para o tratamento do lodo de ETE, no que se refere ao potencial de aproveitamento deste resíduo e a oportunidades para cumprimento do que preconiza a legislação brasileira e da maioria dos países do mundo quanto à necessidade de não considerar resíduos como rejeitos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar sistema de remoção de água de lodo gerado em estação de tratamento de esgoto com duas etapas: (i) desaguamento em leito de drenagem seguido de (ii) secagem por meio de biossecagem.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- Realizar revisão bibliográfica abrangente com foco principal no processo de biossecagem de lodo de esgoto, discutindo os resultados e as variáveis relatadas na literatura consultada;

- Realizar ensaios de desaguamento de lodo anaeróbio proveniente de reator UASB em leito de drenagem, variando a manta geotêxtil e a taxa de aplicação superficial, monitorando a drenagem inicial (fase de drenagem) e o teor de sólidos totais ao longo do tempo (fase de evaporação), e realizando revolvimento;

- Realizar ensaios de biossecagem baseados em metodologias da literatura e utilizando lodo anaeróbio proveniente de reator UASB e previamente desaguado em leito de drenagem, buscando obter resultados referentes à aplicação deste processo com lodo anaeróbio e previamente desaguado em sistema natural;

- Realizar ensaios de biossecagem com lodo misturado (aeróbio) previamente desaguado em centrífuga.

### **2.3. OBJETIVOS COMPLEMENTARES**

Os objetivos complementares desta pesquisa foram:

- Realizar verificação em escala real de estações de tratamento de lodo na Espanha (digestão anaeróbia e compostagem) e na Holanda (biossecagem), aplicar questionário, obter dados reais acerca do tratamento, e elaborar relatórios de visita;

- Elaborar recomendações e sugestões para pesquisas futuras no que se refere ao processo de remoção de água de lodo de esgotos, bem como relatar aspectos referentes à construção, ajustes e controle de parâmetros em experimento de biossecagem, encorajando e almejando orientar pesquisadores interessados em realizar investigações com o uso deste processo.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

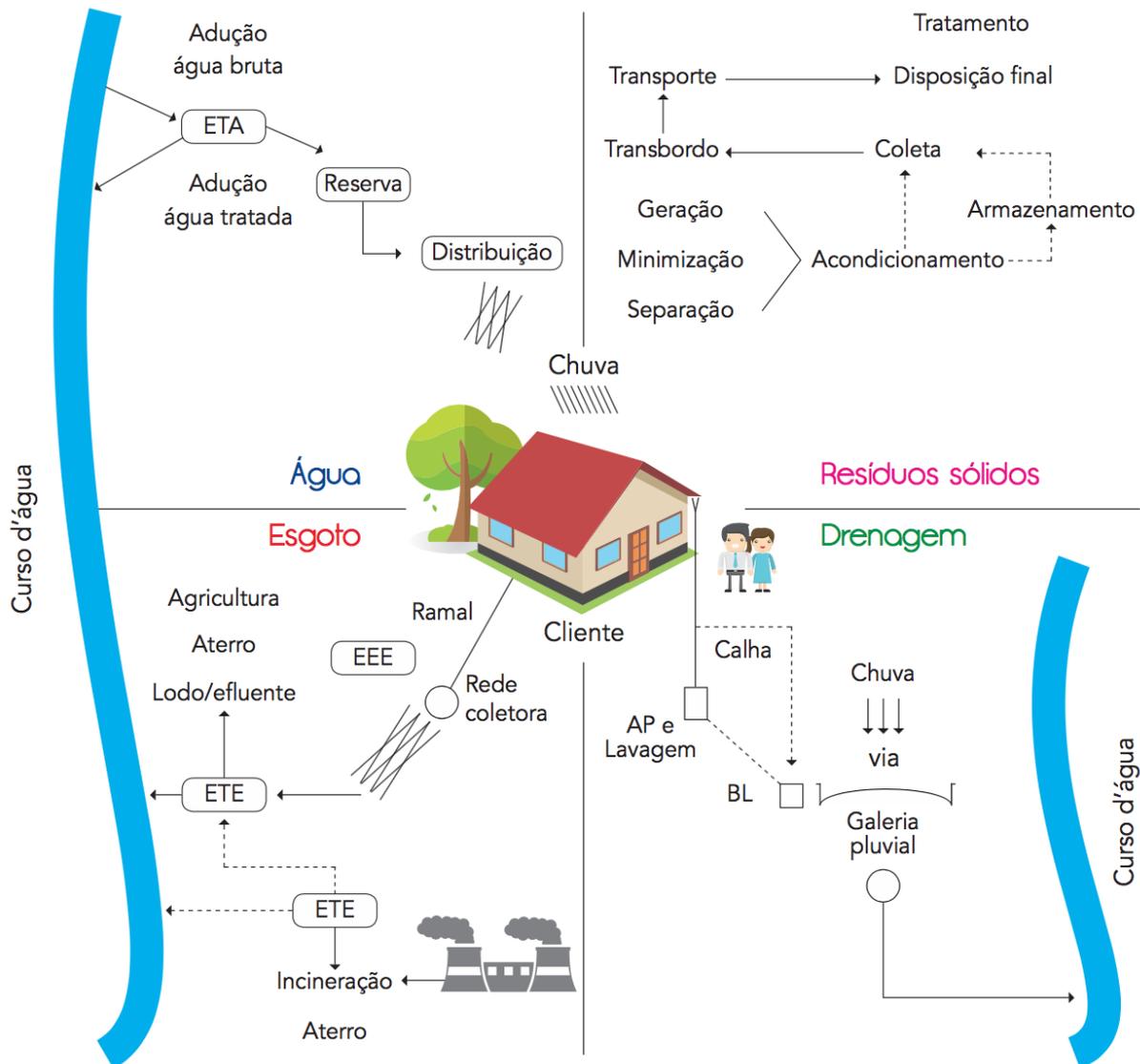
#### 3.1. TRATAMENTO DE ESGOTO

Antes de tratar especificamente do tema tratamento de esgoto, que está inserido no que se pode denominar subsistema de esgotamento sanitário, é fundamental a visão geral do sistema de saneamento básico, juntamente com o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais que o envolve, uma vez que, em concordância com o PLANSAB (2014), tudo o que envolve saneamento básico deve ser tratado de maneira integral. O PLANSAB (2014) prevê, inclusive, dentre os programas de investimento, um programa denominado “saneamento básico integrado”. A finalidade principal deste programa é atender às iniciativas de integralidade, valorizando uma demanda idealizada em um município, com base em seu Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), abrangendo os quatro componentes, de maneira que se enxergue as necessidades integrais em seu território urbano, com vistas à universalização.

Segundo a Lei 11.445, de 5 de Janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, saneamento básico consiste em um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de:

- “a) abastecimento de água potável: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e respectivos instrumentos de medição;
- b) esgotamento sanitário: constituído pelas atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até o seu lançamento final no meio ambiente;
- c) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final do lixo doméstico e do lixo originário da varrição e limpeza de logradouros e vias públicas;
- d) drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas.” (BRASIL, 2007, Art. 3º, I).

Estes quatro componentes que compõem o saneamento básico, citados e explicados na Lei 11.445/2007, estão ilustrados de maneira simplificada na Figura 3.1.



**Figura 3.1** – Ilustração dos quatro componentes que compõem o sistema de saneamento básico.  
 Fonte: Cordeiro (2016).

Ainda em relação à necessidade de consideração integral do sistema de saneamento básico, com base na representação anterior (Figura 3.1), é possível notar a integração e interferência entre um e outro componente, de maneira que a deficiência na qualidade e gestão de um deles pode comprometer o outro. Como exemplo cita-se a disposição inadequada dos resíduos sólidos na rede coletora de esgotos e deficiência na limpeza urbana, que podem trazer como consequência, respectivamente, (i) a deficiência no transporte dos esgotos até a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), bem como possível influência nas etapas de tratamento dos esgotos (demandando, por exemplo, maior eficiência na separação de sólidos grosseiros na etapa de tratamento preliminar), e (ii) entupimento dos dispositivos de

drenagem de águas pluviais e/ou alteração da qualidade do corpo receptor de águas pluviais. Além disso, caso a eficiência do tratamento na ETE não alcance os requisitos mínimos de acordo com a classificação do corpo receptor (CONAMA 357/2005) e relativos à qualidade do esgoto lançado, certamente impactos de magnitude superior ao limite depurador do corpo receptor ocorrerão e, conseqüentemente, na ocorrência de captação superficial de água para tratamento e abastecimento público à jusante deste mesmo corpo receptor impactado ou derivado deste, um tratamento mais complexo na Estação de Tratamento de Água (ETA) pode ser demandado. Logo, maior necessidade de utilização de produtos químicos pode ocorrer, bem como maior geração de lodo de ETA. Estas são apenas descrições de situações corriqueiras no sistema de saneamento no Brasil, dentre outras que podem ser mencionadas. Destacando que, quando se reflete sobre o tratamento da fase sólida em ETA e ETE nestas situações, o problema se torna ainda pior.

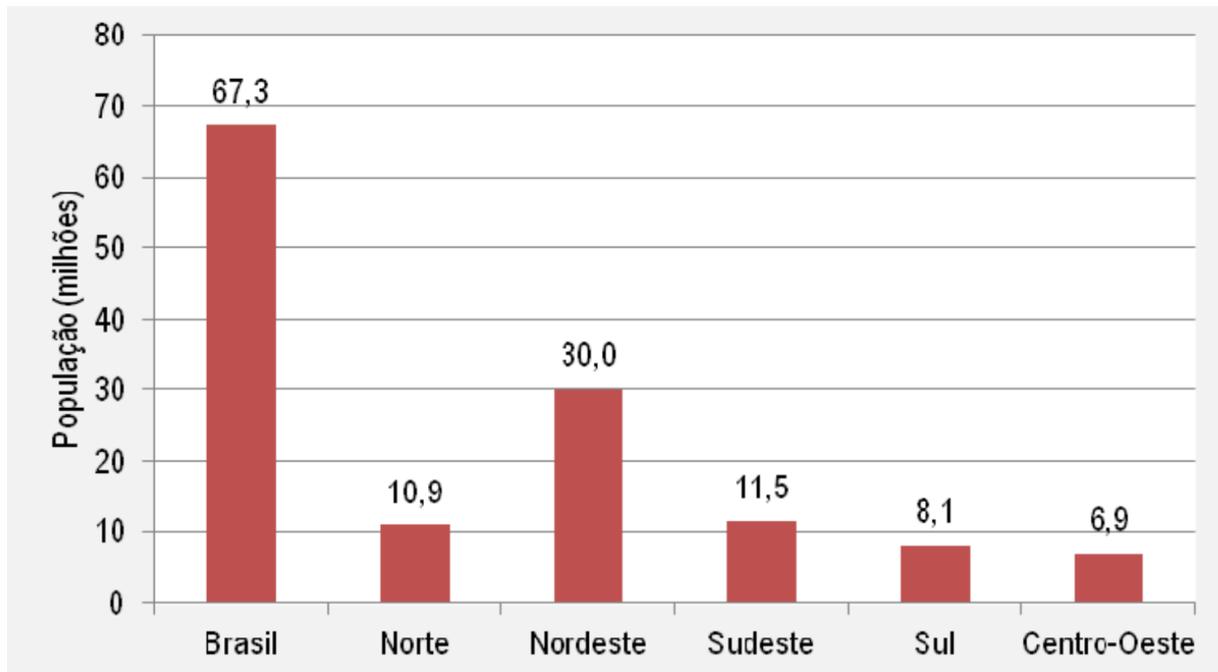
Atentando-se para o subsistema de esgotamento sanitário, este compreende coleta, transporte, tratamento e disposição final adequada dos esgotos sanitários. Nesta pesquisa está sendo considerado apenas o tratamento dos esgotos e, mais especificamente, o tratamento do lodo, isto é, tratamento da fase sólida em uma ETE.

### **3.1.1. Panorama no Brasil**

Segundo o PLANSAB (2014), em 2010, 35% da população brasileira não possuía soluções adequadas para o afastamento de seus esgotos (lançamento em fossa rudimentar, rio, lago ou mar, ou outro escoadouro, ou sem banheiro ou sanitário).

Dados do IBGE (2010) indicam que apenas aproximadamente 50% da população brasileira conta com rede coletora de esgotos ou de águas pluviais para disposição dos esgotos domésticos (IBGE/PNSB, 2008). Estes percentuais distribuídos por macrorregiões do País, em termos de habitantes com *déficit* no acesso ao afastamento de excretas e esgotos sanitários, são aproximadamente: 68,9% no Norte, 56,8% no Nordeste, 49,3% no Centro-

Oeste, 29,6% no Sul, e 14,5% no Sudeste. A Figura 3.2 ilustra esta situação de *déficit* no acesso a essas práticas e serviços, em termos de contingente populacional.

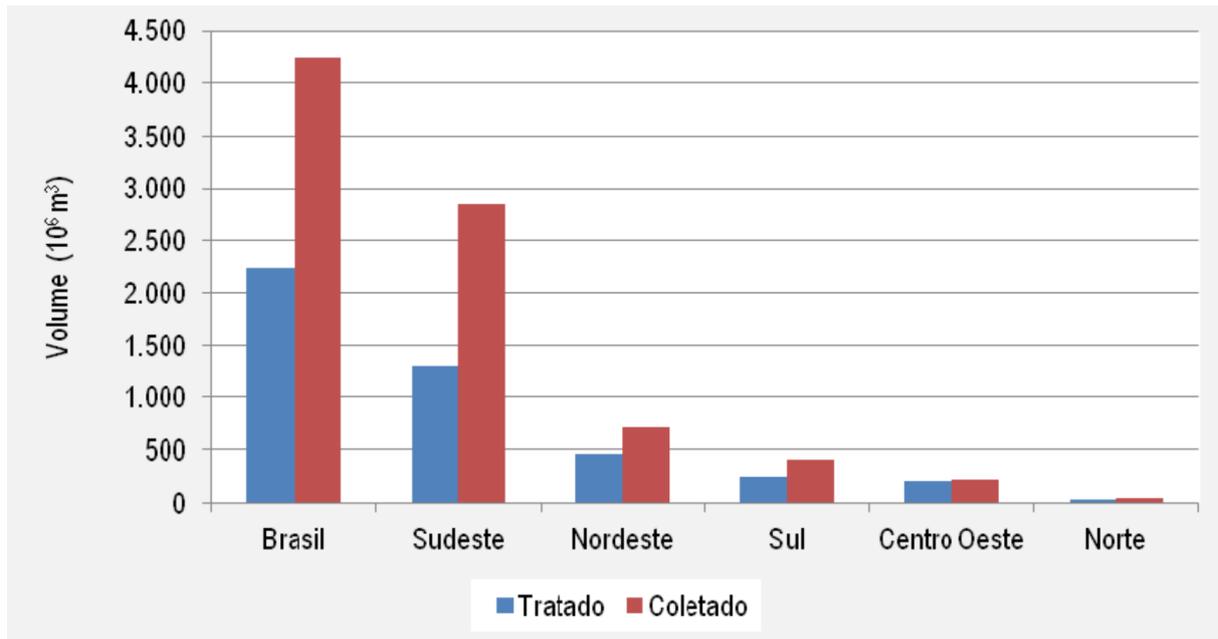


**Figura 3.2** – Déficit em afastamento dos esgotos sanitários por macrorregião e Brasil, 2008.

Fonte: IBGE (2011) citado por PLANSAB (2014).

Acerca do tratamento do volume de esgotos sanitários coletados, dados do IBGE/PNSB (2008) indicam que apenas 53% do volume total recebiam algum tipo de tratamento antes de sua disposição no ambiente. Distribuindo-se esta proporção por macrorregiões brasileiras, os seguintes percentuais foram indicados: 46% no Sudeste, 59% no Sul, 62% no Norte, 66% no Nordeste, e 90% no Centro-Oeste. Nota-se que o Sudeste apresenta a menor proporção, o que se explica por ser a região mais populosa do País e a que mais provê aos seus habitantes serviço de coleta de esgotos sanitários (85,5% dos habitantes têm acesso ao afastamento de excretas e esgotos sanitários).

A Figura 3.3 mostra o panorama das macrorregiões e do País no ano de 2008, no que se refere ao volume de esgotos coletados e tratados, em m<sup>3</sup>.



**Figura 3.3** – Volume de esgotos coletados e tratados por macrorregião e Brasil, 2008.

*Fonte:* IBGE (2009) citado por PLANSAB (2014).

O PLANSAB (2014) não traz considerações a respeito do tratamento do lodo de ETE, e esta fase do tratamento dos esgotos sanitários não tem sido considerada nestes estudos publicados quadrienalmente.

### 3.1.2. Tipologias de tratamento

O tratamento de esgotos domésticos pode ser dividido basicamente em duas fases: líquida e sólida. O tratamento da fase líquida se refere ao efluente de saída de cada uma das etapas ou graus de tratamento a que é submetido até chegar em sua característica final, imediatamente antes do lançamento no corpo receptor. Já o tratamento da fase sólida compreende o tratamento de toda partícula ou resíduo sólido retido ao longo do tratamento em uma ETE.

Os graus de tratamento em uma ETE podem ser classificados em tratamento preliminar, primário, secundário e terciário. Genericamente, o tratamento preliminar compreende operações físicas (peneiramento e sedimentação), com o objetivo principal de remoção de sólidos em suspensão, basicamente sólidos grosseiros e areia. No tratamento primário são removidos sólidos em suspensão sedimentáveis (matéria orgânica em suspensão)

e sólidos flutuantes (óleos e graxas). No tratamento secundário os poluentes removidos são: matéria orgânica dissolvida, matéria orgânica em suspensão, sólidos não-sedimentáveis, nutrientes (parcialmente), e patógenos (parcialmente). Por fim, o tratamento terciário, também conhecido como polimento final do esgoto, pode remover nutrientes, patógenos, compostos não-biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos, e sólidos em suspensão remanescentes.

Os métodos ou mecanismos mais comuns aplicados no Brasil que podem ser citados por grau de tratamento são:

- Preliminar: peneiramento ou gradeamento e sedimentação/desarenador;
- Primário: decantador primário;
- Secundário: lagoas de estabilização (facultativa, anaeróbia + facultativa, aerada facultativa, aerada de mistura completa + decantação), lodos ativados (fluxo contínuo convencional, fluxo contínuo de aeração prolongada, fluxo intermitente), filtros biológicos, tratamento anaeróbio (reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo - UASB, reator anaeróbio de fluxo ascendente – RAFA), e disposição no solo (infiltração lenta, infiltração rápida, infiltração superficial, escoamento superficial);
- Terciário: desinfecção, troca iônica, osmose reversa, aplicação artificial de ultravioleta, entre outros.

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008 (IBGE/PNSB, 2008), realizou levantamentos específicos sobre esgotamento sanitário no que diz respeito à fase líquida e fase sólida do tratamento dos esgotos. Ou seja, gerou tabelas referentes às tipologias de tratamento utilizadas no Brasil e destino dos lodos gerados. As Tabelas 3.1 e 3.2 trazem as tipologias/graus de tratamento no Brasil, nas grandes regiões e unidades da federação em termos volumétricos ( $m^3$ /dia) e de número de municípios, respectivamente. A Tabela 3.3 traz o destino dado ao lodo gerado no processo de tratamento dos esgotos sanitários em termos de número de municípios.

**Tabela 3.1** – Volume total de esgoto tratado por dia, por tipo/grau de tratamento, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação – 2008.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Volume total de esgoto tratado por dia (m <sup>3</sup> )				
	Total (1)	Tipo de tratamento			
		Preliminar	Primário	Secundário	Terciário
<b>Brasil</b>	<b>8 460 590</b>	<b>1 760 241</b>	<b>1 409 420</b>	<b>4 344 269</b>	<b>824 989</b>
<b>Norte</b>	<b>78 750</b>	<b>21 503</b>	<b>12 414</b>	<b>25 517</b>	<b>17 116</b>
Rondônia	6 002	2	6 000	-	-
Acre	877	-	16	861	-
Amazonas	26 309	17 799	3 958	4 544	8
Roraima	11 530	-	120	-	11 410
Pará	14 523	2 198	430	5 593	4 102
Amapá	5 788	1 504	1 890	2 343	51
Tocantins	13 721	-	-	12 176	1 545
<b>Nordeste</b>	<b>1 337 944</b>	<b>653 515</b>	<b>197 989</b>	<b>348 475</b>	<b>95 904</b>
Maranhão	16 504	250	-	16 254	-
Piauí	22 267	180	260	21 827	-
Ceará	234 711	207 697	9 964	11 423	5 327
Rio Grande do Norte	77 005	927	10 684	60 914	4 480
Paraíba	84 749	4 096	2 346	78 307	-
Pernambuco	242 150	43 505	69 502	76 843	50 500
Alagoas	49 444	977	46 846	1 621	-
Sergipe	36 961	1 532	4	711	-
Bahia	574 153	394 351	58 383	80 575	35 597
<b>Sudeste</b>	<b>5 017 621</b>	<b>912 626</b>	<b>796 937</b>	<b>2 916 597</b>	<b>319 667</b>
Minas Gerais	600 794	29 608	264 590	198 512	107 481
Espírito Santo	169 148	14 336	13 375	78 520	62 917
Rio de Janeiro	1 182 703	613 203	244 004	261 703	39 300
São Paulo	3 064 976	255 479	274 968	2 377 862	109 969
<b>Sul</b>	<b>1 343 923</b>	<b>160 745</b>	<b>229 558</b>	<b>851 585</b>	<b>96 419</b>
Paraná	1 081 367	143 731	209 015	686 932	36 073
Santa Catarina	86 441	15 599	3 273	46 853	20 716
Rio Grande do Sul	176 115	1 415	17 270	117 800	39 630
<b>Centro-Oeste</b>	<b>682 352</b>	<b>11 852</b>	<b>172 522</b>	<b>202 095</b>	<b>295 883</b>
Mato Grosso do Sul	63 630	-	42 350	19 638	1 642
Mato Grosso	65 062	4 542	6 302	44 371	9 847
Goiás	252 247	7 310	123 870	116 173	4 894
Distrito Federal	301 413	-	-	21 913	279 500

Nota: Considera-se o município em que pelo menos um distrito (mesmo que apenas parte dele) tem tratamento do esgoto.

(1) Inclusive o volume que as entidades não especificaram por tipo de tratamento.

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2008).

**Tabela 3.2** – Municípios, total e com tratamento do esgoto sanitário realizado nas Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs, por tipo de tratamento, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação – 2008.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Municípios														
	Com tratamento do esgoto sanitário realizado nas ETEs														
	Total	Tipo de tratamento													
		Total	Filtro biológico	Reator anaeróbico	Valo de oxidação	Lodo ativado	Lagoa anaeróbia	Lagoa aeróbia	Lagoa aerada	Lagoa facultativa	Lagoa mista	Lagoa de maturação	Fossa séptica de sistema condominial	Wetland/ aplicação no solo, plantas aquáticas	Outro
<b>Brasil</b>	5 564	1 513	317	188	565	27	431	131	93	672	65	238	20	109	129
<b>Norte</b>	449	35	6	4	14	2	11	10	4	19	2	6	1	4	2
Rondônia	52	2	-	1	-	-	2	1	-	1	1	-	-	-	-
Acre	22	4	4	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Amazonas	62	3	-	1	3	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-
Roraima	15	3	-	-	-	-	1	-	-	2	-	2	-	1	-
Pará	143	6	1	1	5	-	1	1	2	4	1	1	-	2	1
Amapá	16	2	-	-	-	-	-	1	-	2	-	1	-	-	-
Tocantins	139	15	1	-	6	-	7	7	2	10	-	2	-	-	1
<b>Nordeste</b>	1 793	308	67	20	84	4	68	29	26	130	25	90	5	33	43
Maranhão	217	4	1	2	1	-	2	1	-	2	-	1	-	1	-
Piauí	223	5	1	-	-	-	-	-	1	3	-	3	-	-	-
Ceará	184	86	23	6	23	-	11	9	1	40	5	35	-	1	19
Rio Grande do Norte	167	26	-	1	-	-	5	2	2	22	5	21	-	3	1
Paraíba	223	36	6	-	9	-	10	2	2	11	1	-	-	12	-
Pernambuco	185	46	13	3	9	1	11	3	3	10	3	6	-	10	5
Alagoas	102	15	6	2	4	-	5	1	1	4	1	-	-	3	2
Sergipe	75	8	2	1	-	1	1	1	-	4	1	5	-	-	2
Bahia	417	82	15	5	38	2	23	10	16	34	9	19	5	3	14
<b>Sudeste</b>	1 668	782	151	123	238	14	251	56	42	387	25	78	11	42	54
Minas Gerais	853	197	80	25	108	2	18	8	4	28	2	13	6	12	9
Espírito Santo	78	54	29	12	24	1	10	9	-	15	7	2	-	7	9
Rio de Janeiro	92	42	19	18	21	3	3	-	1	4	-	1	2	9	10
São Paulo	645	489	23	68	85	8	220	39	37	340	16	62	3	14	26
<b>Sul</b>	1 188	271	82	34	178	6	49	22	8	70	6	16	3	28	20
Paraná	399	159	44	7	135	-	28	10	1	46	3	3	-	4	6
Santa Catarina	293	38	16	10	14	4	10	3	4	8	1	3	-	4	7
Rio Grande do Sul	496	74	22	17	29	2	11	9	3	16	2	10	3	20	7
<b>Centro-Oeste</b>	466	117	11	7	51	1	52	14	13	66	7	48	-	2	10
Mato Grosso do Sul	78	34	2	-	27	-	7	-	-	7	-	1	-	1	-
Mato Grosso	141	22	5	4	9	-	16	4	4	12	2	13	-	1	1
Goiás	246	60	4	2	14	1	28	9	8	46	4	33	-	-	8
Distrito Federal	1	1	-	1	1	-	1	1	1	1	1	1	-	-	1

Nota: O município pode apresentar mais de um tipo de tratamento do esgoto sanitário.

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2008).

A Tabela 3.2 mostra que apenas 1.513 dos 5.564 municípios brasileiros contam com tratamento de esgotos, e que as tipologias mais utilizadas seguem a seguinte ordem decrescente: lagoa facultativa, valo de oxidação, lagoa anaeróbia, filtro biológico, lagoa de

maturação, reator anaeróbico, lagoa aeróbia, outro, *wetland*, lagoa aerada, lagoa mista, lodo ativado, e fossa séptica.

**Tabela 3.3** – Municípios, total e com tratamento do esgoto sanitário realizado nas Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs, por destino do lodo gerado no processo de tratamento do esgoto, segundo as macrorregiões e Unidades da Federação – 2008.

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Municípios									
	Total	Com tratamento do esgoto sanitário realizado nas ETEs								
		Total	Destino do lodo gerado pelo processo de tratamento do esgoto							
			Total	Rio	Mar	Terreno baldio	Aterro sanitário	Incine- ração	Reapro- veitamento	Outro
<b>Brasil</b>	<b>5 564</b>	<b>1 513</b>	<b>1 091</b>	<b>163</b>	<b>1</b>	<b>97</b>	<b>452</b>	<b>19</b>	<b>169</b>	<b>316</b>
<b>Norte</b>	<b>449</b>	<b>35</b>	<b>27</b>	<b>4</b>	<b>-</b>	<b>4</b>	<b>11</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>10</b>
Rondônia	52	2	2	-	-	-	-	-	-	2
Acre	22	4	3	1	-	1	1	-	-	-
Amazonas	62	3	3	-	-	-	1	-	1	1
Roraima	15	3	2	1	-	-	-	-	1	-
Pará	143	6	6	2	-	1	3	-	-	3
Amapá	16	2	2	-	-	-	1	-	-	2
Tocantins	139	15	9	-	-	2	5	-	-	2
<b>Nordeste</b>	<b>1 793</b>	<b>308</b>	<b>186</b>	<b>31</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>41</b>
Maranhão	217	4	3	1	1	1	-	-	-	1
Piauí	223	5	4	-	-	1	1	1	-	1
Ceará	184	86	54	3	-	18	11	5	6	17
Rio Grande do Norte	167	26	13	1	-	1	4	8	1	-
Paraíba	223	36	18	11	-	5	1	-	1	1
Pernambuco	185	46	21	4	-	9	5	1	3	4
Alagoas	102	15	6	2	-	2	-	-	-	3
Sergipe	75	8	4	1	-	1	-	-	1	1
Bahia	417	82	63	8	-	7	28	-	18	13
<b>Sudeste</b>	<b>1 668</b>	<b>782</b>	<b>570</b>	<b>111</b>	<b>-</b>	<b>37</b>	<b>284</b>	<b>4</b>	<b>29</b>	<b>159</b>
Minas Gerais	853	197	151	35	-	21	70	1	8	26
Espírito Santo	78	54	46	8	-	9	25	1	7	10
Rio de Janeiro	92	42	39	7	-	3	25	-	8	5
São Paulo	645	489	334	61	-	4	164	2	6	118
<b>Sul</b>	<b>1 188</b>	<b>271</b>	<b>232</b>	<b>13</b>	<b>-</b>	<b>10</b>	<b>65</b>	<b>-</b>	<b>96</b>	<b>81</b>
Paraná	399	159	149	4	-	1	31	-	77	58
Santa Catarina	293	38	32	1	-	6	15	-	5	6
Rio Grande do Sul	496	74	51	8	-	3	19	-	14	17
<b>Centro-Oeste</b>	<b>466</b>	<b>117</b>	<b>76</b>	<b>4</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	<b>42</b>	<b>-</b>	<b>12</b>	<b>25</b>
Mato Grosso do Sul	78	34	28	-	-	-	25	-	5	4
Mato Grosso	141	22	12	2	-	-	5	-	3	2
Goiás	246	60	35	2	-	1	12	-	3	19
Distrito Federal	1	1	1	-	-	-	-	-	1	-

Nota: O município pode dar mais de um destino ao lodo gerado pelo processo de tratamento do esgoto sanitário.  
Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.

A Tabela 3.3 ilustra que dentre as práticas de destinação do lodo gerado, nos 1.091 municípios que dão destinação a este resíduo, das mais utilizadas para as menos utilizadas, temos: aterro sanitário, outro, reaproveitamento, rio, terreno baldio, incineração, e mar.

### **3.1.3. Desafios para o sistema**

De maneira integrada e seguindo a lógica apresentada no PLANSAB (2014), o maior desafio para o sistema de saneamento básico como um todo é garantir acesso aos serviços para todos os domicílios brasileiros, o que corresponde ao que se denominou universalização do acesso (princípio fundamental da Lei 11.445/2007, Art. 2º, I).

Em se tratando de subsistema de esgotamento sanitário, a partir do estudo do panorama deste componente no Brasil, dos dados apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3, e confrontando a realidade atual com a Política Nacional de Saneamento Básico (Lei 11.445/2007) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), muitos podem ser os cenários de investimentos futuros. Sem discutir ordem de prioridade, mas apenas a inter-relação dentro do subsistema de esgotamento sanitário, destaca-se a necessidade de ampliação dos domicílios com coleta e transporte de esgotos adequados, implantação e gerenciamento de ETEs, e inclusão do tratamento da fase sólida em todas as ETEs, com tecnologia e aproveitamento adequado do resíduo, buscando não o tratar como problema ambiental, mas garantindo a qualidade ambiental, com vistas a oportunidades econômicas agregadas ao lodo.

Por fim, destaca-se que o tratamento da fase sólida dos esgotos, ou seja, o tratamento do lodo de ETE está inserido nos desafios para o saneamento. A Lei 12.305/2010 traz dentre suas considerações, a proibição de disposição de resíduos em aterros sanitários, uma vez que estes são passíveis de aproveitamento, e que apenas rejeitos (“resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis” – Art. 3º, XV, Lei 12.305/2010) tenham tal destinação. Ainda, em seu Art. 3º, VII e VIII, dita o que se considera destinação

ambientalmente adequada para resíduos e rejeitos. Confrontando esta Lei, com o fato do lodo de ETE ser considerado um resíduo sólido (ABNT, 2004), e dentre as destinações mais utilizadas para as ETEs brasileiras, a disposição em aterro sanitário corresponder à prática adotada em 41,43% dos municípios (IBGE/PNSB, 2008), certamente o desafio e a necessidade de se ampliar as possibilidades e atratividade para o tratamento do lodo, garantindo a sustentabilidade do sistema, deve ocorrer e ser incentivada.

Além destes aspectos mencionados, deve-se destacar também outras abordagens legislativas, dentre as quais é imprescindível se atentar ao que rege o Art. 54, § 2º, V, da Lei 9.605/1998, conhecida como “Lei dos crimes ambientais”. Neste artigo é mencionado como pena reclusão de um a cinco anos para quem “causar poluição (...) por lançamento de resíduos sólidos, líquidos (...) em desacordo com exigências estabelecidas em leis ou regulamentos”. Ou seja, na inexistência de tratamento e aproveitamento adequado do lodo de ETE, o responsável pela ETE se sujeita a tal sanção.

Características mais específicas deste resíduo e considerações sobre tecnologias de tratamento e possibilidades de aproveitamento serão abordadas nos próximos tópicos deste documento.

### **3.2. LODO DE ETE**

O termo “lodo” tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos. Nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, compondo parte da biomassa microbiana, denominada genericamente de lodo biológico ou secundário, composto principalmente de sólidos biológicos. É também por esta razão que o lodo pode ser denominado biossólido. (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Segundo Von Sperling (1996), a característica dos esgotos é função dos usos aos quais a água foi submetida, e estes usos e a forma com que são exercidos variam com o clima, a situação social e econômica, e hábitos da população.

Assim, é possível afirmar que as características do lodo gerado no tratamento também variam, dependendo basicamente, além dos fatores já citados, do tipo de tratamento adotado, podendo ser, de maneira geral, sistema de tratamento aeróbio e/ou anaeróbio.

Em geral, segundo Van Haandel & Cavalcanti (2001), as considerações sobre produção e composição de lodo são bem mais complicadas em sistemas de tratamento aeróbio do que em anaeróbio, devido a três fatores:

- “1. O decaimento de lodo é expressivo, de maneira que tem de ser levadas em consideração a demanda de oxigênio para respiração endógena e a geração de resíduo endógeno no sistema de tratamento.
2. O lodo ativo é instável, morrendo pouco tempo depois de se interromper a aeração. Na prática, o lodo produzido em um sistema aeróbio é introduzido em um digestor (geralmente anaeróbio) para redução da massa bacteriana aeróbia.
3. São produzidos lodos de naturezas diferentes. Para diminuir a carga orgânica devido ao material particulado no reator aerado, muitas vezes se aplica sedimentação primária, obtendo-se lodo que recebe a denominação de lodo fresco ou primário, que será posteriormente levado para a unidade de estabilização (digestor de lodo). O lodo produzido no reator biológico é denominado lodo secundário ou biológico.” (VAN HAANDEL & CAVALCANTI, 2001, p. 21).

Segundo Damasceno e Campos (1998), o lodo de esgoto se apresenta tipicamente com 98% de água. Dos sólidos contidos, 70 a 80% são matéria orgânica incluindo óleos e graxas. É possível que se identifique também presença de contaminantes diversos, refletindo as características do esgoto bruto do qual se originou.

A produção de lodo nos processos de tratamento biológico de esgoto tem aumentado consideravelmente devido à construção de novas estações de tratamento, ao crescimento demográfico e ao fornecimento de serviços de coleta e transporte de esgotos às ETEs. (DAMASCENO; CAMPOS, 1998)

A geração do lodo em uma ETE ocorre a partir das unidades de tratamento a que o esgoto é submetido, sendo classificadas basicamente em primárias e secundárias. Neste sentido, Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2001), distinguem:

- a) Lodo bruto ou primário - composto por sólidos sedimentáveis gerado nos decantadores primários. O lodo primário pode exalar mau cheiro, principalmente se ficar retido por muito tempo nos decantadores, com coloração acinzentada, pegajoso, facilmente fermentável, e de fácil digestão sob condições adequadas de operações da estação de tratamento de esgoto;
- b) Lodo biológico ou secundário - compreende a própria biomassa gerada através da remoção da matéria orgânica (alimento) fornecida pelo esgoto afluyente. Gerado em reatores biológicos, com aparência floculenta, coloração de marrom a preta, odor pouco ofensivo (quando fresco), e pode ser digerido sozinho ou misturado ao lodo primário (neste caso chamado de lodo misto ou misturado). Vale ressaltar que estes sólidos não se encontram estabilizados (digeridos), necessitando de uma etapa de digestão posterior.
- c) Lodo digerido - aquele que sofreu estabilização biológica aeróbia ou anaeróbia. Não possui odor ofensivo e é marrom escuro. Este lodo não requer uma etapa de digestão posterior.
- d) Lodo químico - originário do tratamento do esgoto que inclui etapas físico-químicas para melhorar o desempenho dos decantadores primários. Usualmente é resultado da precipitação química com sais metálicos ou com cal.

Em relação às características gerais do lodo de ETE, mesmo sabendo da variabilidade dos parâmetros, a Tabela 3.4 traz, resumida e representativamente, alguns parâmetros físico-químicos que permitem a distinção ou comparação entre lodo proveniente de tratamento aeróbio e de tratamento anaeróbio.

Dependendo da origem, o lodo de esgoto pode conter na sua composição diferentes concentrações de nutrientes. Na Tabela 3.5 estão alguns resultados de concentrações de macronutrientes e de carbono em lodo de esgotos de diferentes tipologias de tratamento, em estudos distintos no Brasil.

**Tabela 3.4** – Composição físico-química do lodo de esgotos de acordo com o tipo de tratamento do esgoto (anaeróbio e aeróbio).

Características	Lodo primário <sup>1</sup> (tanque séptico)	Lodo secundário	
		Lodo ativado <sup>2</sup>	Lodo anaeróbio estabilizado <sup>3</sup>
Sólidos Totais	221 g/kg	0,880 g/kg	101 g/kg
Sólidos Voláteis	280 g/kg	0,777 g/kg	682 g/kg
Nitrogênio	21 g/kg	0,047 g/kg	60,8 g/kg
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	----	4,13 g/L	21 g/kg
Carbono Orgânico (COT)	155 g/kg	0,165 g/kg	325 g/kg
pH	7,0	6,17	----

Fonte: <sup>1</sup>Silva et al. (2008); <sup>2</sup>Magalhães (2008); <sup>3</sup>Adani e Tambone (2005) citado e adaptado por Correia (2009).

**Tabela 3.5** – Comparação das concentrações de macronutrientes, e de carbono em lodo de esgotos em diferentes estudos no Brasil.

Parâmetros	Concentração Média (g/kg)			
	Guedes et al., (2006) <sup>1</sup>	Agustini; Onofre (2007) <sup>2</sup>	Silva et al. (2006) <sup>3</sup>	Vaz (2000) <sup>4</sup>
C	172,26	152	382,4	114,0
N	18,66	NE	68,2	26
P	9,40	80	12,9	9,5
K	1,96	13,4	1,0	1,3
Na	0,58	NE	0,9	0,5
Ca	86,40	1650	24,8	95,0
Mg	3,80	52,1	2,2	3,0

<sup>1</sup>Lodo oriundo da digestão aeróbia (decantação) e anaeróbia (primário e secundário) seguido de condicionamento com Ca(OH)<sub>2</sub> e FeCl<sub>3</sub> e secagem ao ar; <sup>2</sup>Lodo gerado na ETE Pato Branco, Paraná; <sup>3</sup>Lodo polimerizado, oriundo do tratamento de esgoto doméstico por lodo ativado convencional, Franca, SP; <sup>4</sup>Lodo prensado, oriundo da digestão aeróbia (decantação) e anaeróbia (primário e secundário) seguido de condicionamento e higienização com Ca(OH)<sub>2</sub> e FeCl<sub>3</sub>.

NE - não especificado.

Fonte: Correia (2009).

Em relação à presença de metais nos lodos de ETE, na Tabela 3.6 encontram-se alguns resultados para ETEs distintas.

O lodo contém os mais variados micro-organismos patogênicos (AGUSTINI e ONOFRE, 2007), incluindo os quatro maiores grupos de organismos patogênicos que afetam a saúde humana - bactérias, vírus, protozoários e helmintos - que se apresentam numa densidade que depende do quadro epidemiológico da comunidade local e do tratamento dado ao esgoto e ao lodo numa ETE (CARRINGTON, 2001).

No Quadro 3.1 constam os principais grupos de micro-organismos que podem ser encontrados no lodo de esgoto.

**Tabela 3.6** – Presença de metais em lodos de ETEs – estudos de casos brasileiros.

Parâmetros	Unidade	ETE - Barueri <sup>(a)</sup>	ETE – Franca <sup>(b)</sup>	ETE - Eldorado <sup>(c)</sup>
Cálcio	g/kg	24,1	15,4	-
Magnésio	g/kg	2,6	2	-
Sódio	g/kg	0,3	0,3	-
Enxofre	mg/kg	13,4	16,3	-
Cromo	mg/kg	486	374	34,5
Manganês	mg/kg	275,6	231,5	133,5
Ferro	mg/kg	34933	28450	36,85
Cobalto	mg/kg	12,2	5	8,5
Níquel	mg/kg	333,3	60,5	24,5
Cobre	mg/kg	774	178,5	88,5
Zinco	mg/kg	2000	901,5	584
Alumínio	mg/kg	46466	37000	-
Cádmio	mg/kg	7,9	-	1
Chumbo	mg/kg	115,3	68,7	73

(a): Sistema de tratamento – lodos ativados convencional (Costa *et al.*, 2001).

(b): Sistema de tratamento – lodos ativados convencional (Costa *et al.*, 2001).

(c): Sistema de tratamento – lagoa anaeróbia e lagoa facultativa (Rangel *et al.*, 2004).

(-): Não determinado.

**Quadro 3.1** – Principais grupos de micro-organismos patogênicos encontrados no lodo de esgoto.

Bactérias	Vírus	Helmintos	Protozoários	Fungos
<i>Salmonella spp</i>	<i>Poliovírus</i>	<i>Taenia spp</i>	<i>Entamoeba histolytica</i>	<i>Aspergillus spp</i>
<i>Shigella spp</i>	<i>Hepatite A-vírus</i>	<i>Ascaris lumbricoides</i>	<i>Giardia lamblia</i>	<i>Aspergillus fumigatus</i>
<i>Escherichia coli</i>	<i>Rotavírus</i>	<i>Ancylostoma duodenale</i>	<i>Criptosporidium spp</i>	
<i>Clostridium perfringens</i>	<i>Parvovírus</i>	<i>Hymenolepis nana</i>	<i>Toxoplasma gondii</i>	
<i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Influenza Vírus</i>	<i>Toxocara spp</i>	<i>Sarcocystis</i>	
<i>Vibrio cholera</i>		<i>Stroglyoides stercolaris</i>		
		<i>Trichiuris trichiura</i>		

Fonte: Carrington (2001); USEPA (2003) citado por Correia (2009).

A presença destes micro-organismos no lodo está associada inicialmente aos sólidos insolúveis concentrados durante o tratamento primário do esgoto. No tratamento secundário (por exemplo, lodos ativados), o número de patógenos no lodo gerado pode se reduzir substancialmente pois condições não favoráveis à sobrevivência destes micro-organismos são promovidas (USEPA, 2003).

A Tabela 3.7 traz a concentração de alguns micro-organismos presentes no lodo de esgoto citados em estudos conduzidos no Brasil.

**Tabela 3.7** – Concentração de Coliformes Termotolerantes, *Salmonellas spp.* e ovos de helmintos encontrados no lodo de esgoto em estudos diversos realizados no Brasil.

<b>Indicador microbiológico</b>	<b>Agustini; Onofre (2007)<sup>1</sup></b>	<b>Lira; Guedes; Schalch (2008)<sup>2</sup></b>	<b>Magalhães (2008)<sup>3</sup></b>	<b>Silva et al. (2008)<sup>4</sup></b>
Coliformes termotolerantes NMP/g de ST	3,2 x 10 <sup>2</sup>	< 2 x 10 <sup>6</sup>	1,4 x 10 <sup>3</sup>	ND
<i>Salmonella spp</i> (g/ST)	1,2 x 10	ND	ND	ND
Ovos de Helmintos (g/ST)	ND	ND	ND	102,4

<sup>1</sup>Lodo da ETE de Pato Branco – PR; <sup>2</sup>Lodo estabilizado com cal e cloreto férrico; <sup>3</sup>Lodo ativado; <sup>4</sup>Lodo primário de sistema anaeróbio. ND - dado não descrito.

Fonte: Correia (2009).

### 3.2.1. Lodo Aeróbio

No processo de biodegradação aeróbia a matéria orgânica sofre degradação na presença de oxigênio e é feita por micro-organismos aeróbios ou facultativos. Desde que o fornecimento de oxigênio seja contínuo, esse processo é a via mais rápida de biodegradação (ANDREOLI; LARA; FERNANDES, 2001).

De acordo com Hammer (1979), a adição de oxigênio no esgoto bruto por algumas horas remove a matéria orgânica da solução pela síntese em células microbianas, pois na medida em que as bactérias metabolizam a matéria orgânica presente no esgoto elas absorvem o oxigênio e liberam gás carbônico e se multiplicam adicionando uma grande população de micro-organismos ao lodo a ser biodegradado.

O metabolismo microbiano que se dá no tratamento de esgotos consiste em processos químicos que ocorrem simultaneamente na célula e podem ser classificados em desassimilação ou catabolismo (reações de produção de energia, nas quais ocorre a degradação do substrato) e assimilação ou anabolismo (reações que conduzem à formação de material celular - crescimento - com o auxílio da energia liberada na desassimilação) (VON SPERLING, 1996).

Na desassimilação, a energia armazenada em forma química nos compostos orgânicos (substrato) é liberada, sendo convertida, na assimilação, em material celular. O crescimento líquido é resultante do balanço entre anabolismo (positivo) e o catabolismo (negativo) (VON SPERLING, 1996).

Como já mencionado, a remoção da matéria orgânica originária dos esgotos ocorre através dos processos de desassimilação ou catabolismo, e os dois tipos de catabolismo de interesse no tratamento dos esgotos são: catabolismo oxidativo (oxidação da matéria orgânica) e catabolismo fermentativo (fermentação da matéria orgânica) (VON SPERLING, 1996).

O catabolismo oxidativo é uma reação redox na qual a matéria orgânica é oxidada por um agente oxidante presente no meio líquido (oxigênio, nitrato ou sulfato). Já no catabolismo fermentativo não há um oxidante: o processo ocorre devido ao rearranjo dos elétrons na molécula fermentada, de tal maneira que se formam no mínimo dois produtos. Geralmente há necessidade de várias fermentações sequenciais para que os produtos se tornem estabilizados, isto é, não mais susceptíveis à fermentação (VON SPERLING, 1996).

Quando vários aceptores de elétrons se encontram disponíveis no meio, o sistema utiliza aquele que produz a mais alta quantidade de energia. Por essa razão, o oxigênio dissolvido é utilizado primeiramente e, após a sua exaustão, o sistema deixa de ser aeróbio. Caso haja nitratos disponíveis no meio líquido, os organismos aparelhados a utilizar o nitrato na respiração passam a fazê-lo, convertendo o nitrato a nitrogênio gasoso (desnitrificação). Estas condições recebem um nome específico, sendo designadas como anóxicas (ausência de oxigênio dissolvido, mas presença de nitratos). Quando estes se extinguem, tem-se as condições anaeróbias estritas. Nestas, são utilizados os sulfatos, que são reduzidos a sulfetos, e o dióxido de carbono, que é convertido a metano. Enquanto houver substâncias de maior liberação de energia, as inferiores não serão utilizadas (VON SPERLING, 1996).

Sendo assim, para que ocorra biodegradação estritamente pela via aeróbia, a manutenção de oxigênio deve ser garantida de maneira proporcional no sistema, assegurando a utilização deste elemento no processo metabólico realizado pelos micro-organismos presentes.

Por outro lado, no caso de sistemas estritamente anaeróbios, a característica fundamental é que a via com a utilização de aceptores de elétrons como o oxigênio e o nitrogênio não seja passível de ser utilizada e, portanto, apenas as reações fermentativas são consideradas, gerando como produtos principalmente sulfeto ( $H_2S$ ), metano ( $CH_4$ ) e outros de maior variação (VON SPERLING, 1996).

Neste sentido, o lodo aeróbio, por ser originário de um processo de tratamento distinto do lodo anaeróbio, apresenta características diferentes em relação a este, inclusive características relacionadas à capacidade de desaguamento.

Na fase sólida de tratamento em uma ETE estão considerados os resíduos derivados da fase líquida. Portanto, a fase sólida, que segundo Vesilind (1980) citado por Spellman (1997) é responsável por aproximadamente 40% do investimento inicial, 50% do custo de operação e 90% dos problemas operacionais de uma ETE, nada mais é do que o tratamento e destinação do lodo gerado no tratamento dos esgotos. Genericamente, nesta fase de tratamento devem estar incluídos o adensamento, a digestão, o desaguamento, a secagem, e a destinação ou aproveitamento final do lodo tratado (BENNAMOUM, 2012).

Considera-se lodo aeróbio aquele proveniente de sistemas de tratamento com a presença de oxigênio, podendo-se citar as seguintes tipologias de tratamento: lodos ativados e variantes, lagoa aerada, lagoa aeróbia, lagoa facultativa, filtros biológicos aeróbios, biofiltros aerados, entre outros.

### 3.2.2. Lodo Anaeróbio

A biodegradação anaeróbia ocorre na ausência de oxigênio e por micro-organismos anaeróbios ou facultativos, começando a partir do momento em que o oxigênio dissolvido no esgoto já foi consumido pelos micro-organismos aeróbios (SANEPAR, 1997).

Segundo Chernicharo (1997) a digestão anaeróbica representa um sistema altamente interativo e balanceado, envolvendo processos metabólicos na conversão da matéria orgânica na ausência de oxigênio, ocorrendo produção de biogás. Os micro-organismos que participam do processo anaeróbio podem ser divididos em três grupos principais:

- Bactérias Fermentativas ou Acidogênicas;
- Bactérias Acetogênicas ou Sintróficas; e
- Bactérias Metanogênicas.

As vias de degradação de matéria orgânica podem ser didaticamente divididas em quatro etapas, sendo elas:

#### *Hidrólise*

Cada grupo microbiano tem funções específicas. As bactérias fermentativas acidogênicas transformam por hidrólise os compostos orgânicos complexos (os polímeros em monômeros) em outros mais simples (hidrogênio, dióxido de carbono, aminoácidos, ácidos orgânicos e outros), e estes podem atravessar as paredes celulares das bactérias. (FRANCISQUETO, 2007)

#### *Acidogênese*

Os compostos solúveis oriundos da hidrólise são absorvidos nas células das bactérias fermentativas, e após a acidogênese são excretados como substâncias orgânicas simples, como ácidos graxos voláteis de cadeia curta, álcoois, ácido lático e compostos minerais como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, etc. (FRANCISQUETO, 2007)

### *Acetogênese*

Nesta fase, as bactérias acetogênicas promovem a conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção do metano, ou seja, esta etapa serve como base para as bactérias metanogênicas (CHERNICHARO, 1997).

### *Metanogênese*

Por fim, na etapa final do processo global de degradação anaeróbica de compostos orgânicos, os produtos finais do segundo grupo são convertidos em metano e dióxido de carbono pelas bactérias metanogênicas (CHERNICHARO, 1997).

Um exemplo de lodo considerado anaeróbio é aquele originário de reatores tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, que significa reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente). A configuração destes sistemas de tratamento dispensa o uso de decantador primário e as etapas da fase sólida de adensamento e digestão, sendo que todos estes processos são realizados dentro deste reator. Por outro lado, é comumente necessária uma etapa de tratamento biológico complementar para atender aos requisitos de qualidade do efluente tratado, sendo que o lodo gerado nesta etapa normalmente é encaminhado para o reator anaeróbio (MORTARA, 2011). Desta forma, sistemas de tratamento que utilizam o reator UASB demandam apenas o desaguamento e a secagem como processos de tratamento da fase sólida. Logo, quando submetido à etapa de desaguamento, o lodo do reator UASB já se encontra adensado e digerido.

Outras tipologias de tratamento de esgotos que geram lodo anaeróbio podem ser: lagoas anaeróbias, filtro anaeróbio, reatores anaeróbios e variantes, entre outros.

### **3.3. TRATAMENTO DA FASE SÓLIDA EM ETE**

O tratamento da fase sólida em ETE, como já mencionado, pode ser definido como o tratamento de todo material removido dos esgotos ao longo do processo na fase líquida. Este material é facilmente putrescível e rapidamente gera odores desagradáveis, além de possuir

grande número de patógenos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2007). Esta é uma das razões da necessidade desta fase do tratamento em ETEs ter que receber atenção necessária para que os objetivos ambientais e sociais sejam atendidos (MORTARA, 2011).

Este trabalho tem como foco principal abordar o tratamento de apenas uma parte dos resíduos sólidos gerados nas ETEs, que é o lodo biológico gerado em reatores anaeróbios do tipo UASB. Outros subprodutos como os sólidos grosseiros retidos nas grades, a areia do desarenador e a espuma formada em diversas etapas do tratamento não serão objetos de discussão neste documento.

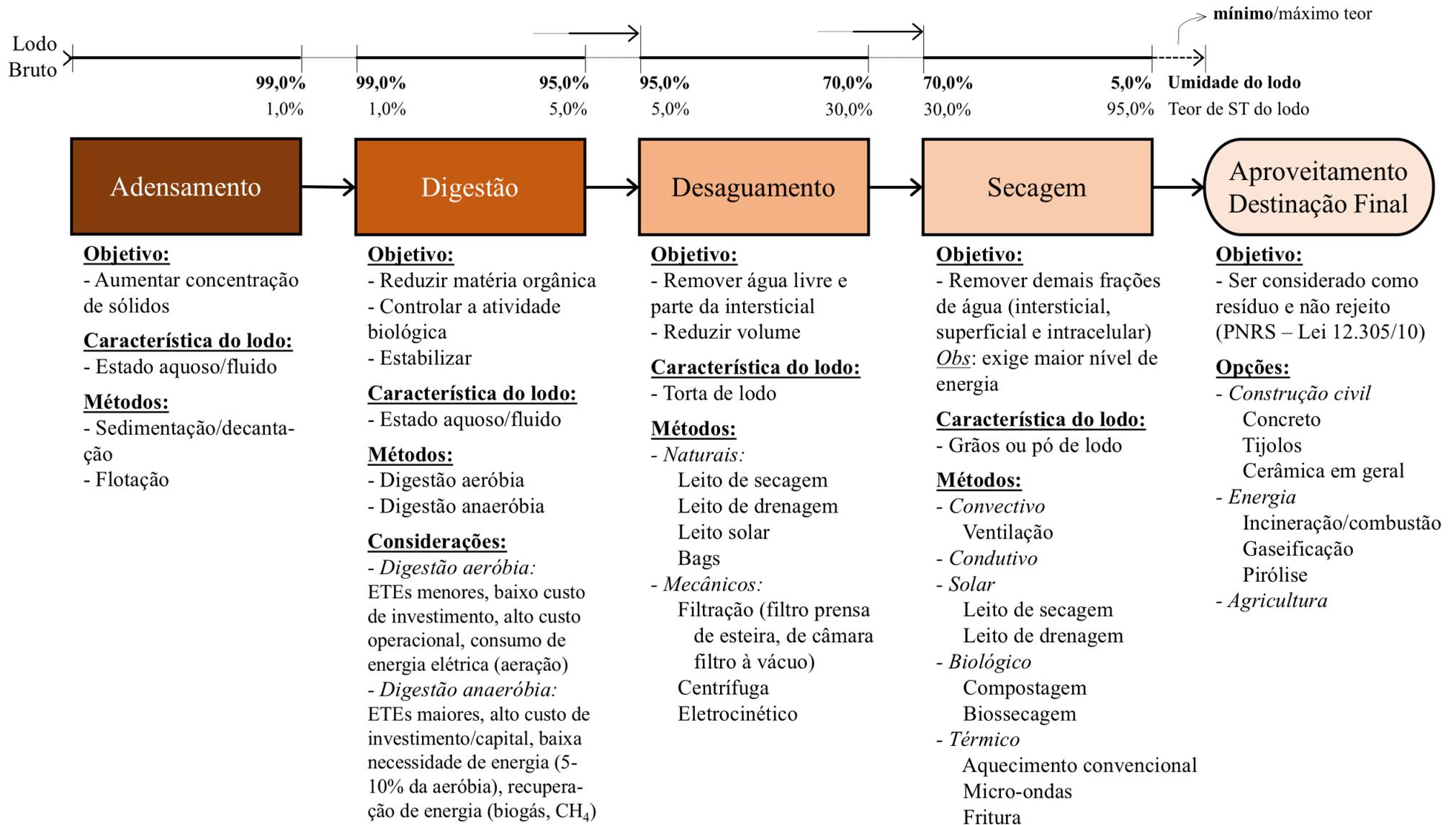
Como mencionado anteriormente, o tratamento da fase sólida em ETE ou tratamento do lodo de esgoto é composto pelas etapas de adensamento, digestão, desaguamento e secagem. Na literatura consultada ao longo do desenvolvimento deste trabalho, não há um consenso a respeito dos termos utilizados para definir e especificar as etapas que compõem o tratamento do lodo, principalmente no que se refere ao limite entre desaguamento e secagem, bem como a definição destes dois termos ou etapas finais. Contudo, muitos autores (CAI *et al.*, 2012, 2013, 2015, 2016a, 2016b; YANG, ZHANG e JAHNG, 2014; ZHAO *et al.*, 2010; HUILINIR e VILLEGAS, 2014, 2015; VILLEGAS e HUILINIR, 2014; WINKLER *et al.*, 2013; BENNAMOUN, 2012) convergem no entendimento de que, para remoção efetiva de água de lodo de esgoto, etapa posterior ao desaguamento deve ocorrer, uma vez que, dentre as tecnologias de desaguamento existentes (natural ou mecânica), quando aplicadas ao lodo de esgoto, o teor de sólidos final alcançado é em torno de 25%. Ou seja, para remoção efetiva de umidade ainda presente na massa, métodos posteriores de secagem devem ser aplicados. Para definir esta etapa após o desaguamento, os mesmos autores já citados neste parágrafo utilizam o termo *drying methods*, que traduzindo significa “métodos de secagem” e, por esta razão, neste trabalho adotou-se o termo “secagem” como a etapa final do tratamento do lodo de esgotos. Na literatura e na prática existe também definição de outras etapas que compõem o tratamento da fase sólida em uma ETE, como, por exemplo, condicionamento e estabilização.

Em muitos casos tais etapas não deixam de compor o tratamento do lodo de esgotos, todavia, para este trabalho, considerou-se que estas etapas podem ou não estar inseridas nas anteriores, como um condicionamento anterior ao adensamento e a estabilização derivada da digestão do lodo. Logo, para este documento as etapas consideradas para tratamento do lodo de esgotos são: adensamento, digestão, desaguamento, secagem, e aproveitamento/destinação final.

Para facilitar o entendimento e visualização do que se definiu como etapas do tratamento do lodo de esgoto no que se refere à remoção de água deste resíduo, elaborou-se um esquema representativo (Figura 3.4) que orientará o desenvolvimento dos tópicos subsequentes, derivados do tratamento da fase sólida em ETE. É importante ressaltar que no tratamento da fase sólida em uma ETE sempre se considera redução de volume e controle de patógenos.

Antes de seguir para as etapas do tratamento da fase sólida, alguns fatores relevantes que interferem na remoção de água do lodo, tais como distribuição e tamanho dos flocos; forma e estrutura dos flocos; concentração de sólidos; temperatura, viscosidade e tensão superficial; frações de água; pH; carga das partículas; e compressibilidade, serão brevemente comentados.

O processo de tratamento em que o lodo é produzido é determinante das propriedades que influenciam em sua capacidade de liberação de água. Isso ocorre, pois, os gradientes hidráulicos de mistura e as taxas e tipo de atividade biológica são características razoavelmente constantes de cada processo e, assim, os flocos formados em um mesmo processo de diferentes ETEs possuem características por vezes semelhantes (MORTARA, 2011).



**Figura 3.4** – Representação e descrição das etapas do tratamento do lodo de ETE no que se refere à remoção de água.

Para exemplificar a interferência sobre o comportamento do lodo em função do tipo de processo em que foi gerado, é possível afirmar que o lodo primário digerido possui facilidade de liberação de água, enquanto que o lodo de excesso, gerado em um reator de lodo ativado, possui grande dificuldade por ser mais concentrado. As maiores dificuldades na retirada da água deste tipo de lodo são devido ao maior grau de agitação na etapa em que foi gerado, e à forma com que a água está ligada aos flocos, pois encontra-se ligada aos microrganismos do lodo ativado e presa em suas células (WPCF, 1983).

No entanto, é importante considerar que o método de tratamento não é o único fator determinante da qualidade do lodo e de sua capacidade de liberação de água. A USEPA (1982) citado por Spellman (1997) menciona que a velocidade e o tempo para que seja retirada uma parte considerável da água presente no lodo depende de outros fatores como a qualidade do afluente à ETE, temperatura, grau de mineralização, pH, distribuição granulométrica e carga das partículas, compressibilidade, quantidade e forma de ligação da água presente com os sólidos, e de outras características físicas e químicas específicas do lodo gerado.

Ademais, a origem do lodo e as variáveis operacionais dos processos de tratamento realizados na ETE também são determinantes de propriedades físicas e químicas que interferem no condicionamento do lodo (MORTARA, 2011). Miki (1998) cita estudos em que uma grande proporção de sólidos voláteis de lodo secundário ou de lodo de origem industrial resultou na elevação da dose necessária de condicionante (LARSON, 1995; BOND; PESEK, 1996 citado por MIKI, 1998). Dentre as variáveis que dependem da forma de operação da ETE e influenciam nas características do lodo gerado, destacam-se a idade de lodo, o grau de mistura e o nível de mineralização.

As micropropriedades, por serem características químicas e físicas do material, possuem grande influência nas macropropriedades, que são características obtidas através de ensaios específicos para estimar a capacidade de remoção de água e conferem uma avaliação

sobre o comportamento físico do material durante este processo de tratamento (BARROSO, 2007).

Sobre as micropropriedades, Mortara (2011) menciona que é importante considerar que o período de armazenamento, mesmo se mantidas as condições dos reatores em que foram gerados os lodos coletados, altera as características do material e, conseqüentemente, influencia sua facilidade de remoção de água. Menciona ainda que a alteração do comportamento reológico do lodo submetido a diferentes períodos de armazenamento, indica que outras propriedades também são alteradas. Segundo ele, aplicando as mesmas tensões em uma mesma amostra de lodo submetida a tempos de armazenamento crescentes é possível observar um aumento da taxa de cisalhamento. Ou seja, os flocos se tornam mais frágeis com tempos de armazenamento crescentes, o que altera a capacidade de remoção de água.

A distribuição e o tamanho das partículas e flocos do lodo, também chamada de distribuição granulométrica, indica o percentual de sólidos do lodo que pertencem a um mesmo intervalo de diâmetros, e possui grande influência sobre o processo de remoção de água. Tais percentuais podem ser obtidos, entre outros métodos, por peneiramento seco, peneiramento úmido, sedimentação, fracionamento por filtração, e por espectroscopia por dispersão de energia de raios-X ou análise de imagem de microscopia eletrônica de varredura (MORTARA, 2011).

Entre outros fatores, a distribuição granulométrica dos flocos do lodo é influenciada pelo grau de agitação no processo em que o lodo foi gerado ou, ainda, alterada pelo transporte do lodo até o local de tratamento. Esta característica também é utilizada para definir as dosagens de condicionantes e a porosidade ideal dos meios filtrantes utilizados, sendo que sua determinação é requisito para alguns métodos racionais de dimensionamento de geossintéticos utilizados na filtração e separação de materiais (MORTARA, 2011).

Mortara (2011) aponta que a forma e a estrutura dos flocos são determinantes da resistência específica à filtração, da densidade e compressibilidade do material e da

capacidade do lodo de manter sua drenabilidade quando submetido a altas energias de mistura, que podem quebrar os flocos, aumentar o percentual de finos e diminuir a eficiência do processo. Logo, lodos com flocos bem formados, de estrutura compacta e rígida, possuem facilidade de remoção de água e mantém esta característica mesmo quando submetidos a misturas com altos gradientes hidráulicos e grandes tensões de cisalhamento.

A concentração de sólidos no lodo também pode interferir na capacidade de remoção de água, tanto nas taxas iniciais de drenagem quanto no teor final de sólidos na torta. Referências clássicas neste sentido (RANDALL; KOCH, 1969; WEF 1998) relatam tempos totais de drenagem duas vezes maiores para lodo com concentração de sólidos de 38g/L em relação a lodo com concentração de sólidos de 7,6g/L. Novak e Haugan (1980) verificaram que lodos com maiores concentrações de sólidos possuíam piores desempenhos de remoção de água na etapa de desaguamento.

Uma vez que lodo de reatores UASB normalmente possui concentração de sólidos entre 15 e 40 g/L (ALEM SOBRINHO, 2001), não se espera que este fator tenha interferência nos experimentos desta pesquisa. Porém, mesmo que a variação da capacidade de drenagem neste intervalo de concentração de sólidos seja mínima, recomenda-se que diferentes amostras de lodo sejam diluídas de forma a manterem concentrações de sólidos aproximadas, para que esta característica não interfira na avaliação da capacidade de remoção de água e comparação de desempenho entre lodos (MORTARA, 2011).

A concentração de sólidos também influencia na viscosidade do material e, portanto, na drenabilidade e capacidade de remoção de água. A capacidade de remoção de água também depende da temperatura, pois, além de influenciar as condições do crescimento biológico, e, assim, as características do lodo secundário (WPCF, 1983), ela é determinante da viscosidade e da tensão superficial da água.

De acordo com Mortara (2011), o lodo bruto gerado em ETE é composto em grande parte por água, sendo que os teores de sólidos de lodos adensados quase nunca ultrapassam

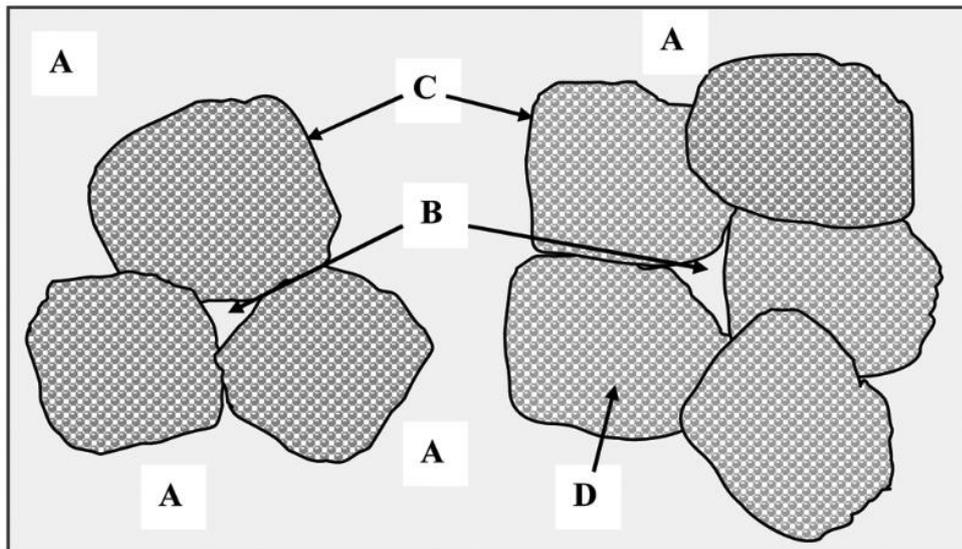
10%. A associação entre água e sólidos exerce grande influência na capacidade de “perda” de água, pois, quanto menor for a fração de água ligada às partículas sólidas, maior será o volume percentual de água no estado livre e maior também será a velocidade de remoção de água na etapa de desaguamento.

Existem vários estudos que caracterizam a água presente no lodo. A divisão simples de água presente no lodo em água ligada e água livre não é suficiente para descrever os mecanismos físicos e químicos no processo de remoção de água. Alguns autores dividem a porção de água em três, outros em quatro ou cinco e outros em até seis frações diferentes. Neste trabalho será adotada a divisão da água em quatro grupos (Figura 3.5) que possuem clara distinção dependendo de sua ligação física às partículas do lodo (VESILIND, 1994; VESILIND;HSU, 1997; SMITH;VESILIND, 1995):

- Água livre: água que não está ligada às partículas. Em outras palavras, a água livre não se associa com outras partículas sólidas e é facilmente retirada ou separada da fase sólida.
- Água intersticial ou capilar: água que está ligada por efeito ou força de capilaridade entre os flocos de lodo ou água presa em fenda e espaços intersticiais ou flocos. Esta água pode ser removida quando o floco é quebrado. Necessita de condicionamento químico ou forças mecânicas (por exemplo, uso de centrífugas) para que possa ser separada dos sólidos.
- Água superficial, vicinal, de união, adsorvida ou coloidal: água que está associada com as partículas sólidas. Múltiplas camadas de moléculas de água são mantidas firmemente à superfície da partícula por pontes de hidrogênio. Esta água é mantida sobre as superfícies das partículas em virtude da estrutura molecular das moléculas de água, e não pode ser removida por métodos mecânicos.
- Água intracelular: água de hidratação ou ligada quimicamente à estrutura da partícula. Ela pode ser removida somente por meio da destruição termoquímica das partículas,

ou seja, necessita que os flocos sejam quebrados através de tratamento térmico para ser liberada.

De acordo com WPCF (1983), o lodo secundário do processo de lodo ativado, por exemplo, tem sua taxa de água aumentada se o pH é reduzido de 8 para 3. Logo, este parâmetro, além de ter grande influência na etapa de condicionamento, é também determinante na capacidade de remoção de água do lodo.



**Figura 3.5** – Apresentação esquemática da água no lodo de esgoto: A – água livre; B – água intersticial; C – água superficial; D – água intracelular.

*Fonte: Tuan et al. (2012).*

A carga elétrica superficial dos sólidos no lodo é a responsável pelas forças de repulsão entre as partículas coloidais e os flocos, impedindo que estas se aglomerem a eles e formem estruturas mais densas e pesadas. Uma das responsáveis por estas forças repulsivas é a própria água adsorvida na partícula, normalmente chamada de água superficial ou coloidal, que forma uma camada na superfície dos sólidos e impede que eles se aproximem. As forças de repulsão podem ser medidas pelo potencial Zeta (mV) da solução (KRISHNAMURTHY; VIRARAGHAVAN, 2005).

A compressibilidade do material também exerce influência no processo de remoção de água do lodo, pois a deformação dos sólidos do lodo pode fechar espaços vazios que serviriam como caminho para o escoamento da água ou mesmo contato com o ar. Assim,

materiais compressíveis possuem maior dificuldade para a retirada da água e resultam em torta com maiores teores de umidade (MORTARA, 2011).

A partir deste momento, as etapas que compõem o processo de remoção de água do lodo de esgoto serão, separadamente, tratadas.

### **3.3.1. Adensamento**

O adensamento consiste em uma etapa de redução do volume de lodo a ser digerido, pois como o tempo de detenção em um digester é longo, cada decréscimo no volume a ser digerido significa grande redução no tamanho deste reator. O tempo de detenção varia com a temperatura no reator e, no Brasil, este tempo fica em torno de 15 a 20 dias a uma temperatura média de 30°C (MIKI, 1998). O adensamento do lodo pode ser realizado mecanicamente, mas o lodo primário é comumente adensado por gravidade e o lodo secundário, que também pode ser adensado por gravidade, por vezes é flotado, o que permite taxas de aplicação superficial superiores (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2007). Logo, o adensamento consiste basicamente em sedimentação ou flotação do lodo de esgoto.

### **3.3.2. Digestão**

A digestão é um processo de tratamento da fase sólida realizado para redução do teor de sólidos voláteis no lodo, diminuindo assim, o material putrescível presente e permitindo a melhoria de suas características tanto para o desaguamento quanto para disposição final. Nesse processo, a matéria orgânica volátil é transformada em gases, água e é mineralizada pela ação de agentes bioquímicos. Esta etapa de tratamento é realizada apenas em lodo primário e secundário gerado em processos aeróbios, nos quais a fração de sólidos voláteis é elevada. Nestes lodos a digestão é muitas vezes realizada de forma anaeróbia, objetivando evitar o alto consumo de energia de digestores aeróbios (MORTARA, 2011).

O grau de mineralização do lodo é expresso pela relação entre sólidos totais voláteis e sólidos totais no lodo. Quanto menor esta relação, maior a presença de sólidos não voláteis no lodo e, portanto, maior o grau de mineralização da matéria orgânica presente no lodo. Como os sólidos não voláteis, que também são denominados de sólidos fixos, são estáveis e não putrescíveis, o grau de mineralização também pode ser denominado como grau de estabilização (METCALF; EDDY, 1991).

De acordo com Spellman (1997), se o lodo tem maior grau de mineralização, assumindo que as outras características se mantenham constantes, a taxa de remoção de água aumenta. Dessa forma, um lodo mal digerido e em estado de putrefação possui menores taxas de remoção de água que o mesmo lodo após a digestão.

Samudio (1993) explica que um lodo não digerido, quando em processo natural de desaguamento, não forma as fissuras responsáveis pelo aumento da área de exposição ao ambiente e, portanto, não se beneficia do conseqüente aumento da taxa de evaporação provocado por estas fissuras na torta. Este tipo de lodo, desaguado em leito de secagem convencional, pode chegar a 30% de teor de sólidos e, para isso, demanda um longo período de exposição. Vale ressaltar que este percentual máximo é variável, dependendo de condições climáticas e tempo de exposição, podendo, portanto, ultrapassar 30% de ST.

No entanto, o tipo de processo de digestão, anaeróbio ou aeróbio, também influencia na facilidade de remoção de água, sendo que os métodos de estabilização pela via aeróbia geram um lodo com maior facilidade de remoção da água (admitindo grau de mineralização equivalente) (SAMUDIO, 1993).

Samudio (1993) relata também que, em leitos convencionais, a drenagem é responsável por 70% da água retirada do lodo digerido aerobiamente e apenas 20% para o lodo anaeróbio. Desta forma, e considerando que a evaporação possua influência constante independente do tipo de digestão sofrida pelo lodo, a remoção de água de lodos aeróbios tenderia a ser mais rápida, demandando menor tempo de evaporação.

### **3.3.2.1. Digestão Aeróbia**

O processo de digestão aeróbia é muito similar ao processo de lodos ativados aplicado em ETEs. Os lodos são despejados em um tanque e misturados em condições aeróbias. A medida em que o substrato se esgota, os micro-organismos começam a consumir seu próprio protoplasma a fim de manter suas funções metabólicas. Esta fase é denominada de fase endógena, e os produtos finais são dióxido de carbono, água e amônia. Posteriormente a amônia se oxida para formar nitratos. A reação global é a seguinte:



Na digestão aeróbia é muito importante considerar os efeitos de acidez produzidos pela oxidação da amônia a nitratos, já que, caso o nível de alcalinidade presente no efluente não seja suficiente, é necessária adição de algum reagente para manter o pH no nível desejado.

Existem basicamente três tipos de processos gerais para digestão aeróbia:

- Digestão convencional;
- Digestão com oxigênio puro;
- Digestão termofílica.

### **3.3.2.2. Digestão Anaeróbia**

No processo de digestão anaeróbia os lodos são adicionados em um tanque e são misturados em condições livres de oxigênio. Com o esgotamento do substrato disponível, os micro-organismos presentes entram na fase endógena e como produtos finais se obtém metano, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e traços de outros gases. A digestão anaeróbia é um processo que depende da ação de uma associação de bactérias, classificadas como hidrolíticas, acetogênicas, acidogênicas e metanogênicas.

O fator limitante do processo se refere à metanogênese, uma vez que as bactérias formadoras de metano (grupo de micro-organismos anaeróbios estritos) são extremamente

sensíveis às alterações ambientais, e o seu bem-estar é de essencial importância dentro do processo de digestão. Tais bactérias se desenvolvem apenas em determinadas faixas de pH e temperatura, e também são de tempo de crescimento lento, pois necessitam de tempos de detenção maiores (de 20 a 60 dias) para que se permita manter contato com os microorganismos e com o material, e também para evitar a perda de biomassa no reator. Uma vantagem deste processo é a produção de metano, já que pode ser comercializado e introduzido no processo para reduzir os custos. Assim como na digestão aeróbia, existem basicamente três classificações gerais de digestão anaeróbia:

- Digestão anaeróbia convencional;
- Digestão de uma fase e alta carga;
- Digestão em duas fases.

*Digestão anaeróbia convencional.* O processo de digestão convencional é realizado em uma única fase. Neste processo, a digestão, o adensamento do lodo e a formação de sobrenadantes ocorrem de forma simultânea. O lodo bruto é adicionado ao local onde o lodo é digerido ativamente e há produção de gás, e normalmente são aquecidos por meio de um permutador de calor externo. Raramente são utilizados mecanismos de agitação ou mistura, já que as bolhas de gás ascendentes arrastam partículas de lodo e outros materiais, proporcionando mistura suficiente para o processo. Quando o gás alcança a superfície, forma-se uma camada de espuma, chamada de sobrenadante. Durante o processo de digestão o reator se estratifica, pois não existem mecanismos que proporcionem mistura completa ou plena, sendo possível apenas para 25 a 50% do volume total do digestor.

*Digestão de uma fase e alta carga.* Este processo é muito semelhante ao convencional, contudo, como o próprio nome indica, cargas orgânicas mais altas são introduzidas, e isto é possível porque a estratificação do digestor é evitada devido à recirculação do gás, utilização de misturadores mecânicos e de bombeamento, e ainda se mantém o aquecimento do lodo para acelerar a destruição da matéria orgânica. Os digestores são maiores para favorecer uma

mistura mais efetiva (não se separa o sobrenadante), os sólidos se reduzem em torno de 45-50%, e o lodo digerido pode alcançar metade da concentração em relação lodo bruto ou lodo afluente. O gás produzido pode ser armazenado em um tanque de pressão.

*Digestão em duas fases.* Neste processo um digestor de alta carga se combina em série com um segundo tanque de digestão. No primeiro digestor ocorre a mistura e a digestão, enquanto o segundo tanque serve para armazenar e concentrar o lodo digerido, com a finalidade de se obter um sobrenadante relativamente clarificado. O sistema de dois tanques ou duas fases foi concebido para encurtar o tempo de digestão. Ambos digestores são mantidos cobertos e no segundo tanque se armazenam grandes quantidades de biomassa ativa que pode ser transferida caso ocorram problemas no funcionamento do primeiro tanque.

### **3.3.3. Desaguamento**

Depois de adensado e digerido, o lodo deve ser desaguado para que seu volume seja reduzido, tal como os custos com seu transporte à etapa posterior de remoção de água (secagem) ou transporte até o local de destinação final, se for o caso. A retirada da água presente no lodo digerido pode ser realizada de forma natural ou mecanizada. Os métodos naturais incluem lagoas de lodo, leitos de secagem, leitos de drenagem, leitos solares, bags e disposição no solo, e os processos mecanizados são aqueles que utilizam centrífugas, métodos de filtração (filtros prensa de placas, filtros prensa de esteira, filtros a vácuo, etc.), entre outros (MORTARA, 2011).

Como já elucidado, o tratamento da fase sólida em ETE tem de início o adensamento como processo utilizado para redução de volume ou aumento da concentração e, depois, o processo de digestão para estabilização do material. O desaguamento é utilizado na sequência do tratamento da fase sólida com o intuito de: elevar o teor de sólidos, reduzir os custos de transporte, preparar o lodo para etapa posterior de remoção de água (secagem) e também possibilitar seu aproveitamento ou mesmo disposição final ocupando menores volumes.

Metcalf e Eddy (2003) destacam que os principais motivos para que seja realizado o desaguamento dos lodos são:

- Reduzir os custos com transporte para disposição final devido ao menor volume ocupado pela torta por conta da retirada parcial de água;
- Facilitar o manejo do lodo;
- Aumentar a possibilidade de incineração do lodo devido ao menor teor de umidade;
- Reduzir o custo com utilização de produtos químicos se a compostagem for o processo escolhido para beneficiamento do lodo;
- Diminuir o potencial ofensivo do lodo e favorecer melhores práticas gerenciais;
- Reduzir a geração de lixiviado quando da disposição final do lodo no solo.

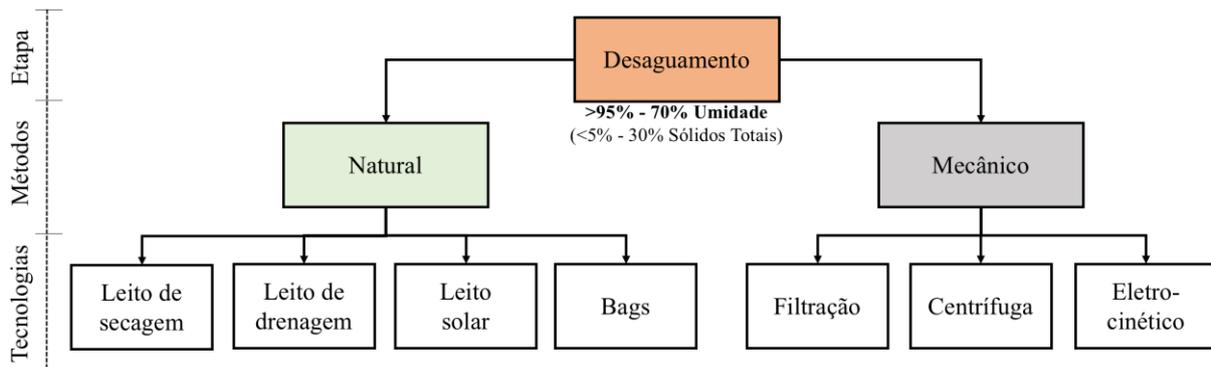
A eficiência da etapa de desaguamento depende principalmente do método adotado e das características específicas do lodo. Os métodos de desaguamento mecanizados sofrem interferências das características físicas do equipamento e de condições de operação. Já os métodos naturais são condicionados pela estrutura física do método e também por condições climáticas.

A facilidade com que a água passa por entre as partículas do lodo e é retirada da torta, também chamada de capacidade de desaguamento ou filtrabilidade (JACOMASSI, 2009), depende de algumas propriedades específicas do lodo.

No processo de desaguamento, à medida que a água é retirada do lodo, este sai de um estado aquoso inicial (99,9 a 95% de umidade) para uma pasta e, em seguida, para uma torta de lodo (OUTWATER, 1994). Finalmente, se submetido à etapa posterior de remoção de água (secagem), o resíduo passa para o estado de grãos ou pó de lodo. Segundo Mortara (2011), o processo de desaguamento possui maior viabilidade até cerca de 30% de teor de sólidos (70% de umidade), geralmente não sendo utilizado até concentrações superiores e, portanto, finalizado na fase de torta. Isso ocorre, pois, a partir deste percentual de sólidos, o

lodo já adquiriu a consistência necessária ao seu manuseio por ferramentas e a redução de volume proporcionada pela retirada da água do lodo não é tão facilitada. No Brasil, segundo experiências de visitas *in loco*, as quais congruem com os dados apresentados na Tabela 3.3, o tratamento da fase sólida de esgotos, quando realizado, se finaliza na etapa de desaguamento, sendo este realizado principalmente por meio de uso de tecnologias mecanizadas, como o uso de centrífugas desaguadoras e filtros prensadores, amplamente adotados. Após a obtenção da torta de lodo, a maioria das ETEs a destina aos aterros sanitários, configurando infração às disposições da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010).

A Figura 3.6 representa, esquematicamente, alguns métodos de desaguamento de lodo de ETE, classificando-os como naturais ou mecânicos.



**Figura 3.6** – Esquema dos métodos de desaguamento de lodo de ETE.

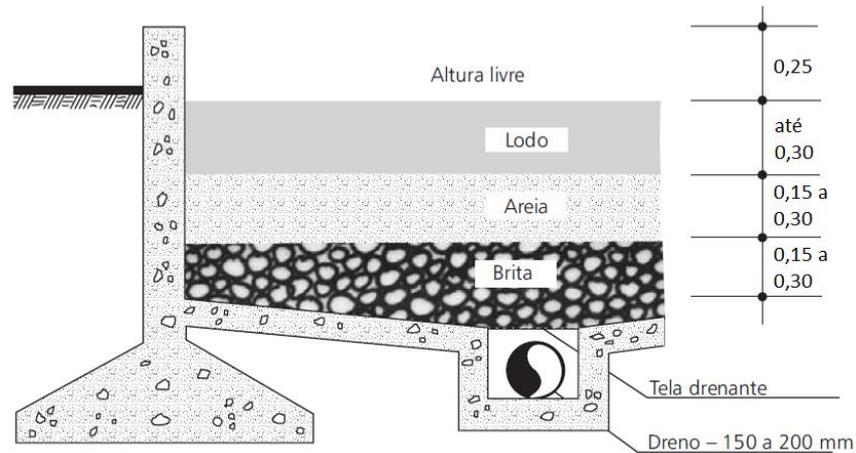
Além das classificações dos métodos apresentados na Figura 3.6, é importante mencionar a existência da adoção de métodos combinados, sejam eles naturais e mecânicos. Ou seja, ao longo do processo de desaguamento o lodo pode ser submetido a dois métodos naturais ou mecânicos em série, ou um método natural seguido de um mecânico, ou ao contrário. Além disso, devido à combinação de dois ou mais métodos, o produto final pode ser caracterizado como torta ou mesmo grãos de lodo, dependendo do teor de umidade final e, portanto, podendo ser considerado como lodo submetido a processo de desaguamento e secagem, e não apenas a processo de desaguamento (BENNAMOUN, 2012).

A partir da representação anterior, seguem sucintas abordagens das tecnologias de desaguamento presentes na Figura 3.6.

### 3.3.3.1. Desaguamento Natural

#### Leito de secagem

Leitos de secagem consistem em tanques rasos compostos de duas ou três camadas de areia com granulometria variável e cerca de 30cm de espessura. A Figura 3.7 representa o sistema completo: camada suporte, meio filtrante e sistema drenante.



**Figura 3.7** – Representação esquemática de leito de secagem (corte).

Fonte: Cordeiro (1999).

A camada suporte do leito de secagem possui uma espessura aproximada de 0,3m de areia com tamanho efetivo de 0,3 a 0,5mm e coeficiente de não-uniformidade menor que 5,0. Sua finalidade consiste basicamente em manter a uniformidade da espessura do lodo, permitir remoção manual facilitada do lodo, e evitar que ocorram perturbações no nível e declividade do fundo devido à movimentação de funcionários sobre o leito.

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

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

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

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

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

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

Fonte: WPCF (1983).

Um exemplo de utilização de leito de secagem é a ETA de Nova Odessa-SP na qual, segundo estudos realizados por Pessoa (2007), o lodo gerado nos decantadores da ETA apresenta umidade de aproximadamente 95% e, após um período aproximado de 30 dias de exposição do lodo no leito de secagem, este atinge cerca de 30 a 40% de umidade. Contudo, estes dados são relativos à utilização de leito de secagem para lodo de ETA, comportamento que se difere bastante quando se aplica lodo de ETE, independente da tipologia de tratamento. As Figuras 3.8 e 3.9 ilustra aplicações de leitos de secagem.



**Figura 3.8** – Leitos de secagem – ETA de Nova Odessa-SP.  
*Fonte: Pessoa (2007).*

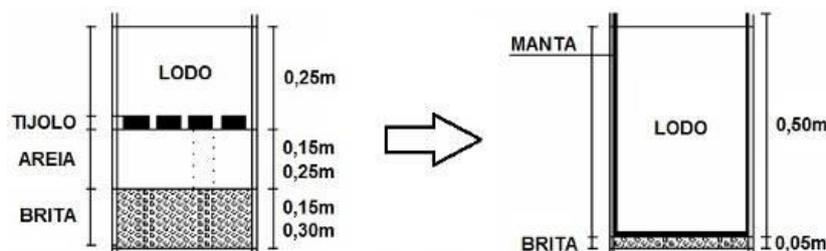


**Figura 3.9** – Leito de secagem, ETE de São Domingos das Dores (MG).  
*Fonte: Delboni Engenharia (2008).*

### **Leito de drenagem**

O leito de drenagem, tecnologia desenvolvida por Cordeiro, na UFSCar, a partir do ano de 1993 (CORDEIRO, 2001), consiste em um sistema natural de remoção de água de lodo, em princípio desenvolvido para ETAs, cujos princípios de operação e funcionamento se baseiam em fundamentos de drenagem e evaporação. O diferencial principal deste sistema consiste em sua alta taxa de remoção de água livre inicial devido a sua alta capacidade de drenagem do resíduo.

Pode-se dizer que, assim como o leito de secagem, o leito de drenagem possui duas etapas de operação que podem ou não ocorrer simultaneamente. Uma delas é a drenagem da água livre, e outra, a evaporação. A drenagem depende de fatores físicos ligados à filtração, ou seja, para o caso dos leitos de drenagem utilizados para desaguar lodos de ETAs, depende basicamente das características da manta geotêxtil utilizada. Já a etapa de evaporação, depende de fatores ligados ao clima que podem ou não serem favoráveis à aceleração na remoção de água nesta etapa. A Figura 3.10 ilustra de forma simplificada a evolução do leito de secagem tradicional para o leito de drenagem.



**Figura 3.10** – Esquema da evolução do leito de secagem tradicional (esquerda) para o leito de drenagem (direita).

*Fonte:* Adaptado de Cordeiro (1999).

Em relação à etapa de evaporação, estudos realizados por Reis (2011) com lodo de ETA utilizaram cobertura plástica no leito de drenagem, cujos resultados demonstraram que, quando se utiliza cobertura plástica (transparente, de referência comercial PVC 0,30mm), o processo de evaporação da água presente no lodo é acelerado e a ocorrência de precipitação não interfere em momento algum na remoção de água do lodo, permitindo-se, em alguns ensaios, obter lodo final até 56% mais “seco” que na ausência de cobertura. Quanto à etapa de drenagem, ensaios em escala de laboratório (bancada), também realizados por Reis (2011), apresentaram resultados promissores quando da realização de condicionamento prévio do lodo bruto de ETA com polímero catiônico (Praestol 853 BC), duplicando a eficiência da drenagem inicial do lodo. Em contrapartida, ensaios laboratoriais com mantas geotêxteis de características distintas apenas confirmaram a superioridade da utilização de manta do tipo não tecida de filamento curto e densidade superficial  $600\text{g/m}^2$  em relação às demais testadas,

no que se refere à obtenção de melhor eficiência na drenagem inicial da água presente no lodo bruto de ETA.

Em relação à utilização do leito de drenagem para desaguamento de lodo anaeróbio de ETE, resultados obtidos por Mortara (2011) indicaram que para se atingir teor de sólidos de 25 a 30% o período de secagem necessário com e sem a aplicação de polímero foi de aproximadamente 30 dias, o que revelou dificuldade no desaguamento para a concepção do leito de drenagem utilizado nos ensaios (manta geotêxtil de gramatura de 289g/m<sup>2</sup> da Huesker®).

Por se tratar de uma tecnologia utilizada nos ensaios conduzidos nesta pesquisa, foi elaborado um tópico específico sobre leito de drenagem (3.4. Leito de Drenagem) para detalhar melhor os aspectos relacionados a esta tecnologia, bem como os resultados encontrados na literatura, principalmente relacionados à sua aplicação para desaguamento de lodo de ETE.

### **Leito Solar**

Estudos relativos à secagem solar de lodos têm sido desenvolvidos, aplicados e modificados há algumas décadas. Como exemplo destes estudos iniciados anteriormente é possível citar os leitos solares mostrados por Cornwell e Vandermeiden (1998), utilizados no sul e sudoeste dos EUA. É importante mencionar que, embora o leito de secagem e o leito de drenagem dependem de características climáticas quando da sua operação, ou seja, dependem de variáveis solares, na literatura encontra-se indicações distintas para leito de secagem, leito de drenagem e leito solar, e, por esta razão, optou-se por separar a abordagem destes tipos de leito, seguindo denominação utilizada na literatura.

Como mencionado, este sistema de remoção de água de lodo de ETE continua sendo estudado e modificado, com variações que permitem a melhoria de sua eficiência. Mathioudakis *et al.* (2009) estudaram o processo de secagem solar na Grécia com o objetivo

principal de redução de volume e controle parcial de patógenos. O sistema consistiu em dois leitos cobertos com material de policarbonato, de aproximadamente  $2,5\text{m}^3$  cada, e utilizou lodo de esgoto secundário pré-desaguado (85% de umidade) da ETE de Komotini, na Grécia (Figura 3.11). O teor médio de umidade do lodo diminuiu de 85% para 6% dentro de 7 a 12 dias durante o verão, e para 10% no prazo de 9 a 33 dias no outono, o que resultou em uma redução total de volume de 80 a 85%. Coliformes totais e fecais também foram reduzidos durante o processo. A incorporação de um aquecedor solar de água, com recirculação de água através da parte inferior do protótipo, acelerou o processo de secagem em 1 a 9 dias durante o inverno.

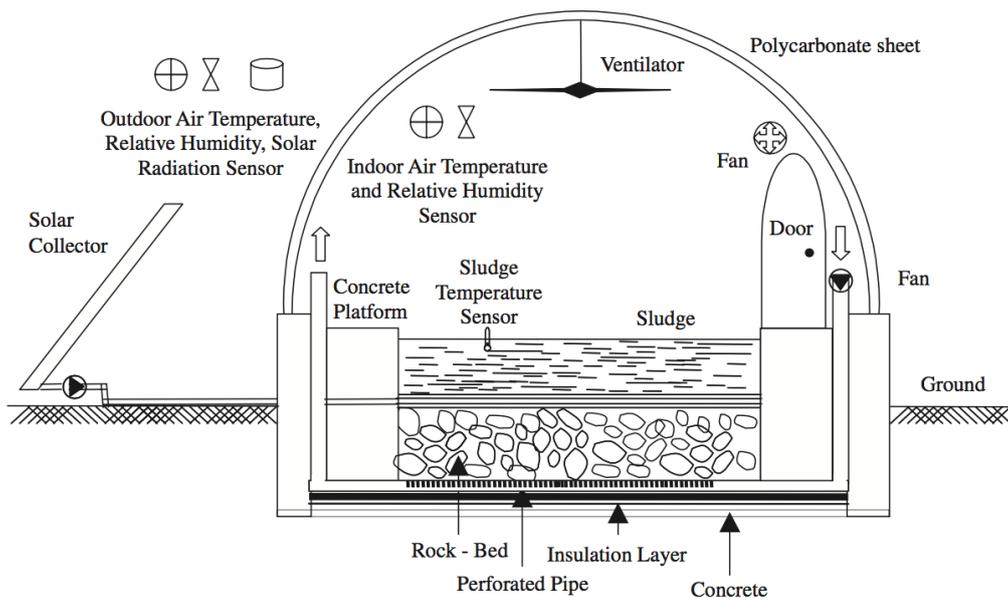


**Figura 3.11** – Protótipos de leitos solares (esquerda) e vista interior do leito (direita).

Fonte: Mathioudakis *et al.* (2009).

Salihoglu *et al.* (2007) estudaram a possibilidade de utilização de leitos solares na gestão de lodo de ETE na cidade de Bursa, na Turquia, e concluíram que a adição de processo de secagem solar na gestão do resíduo levaria à redução de custos no transporte, manuseio e disposição (aterro sanitário), amortizando os custos de implantação desta etapa adicional em quatro anos de operação. Segundo eles, a tendência geral na Turquia é o desaguamento mecânico para se obter teor de sólidos totais (ST) em torno de 20%, seguido de calagem para atender à exigência legal para a disposição em aterro, que é no mínimo 35% de ST. Salihoglu *et al.* (2007) recomendam a calagem juntamente com a secagem solar ao invés de somente a calagem. Os ensaios foram conduzidos em leitos solares de lodo cobertos e sem cobertura, e

teor de ST, condições climáticas e redução de coliformes fecais foram monitorados. Concluiu-se que o protótipo coberto se mostrou mais eficiente que o sem cobertura e afirmou-se que, caso a calagem em conjunto com a secagem solar fosse adotada ao invés de apenas a calagem após desaguamento mecânico, a quantidade total de lodo disposto em aterro sanitário seria reduzida em torno de 40%. A Figura 3.12 representa esquematicamente o leito solar coberto utilizado no estudo.



**Figura 3.12** – Vista esquemática do protótipo de secagem solar coberto.

Notas de tradução: *Solar collector*: coletor solar; *Outdoor air temperature, relative humidity, solar radiation sensor*: sensor externo para medição de temperatura do ar, umidade relativa e radiação solar; *Indoor air temperature, relative humidity, solar radiation sensor*: sensor interno para medição de temperatura do ar, umidade relativa e radiação solar; *Concrete platform*: plataforma de concreto; *Sludge temperature sensor*: sensor de temperatura do lodo; *Sludge*: lodo; *Ventilator*: ventilador; *Fan*: exaustor; *Polycarbonate sheet*: cobertura de policarbonato; *Door*: porta; *Ground*: solo/superfície; *Rock-bed*: camada de pedra/brita; *Perforated pipe*: cano perfurado; *Insulation layer*: camada de isolamento; *Concrete*: concreto.

*Fonte: Salihoglu et al. (2007).*

Bennamoun (2012) ao realizar revisão bibliográfica dos sistemas de secagem solar de lodo concluiu que estes sistemas têm se mostrado satisfatórios para desaguamento, sendo, em geral, ainda mais eficientes quando concebidos e aplicados com cobertura ao invés de sem cobertura, lembrando que a origem do lodo de esgoto pode interferir nos resultados obtidos.

## Bags

Esta tecnologia (Figura 3.13) consiste no armazenamento de lodo em grandes unidades que possuem a forma de saco, constituídas por geotêxtil tecido de polipropileno de alta resistência, que exercem simultaneamente funções de contenção da massa de sólidos e de drenagem dos líquidos presentes no lodo. Esta drenagem ocorre através de pequenos poros, permitindo a redução de volume do resíduo e, obviamente, diminuindo o percentual de líquidos presentes no lodo. Conforme ocorre a redução de volume em uma determinada unidade, esta pode ser preenchida por enchimentos sucessivos até que o volume disponível seja quase inteiramente ocupado pela fração sólida existente no resíduo.



**Figura 3.13** – Bags instalados na ETE de Presidente Prudente – SP.

*Fonte:* Arquivo pessoal (2010).

Assim, após a consolidação do material contido no interior do bag, este é aberto para remoção do lodo (Figura 3.14). Entretanto, o que vem ocorrendo com a aplicação desta tecnologia é a necessidade de grandes áreas para disposição dos bags, por necessitarem de um longo tempo de exposição para efetivar o desaguamento, além da ineficiência do desaguamento da fração de lodo que se encontra na área central do bag.



**Figura 3.14** – Corte do tecido para remoção dos sólidos de um bag.  
*Fonte: GEOTUBE®.*

Boina (2012) analisou sete bags com diferentes idades operacionais, na ETE Limoeiro, em Presidente Prudente-SP, cujo objetivo foi verificar a eficiência deste processo de desaguamento por meio da comparação do teor de sólidos das amostras coletadas. A diferença na idade dos bags analisados variou de 1 a 36 meses e, por se tratar de uma tecnologia de desaguamento caracterizada como de desaguamento contínuo conforme o tempo de operação, esperou-se que os bags com maior idade possuísem teor de sólidos muito maior que o bag mais recente. Contudo, após as devidas análises constatou-se que o tempo operacional dos bags não foi significativo no processo de desaguamento dos lodos, uma vez que o teor de sólidos variou entre o pequeno intervalo de 11,21 a 15,08%. Sendo assim, é possível afirmar que o devido funcionamento desta tecnologia é duvidoso, não alcançando níveis satisfatórios de eficiência, como no caso relatado. Além disso, é possível destacar a extensa área ocupada pelos bags neste caso estudado por Boina (2012), como se verifica na imagem de satélite (Figura 3.15), datada de 26 de agosto de 2016.



**Figura 3.15** – ETE Limoeiro (Presidente Prudente-SP), com destaque (vermelho) para a extensa área ocupada pelos bags utilizados para desaguamento do lodo. Imagem de 26/08/2016.

Fonte: Google Earth.

### 3.3.3.2. Desaguamento Mecânico

Segundo Mamais *et al.* (2009), os dois métodos mecânicos mais dominantes para desaguamento de lodo são filtração e centrifugação. Além destes dois métodos, incluiu-se como um método de desaguamento mecânico ou mecanizado o eletrocinético, uma vez que pode ser classificado como tal e por se tratar de um método considerado inovador e em estudo, segundo EPA (2006). Além destes três métodos de desaguamento mecânicos, EPA (2006) cita ainda, a câmara de pressão, o filtro à vácuo, o filtro prensa tubular, e o filtro prensa de membrana, estes dois últimos considerados como embrionários e, portanto, com necessidade de estudos adicionais para se tornarem consagrados como o filtro prensa de esteira e a centrífuga.

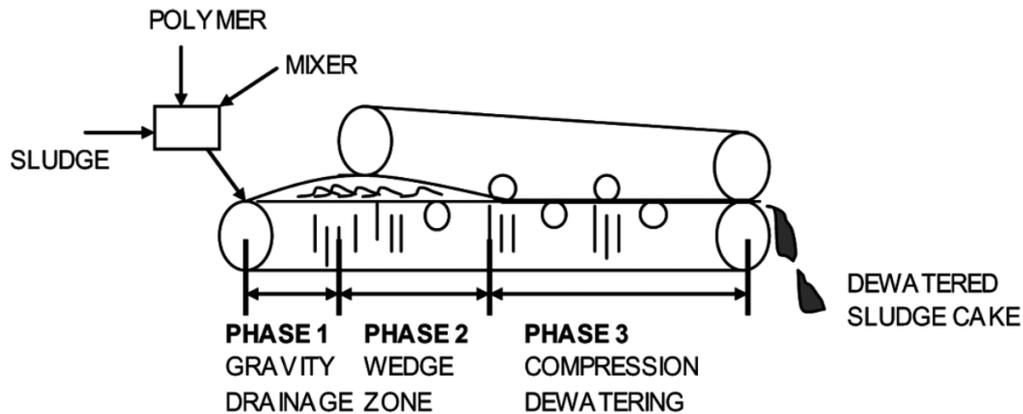
### Filtração

Novak (2006), estudando principalmente métodos de desaguamento mecânico como filtração e centrifugação, menciona que a maioria dos lodos de ETE demandam condicionamento químico prévio para que se obtenha taxas razoáveis de desaguamento. Estes

condicionadores são polímeros orgânicos sintéticos ou íons metálicos, geralmente sais de ferro, que são regularmente utilizados para coagulação de partículas coloidais na água. Logo, o mecanismo básico do condicionamento é a coagulação de coloides no lodo e, a importância disso, não é que o condicionamento aumenta o teor de sólidos na massa de lodo, mas que simplesmente acelera o processo de remoção da água.

Filtração consiste em uma oportunidade para separar água e flocos. Uma opção comum é conhecida como filtro prensa de esteira (Figura 3.16). Os filtros utilizados podem ter leitos filtrantes com uma ou mais camadas. O efluente passa pelo meio filtrante onde os sólidos (flocos e impurezas) ficam retidos, e a água limpa segue para ser destinada adequadamente (SALLANKO, 2011; DAHL, 2008). Os filtros prensa são tecnologias amplamente utilizadas no desaguamento de lodo de ETE. Contudo, dificilmente alcançam um percentual acima de 20 ou 30% de ST na saída do equipamento.

Mamais *et al.* (2009) define filtro prensa de esteira como duas ou, em alguns casos, três correias de filtração que se movem uma em direção à outra, formando um envelope fechado. O lodo floculado é inicialmente desaguado sob gravidade e depois espremido entre duas correias. O desaguamento é realizado em duas etapas: filtração (fases 1 e 2, Figura 3.16) e compressão (fase 3, Figura 3.16). A filtração ocorre na zona de drenagem, em que não é exercida pressão sobre o lodo. Após a zona de drenagem o teor de sólidos do lodo não é superior a 6-10%. Em seguida, devido à pressão progressivamente crescente, parte da água aprisionada dentro e entre as partículas de lodo é removida. Normalmente, o uso de filtros-prensa possibilita alcançar um teor de sólidos entre 15 e 25%, quando o teor de sólidos do lodo bruto varia de 2 a 5%.



**Figura 3.16** – Representação de filtro prensa de esteira.

Notas de tradução: *Sludge*: lodo; *Polymer*: polímero; *Mixer*: misturador; *Phase*: fase; *Gravity*: gravidade; *Wedge*: espécie de cunha; *Compression*: compressão; *Drainage Zone*: zona de drenagem; *Dewatering*: desaguamento; *Dewatering Sludge Cake*: massa de lodo desidratado.

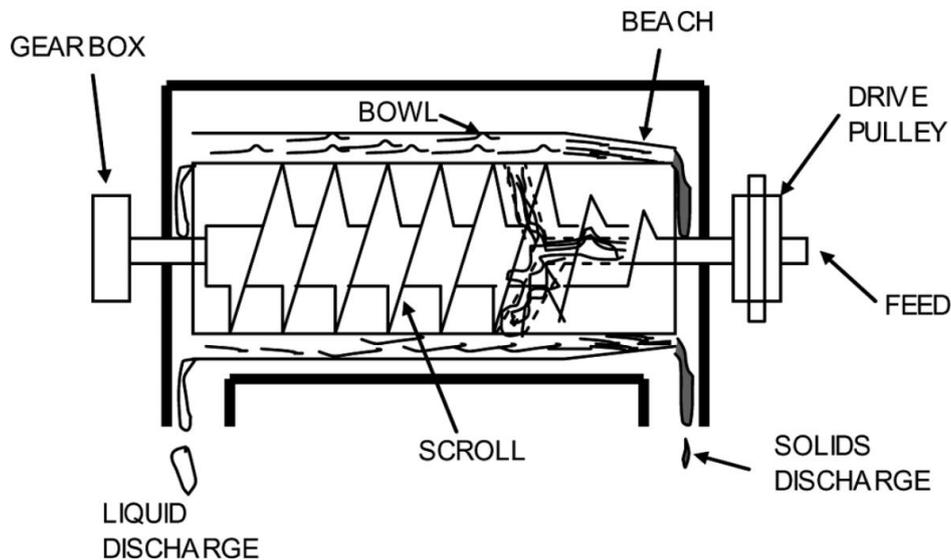
Fonte: Novak (2006).

## Centrífuga

O método de centrifugação pode ser classificado como o mais comum. O lodo é disposto em uma centrífuga decantadora e, por meio do movimento giratório (ação da força centrífuga), o resíduo é constantemente pressionado nas paredes. Um transportador em formato de parafuso remove o lodo compactado ao longo da parede da extremidade da centrífuga. Em contrapartida a água removida do resíduo pode ser coletada em outro compartimento, permitindo sua destinação adequada. Um ponto muito negativo nas centrífugas consiste em seu elevado consumo de energia (DAHL, 2008). Além disso, nas aplicações para lodo de esgoto, os resultados de desaguamento muitas vezes não alcançam o percentual de 25 ou 30% de teor de sólidos no produto de saída, requerendo, portanto, sistemas complementares ou secagem complementar na maioria dos casos. Uma representação de centrífuga é ilustrada na Figura 3.17.

Segundo Mamais *et al.* (2009), as centrífugas decantadoras utilizam um processo de rotação de alta velocidade para realizar o desaguamento por meio de aplicação de altas forças (2000-4000g) diretamente aos sólidos de alimentação. As centrífugas em comparação com os filtros prensa oferecem algumas vantagens como controle mais eficiente de odor e de aerossol durante o processo de desaguamento; menor necessidade de limpeza e menos sujeira nos

arredores do local onde está instalada; menor consumo de água e, frequentemente, maior teor de sólidos na massa de lodo. Em contrapartida, os filtros prensa são mais silenciosos e demandam menores requisitos de habilidade para manutenção.



**Figura 3. 17** – Representação de centrífuga.

Notas de tradução: *Gear Box*: caixa de velocidade; *Liquid Discharge*: descarga de líquido; *Bowl*: cavidade; *Scroll*: rolamento; *Beach*: finalização/borda; *Drive Pulley*: polia motriz; *Feed*: alimentação/entrada; *Solids Discharge*: descarga de sólidos.

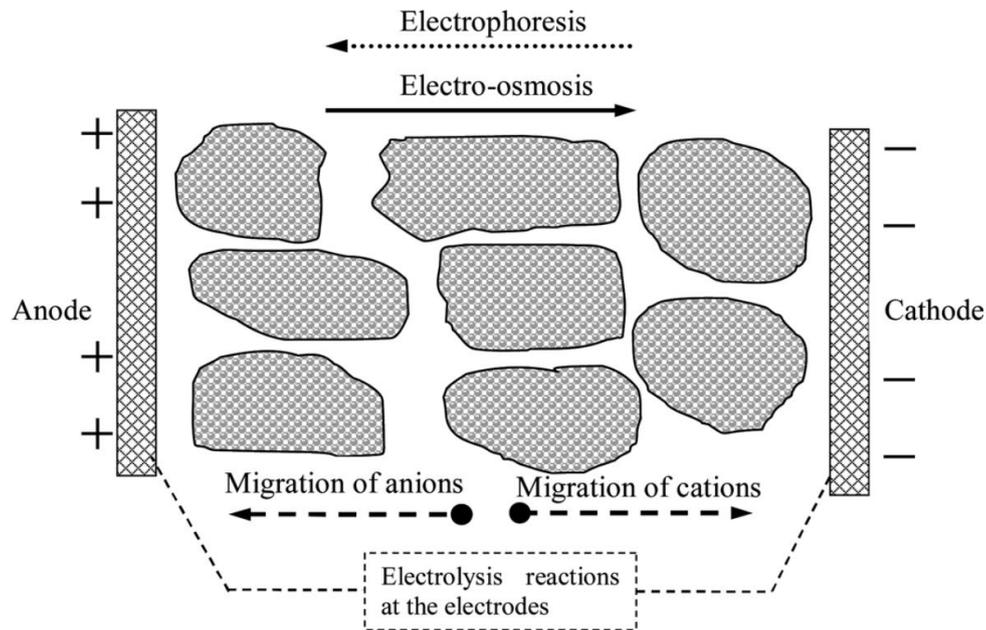
*Fonte:* Novak (2006).

Novak (2006) afirma que o tipo de método de desaguamento usado e o produto químico necessário devem ser analisados em conjunto. Para ele, centrífugas são equipamentos de alta produção de massa de lodo e, mesmo que realizam desaguamento mais efetivo que os filtros prensa em termos de teor de sólidos do lodo processado, isto também deriva de maior adição de produtos químicos. Mamais *et al.* (2009) acrescenta que as vantagens da centrífuga em relação aos filtros vêm juntamente com um maior custo de capital e maior consumo de energia. Logo, a escolha entre estes dois métodos não é fácil e deve ser feita caso a caso, levando-se em conta minimamente fatores como as dimensões ou capacidade da estação de tratamento, as características do lodo, a disposição do lodo e os custos energéticos, a quantidade e qualidade dos produtos químicos utilizados no condicionamento prévio, o custo da mão-de-obra, o tratamento posterior do lodo, entre outros.

## Eletrocinético

O método de desaguamento eletrocinético ou *electro-dewatering* é um processo no qual um campo elétrico contínuo de baixa corrente é aplicado através do segmento de lodo para causar um fenômeno eletro-osmótico, isto é, um fluxo de fluido em uma massa com partícula carregada. O fluxo eletro-osmótico aumenta a remoção de água extra do lodo, resultando em maior teor de sólidos na massa final do lodo após o processo de desaguamento. Quando um campo elétrico é aplicado, assim como a eletro-osmose, ocorrem também a eletroforese, eletromigração e reações eletrolíticas nos eletrodos, e estes processos eletrocinéticos afetam direta ou indiretamente o desaguamento do lodo (TUAN *et al.*, 2012). A Figura 3.18 representa o processo descrito.

A eletro-osmose tem sido utilizada para várias outras aplicações desde 1950 e, segundo Tuan *et al.* (2012), estudos com aplicação de desaguamento eletrocinético de lodo de esgotos se iniciaram no início da década de 1990. A maioria destes estudos investigou o efeito de vários parâmetros, a melhoria do processo e operação, a aplicação em escala real e a comercialização. Existem também estudos que desenvolveram a modelagem matemática do processo, bem como características fundamentais da evolução dinâmica das estruturas de lodo durante o desaguamento eletrocinético. Em se tratando de comercialização em escala real, alguns equipamentos de desaguamento eletrocinético podem ser citados: o sistema linear de desaguamento CINETIK (*Eimco Water Technologies*); o desidratador de eletro-osmose (ELODE, *ACE Korea Incorporation*); o EDW (*Water Technologies of Australia*); e o Electrokinetic (*Electrokinetic Limited*, Reino Unido).



**Figura 3.18** – Fenômeno eletrocinético durante o desaguamento.

Notas de tradução: *Anode*: ânodo; *Cathode*: cátodo; *Electrophoresis*: eletroforese; *Electro-osmosis*: eletro-osmose; *Migration of anions*: migração dos ânions; *Migration of cations*: migração dos cátions. *Electrolysis reactions at the electrodes*: reações eletrolíticas nos eletrodos.

Fonte: Tuan *et al.* (2012).

De acordo com o levantamento realizado por Tuan *et al.* (2012), os equipamentos variam em tamanho, configuração horizontal ou vertical, aplicação de pressão e vácuo, etc. Uma célula cilíndrica de desaguamento eletrocinético com aplicação de pressão é usualmente empregada nos equipamentos, e a eletro-osmose pode ser facilmente combinada com outros métodos convencionais de desaguamento para melhorar a taxa e a eficiência na remoção da água, como, por exemplo, filtros prensa de esteira e centrífugas.

Na revisão realizada por Tuan *et al.* (2012), eles concluem que durante o desaguamento eletrocinético, a eletro-osmose desempenha o papel mais importante na melhoria da separação sólido-líquido. Além disso, as reações de eletrólise nos eletrodos afetam fortemente o desempenho do processo. Já a eletroforese e a eletromigração ocorrem, porém desempenham papel insignificante no processo. Mencionam também que, na prática, quando se aplica o processo de desaguamento eletrocinético combinado ou não com outro método mecânico, existe o condicionamento prévio com polímeros. Contudo, relatam que a

filtração e centrifugação são mais sensíveis às dosagens de polímeros que o processo eletrocinético.

Por fim, apesar dos avanços em eficiência energética e em obtenção de maior teor de sólidos na massa de lodo final no desaguamento eletrocinético, é improvável que substitua os métodos tradicionais de desaguamento em um futuro próximo devido ao maior custo. Contudo, os benefícios advindos da aplicação deste processo são promissores e, portanto, oportunos para serem estudados, principalmente no que se refere à remoção de coliformes fecais, poluentes e sais do lodo (TUAN *et al.*, 2012).

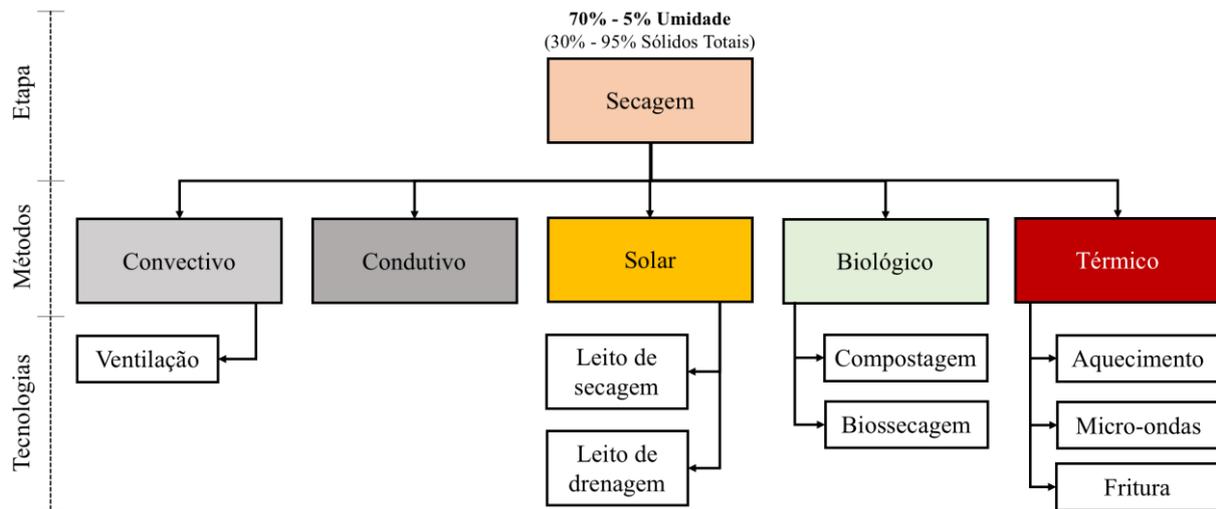
#### **3.3.4. Secagem**

Após ser submetido aos métodos de desaguamento, seja mecânico ou natural, geralmente o lodo de ETE alcança entre 15 e 30% de teor de sólidos totais, uma vez que apenas água livre e uma parcela de água intersticial é possível ser removida com a aplicação destes métodos. Portanto, para se obter maiores teores de sólidos no resíduo, etapa complementar com maior energia empregada na partícula de lodo é necessária. Esta etapa é classificada como secagem do lodo. Alguns métodos de secagem que podem ser citados são: convectivo, condutivo, solar (leito de secagem e leito de drenagem), biológico (compostagem e biossecagem ou *biodrying*), térmico (aquecimento convencional, micro-ondas e fritura), entre outros. Vale ressaltar que algumas tecnologias de desaguamento também podem ser consideradas como tecnologias de secagem uma vez que dependendo das condições climáticas locais e dos procedimentos operacionais (ex. tempo de exposição e frequência de revolvimento), teores de sólidos mais elevados que 30% podem ser alcançados na massa de lodo processada. Exemplos destas tecnologias podem ser os leitos de secagem, os leitos de drenagem e os leitos solares.

Além disso, deve-se considerar a possibilidade de se combinar diferentes métodos de secagem e conseqüentemente obter configuração de secadores híbridos (o resíduo é submetido

a dois ou mais métodos de secagem em série) ou secadores combinados (o resíduo é submetido ao processo de secagem que já conta com dois ou mais métodos combinados, ou seja, simultâneos) (BENAMOUN, L.; ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A., 2013).

A Figura 3.19 representa, esquematicamente, alguns métodos de secagem de lodo de ETE, aos quais o lodo desaguado pode ser submetido.



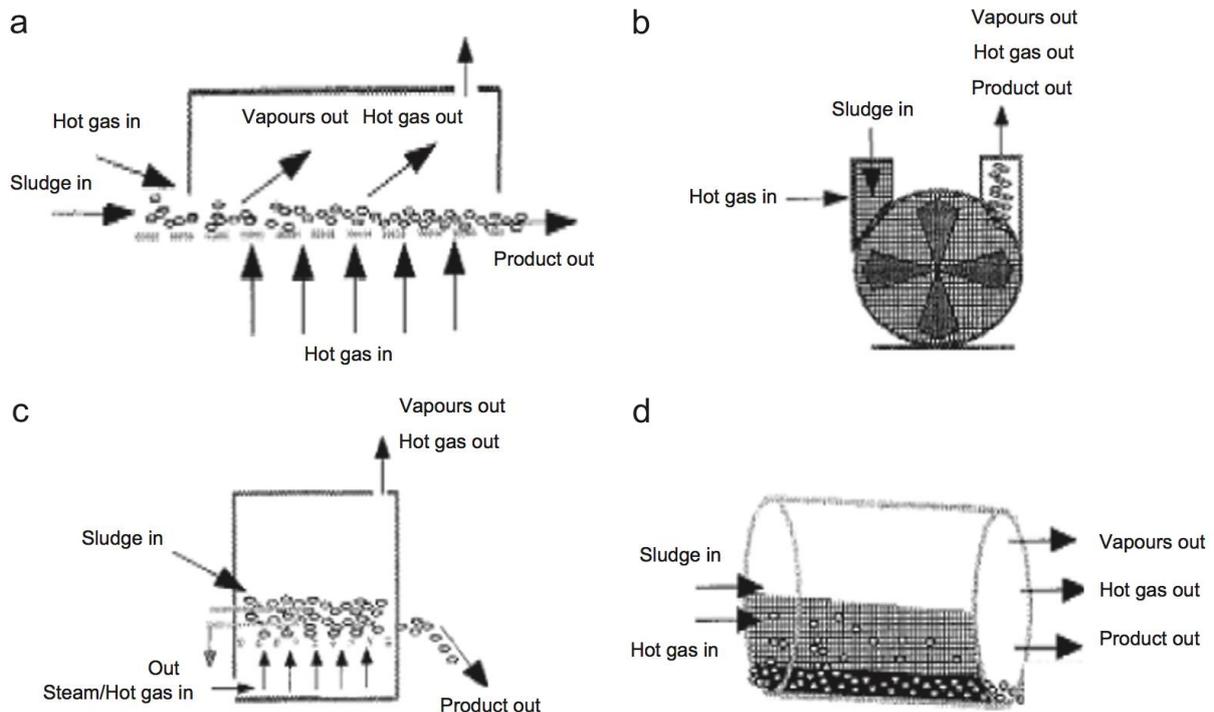
**Figura 3.19** – Esquema dos métodos de secagem de lodo de ETE.

A partir da representação anterior, seguem sucintas abordagens das tecnologias de secagem presentes na Figura 3.19.

#### 3.3.4.1. Método Convectivo

A secagem convectiva por ar quente ou vapor quente atravessa o produto por meio de contato direto, o que promove a evaporação da água do produto. Segundo Arlabosse *et al.* (2012), em escala industrial, podem ser utilizados secadores por convecção com aquecimento direto ou indireto, por meio de combustíveis fósseis, biogás ou queimadores de biomassa, por troca de calor ou secadores com combinação de dois equipamentos. No caso de secadores de escala semi-industrial e laboratorial as fontes de aquecimento são substituídas por resistências elétricas. Para aumentar a taxa de evaporação, a troca superficial entre o produto e o gás quente deve ser maximizada por extrusão ou granulação. Os secadores convectivos mais utilizados são: secadores de correia, secadores de flash, secadores de leito fluidizado e

secadores rotativos. O consumo de energia específico muda de um secador para outro e varia de 700kWh a 1.400kWh por tonelada de água evaporada. A taxa de secagem específica varia de  $0,2\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  para secadores de flash a  $30\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  para secadores de correia. A Figura 3.20 ilustra alguns exemplos representativos de secadores industriais (BENAMOUN, L.; ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A., 2013).



**Figura 3.20** – Exemplos representativos de alguns secadores industriais convectivos de lodo: (a) secador de correia, (b) secador de flash, (c) secador de leito fluidizado, (d) secador rotativo.

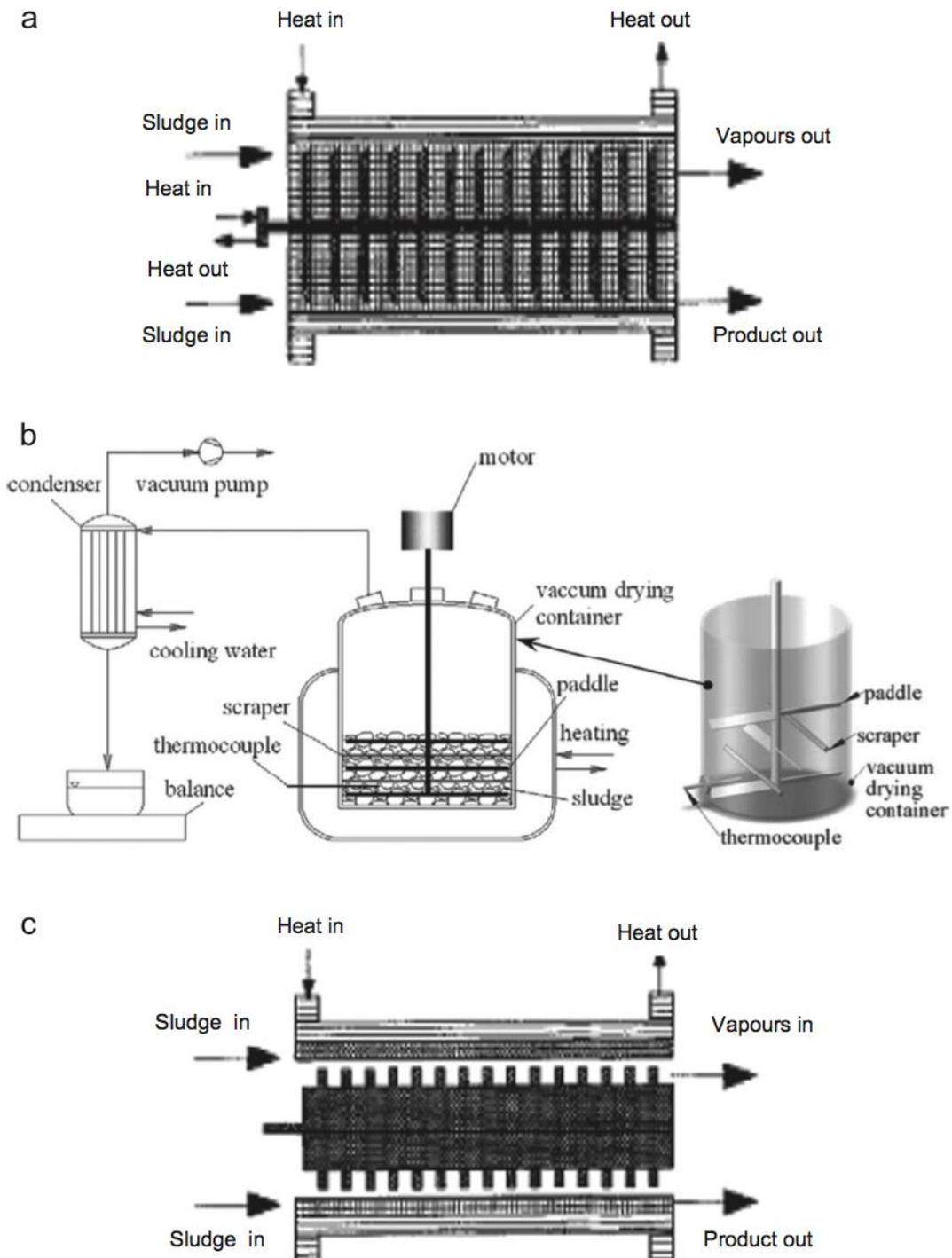
Notas de tradução: *Sludge in*: entrada de lodo; *Steam gas in*: entrada de vapor; *Hot gas in*: entrada de gás quente; *Vapours out*: saída de vapor; *Hot gas out*: saída de gás quente; *Product out*: saída do produto.

*Fonte:* Bennamoun, L.; Arlabosse, P.; Léonard, A. (2013).

### 3.3.4.2. Método Condutivo

Segundo Bennamoun, Arlabosse e Léonard (2013), a secagem condutiva ocorre por meio do aquecimento da superfície do secador, que distribui/conduz o calor para o lodo. Geralmente, são usados como fluido de aquecimento o óleo térmico ou o vapor saturado a 0,85MPa, aquecidos em uma caldeira alimentada com combustível fóssil ou biomassa. As três principais tecnologias utilizadas são: secadores de disco, de pás e de filme fino. Nos três casos é utilizado um rotor cuja conformação tem uma importância decisiva para o transporte de lodo (Figura 3.21). De acordo Arlabosse *et al.* (2012), para os secadores condutivos, o consumo

específico de energia varia de 800kWh a 955kWh por tonelada de água evaporada, e possui taxa de secagem específica superior à da secagem convectiva, com quantidades variando de  $7\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  a  $35\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ .



**Figura 3.21** – Exemplos representativos de alguns secadores industriais condutivos de lodo: (a) secador de disco, (b) secador de pás, (c) secador de filme fino.

*Notas de tradução:* *Sludge in:* entrada de lodo; *Heat in:* entrada quente; *Heat out:* saída quente; *Vapours out:* saída de vapor; *Product out:* saída do produto; *Condenser:* condensador; *Vacuum pump:* bomba à vácuo; *Cooling water:* água de refrigeração; *Balance:* balança; *Thermocouple:* termômetro; *Scraper:* raspador; *Motor:* motor; *Vacuum drier container:* tanque de secagem à vácuo; *Paddle:* pá; *Heating:* aquecimento; *Sludge:* lodo.

*Fonte:* Bennamoun, L.; Arlabosse, P.; Léonard, A. (2013).

### **3.3.4.3. Método Solar**

A secagem solar é realizada em sistemas abertos ou fechados (com cobertura). Neste método a superfície é aquecida devido à exposição à radiação solar, e o lodo é despejado no sistema/leito até alcançar uma altura de lâmina pré-estabelecida que varia entre 0,4 e 0,8m. Ventilação ou vento é utilizado para renovar o ar no sistema e favorecer a saída do ar úmido. Em alguns casos, um sistema automatizado é usado para espalhar, revolver, arejar e até transportar o lodo, renovando a massa superficial e evitando a formação de crosta. Para aumentar a transferência de calor e massa muitas soluções são propostas, tais como: aquecimento do fundo do sistema por injeção de fluidos ou utilizando bombas de calor. Para este método, estima-se que entre 30 e 200kWh são necessários para evaporar uma tonelada de água e, em alguns casos, como por exemplo desodorização química, cerca de 1.000kWh são necessários (BENAMOUN, L.; ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A., 2013).

Segundo conclusões relatadas por Mortara (2011), infere-se que este método só pode ser considerado como etapa de secagem de lodo, se forem realizados revolvimentos periódicos e forem aplicados em regiões com altos índices de radiação solar. Caso contrário, o método solar será considerado como etapa de desaguamento, no que se refere à remoção de água de lodo, dado o baixo teor de sólidos final da amostra, limitando-se a 30% de ST.

### **3.3.4.4. Método Biológico**

Neste método o aquecimento da massa de lodo é promovido pela ocorrência de atividade biológica. Para tanto, é fundamental que condições favoráveis para manutenção da atividade biológica sejam mantidas, principalmente injeção e distribuição de oxigênio em proporções adequadas. Vale mencionar que para que a oxigenação seja efetiva na massa de lodo, espaços de ar livres devem existir e, para promover a existência destes espaços, material estruturante deve ser utilizado, como, por exemplo, madeira triturada. As tecnologias mais importantes que podem ser classificadas como método biológico são a compostagem e a

biossecagem, discutidas a seguir. Embora a compostagem não visa à máxima remoção de água, pode também ser considerada como etapa de secagem, dado o teor de sólidos final do composto (acima de 40% de ST).

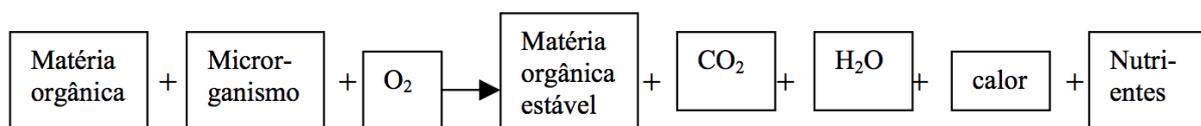
### **Compostagem**

Uma tecnologia comumente utilizada para lidar com resíduos orgânicos é a compostagem biológica, que estabiliza a matéria orgânica em matéria húmica livre de odor mensurável e patógenos, e pode ser benéficamente aplicada no solo (MOTE e GRIFFIS, 1982). A compostagem pode ser definida como uma biooxidação aeróbia exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo, no estado sólido, caracterizado pela produção de CO<sub>2</sub>, água, liberação de substâncias minerais e formação de matéria orgânica estável (FERNANDES e SILVA, 1999). Durante este processo, bactérias, actinomicetos e fungos (bolores e levedura) oxidam ácidos graxos de cadeia longa e curta, produtos de papel e outros poluentes, e produzem calor levando à redução dos resíduos devido à conversão microbiana e evaporação da água (TUOMELA *et al.*, 2000). Protozoários ajudam a consumir bactérias e fungos, enquanto rotíferos controlam o crescimento de bactérias e protozoários, minimizando, portanto, os riscos relacionados à saúde e associados a patógenos (HAUG, 1993). A compostagem visa à máxima conversão da matéria orgânica. Para isso, água é adicionada ao processo quando a fração orgânica atinge baixo teor de umidade a fim de preservar um percentual de umidade ótimo para que seja mantida a atividade biológica e, conseqüentemente, a máxima conversão biológica.

Por se tratar de um processo biológico, os fatores mais importantes que influem na degradação da matéria orgânica são a aeração, os nutrientes e a umidade. A temperatura também é um fator importante, principalmente no que diz respeito à rapidez do processo de biodegração e à eliminação de patógenos, porém é resultado da atividade biológica. Os nutrientes, principalmente carbono e nitrogênio, são fundamentais ao crescimento bacteriano.

O carbono é a principal fonte de energia e o nitrogênio é necessário para a síntese celular. Fósforo e enxofre também são importantes, porém seu papel no processo é menos conhecido. Os micro-organismos têm necessidade dos mesmos micronutrientes requeridos pelas plantas (Cu, Ni, Mo, Fe, Mg, Zn e Na), que são utilizados nas reações enzimáticas, mas os detalhes deste processo são pouco conhecidos (FERNANDES e SILVA, 1999).

O processo de compostagem pode ser simplificado conforme ilustrado na Figura 3.22.

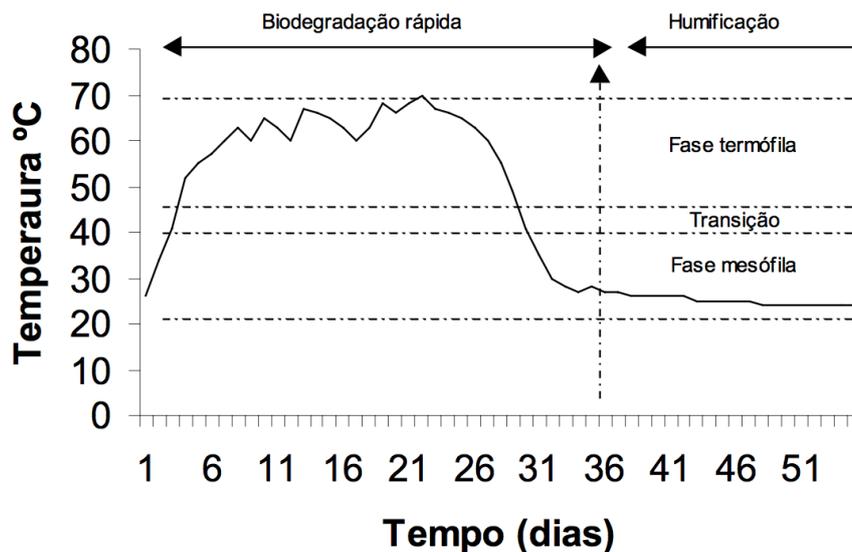


**Figura 3.22** – Esquema simplificado do processo de compostagem.

*Fonte:* Fernandes e Silva (1999).

No início do processo há um forte crescimento dos microrganismos mesofílicos. Com a elevação gradativa da temperatura, resultante do processo de biodegradação, a população de mesofílicos diminui e os microrganismos termofílicos proliferam com mais intensidade. A população termofílica é extremamente ativa, provocando intensa e rápida degradação da matéria orgânica e maior elevação da temperatura, o que elimina os microrganismos patogênicos (Figura 3.23). Quando o substrato orgânico for em sua maior parte transformado, a temperatura diminui, a população termofílica se restringe, a atividade biológica global se reduz de maneira significativa e os mesofílicos se instalam novamente. Nesta fase, a maioria das moléculas facilmente biodegradáveis foram transformadas, o composto apresenta odor agradável e já teve início o processo de humificação, típico da segunda etapa do processo, denominada maturação. Estas duas fases distintas do processo de compostagem são bastante diferentes entre si. Na fase de degradação rápida, também chamada de bioestabilização, há intensa atividade microbiológica e rápida transformação da matéria orgânica. Portanto, há grande consumo de O<sub>2</sub> pelos microrganismos, elevação da temperatura e mudanças visíveis na massa de resíduos em compostagem, pois ela se torna escura e não apresenta odor

agressivo. Mesmo com tantos sinais de transformação o composto não está pronto para ser utilizado. Ele só está apto a ser disposto no solo após a fase seguinte, chamada de maturação. Na fase de maturação a atividade biológica é pequena, portanto, a necessidade de aeração também diminui. O processo ocorre à temperatura ambiente e com predominância de transformações de ordem química: polimerização de moléculas orgânicas estáveis no processo conhecido como humificação (FERNANDES e SILVA, 1999).



**Figura 3.23** – Exemplo genérico da evolução da temperatura de uma leira em compostagem.  
*Fonte:* Fernandes e Silva (1999).

Estes conceitos são importantes, pois eles se refletem na própria concepção das usinas de compostagem. Como na fase de biodegradação rápida ocorre uma redução de volume do material compostado, conseqüentemente a área necessária para a fase de maturação é menor. Durante a maturação alguns testes simples permitem definir o grau de maturação do composto e, portanto, a liberação para seu uso. Ele pode então, se houver interesse, ser peneirado e acondicionado adequadamente para ser mais facilmente vendido e transportado. Mas, para que o processo de compostagem se desenvolva de maneira satisfatória, é necessário que alguns parâmetros físico-químicos sejam respeitados permitindo que os microrganismos encontrem condições favoráveis para se desenvolverem e transformarem a matéria orgânica (FERNANDES e SILVA, 1999).

## **Biossecagem**

A biossecagem ou *biodrying* é uma tecnologia baseada em um processo semelhante ao da compostagem, mas com o objetivo de remover a água de material orgânico, como, por exemplo, lodo de esgoto. A diferença entre compostagem e biossecagem é que esta última não visa alcançar a mineralização completa dos resíduos preservando a umidade para a atividade microbiana ideal. Em vez disso, o calor metabólico é usado para remover a água da massa de resíduo no mais baixo tempo de residência possível e mínima biodegradação, preservando assim o poder calorífico do resíduo. Assim como na compostagem do lodo de esgoto, na biossecagem é necessária a utilização de material estruturante a fim de aumentar os espaços livres na massa e favorecer a passagem e contato do oxigênio com os micro-organismos que, por processo de fermentação aeróbia, degradam a matéria orgânica, liberando calor para o meio externo (WINKLER *et al.*, 2013).

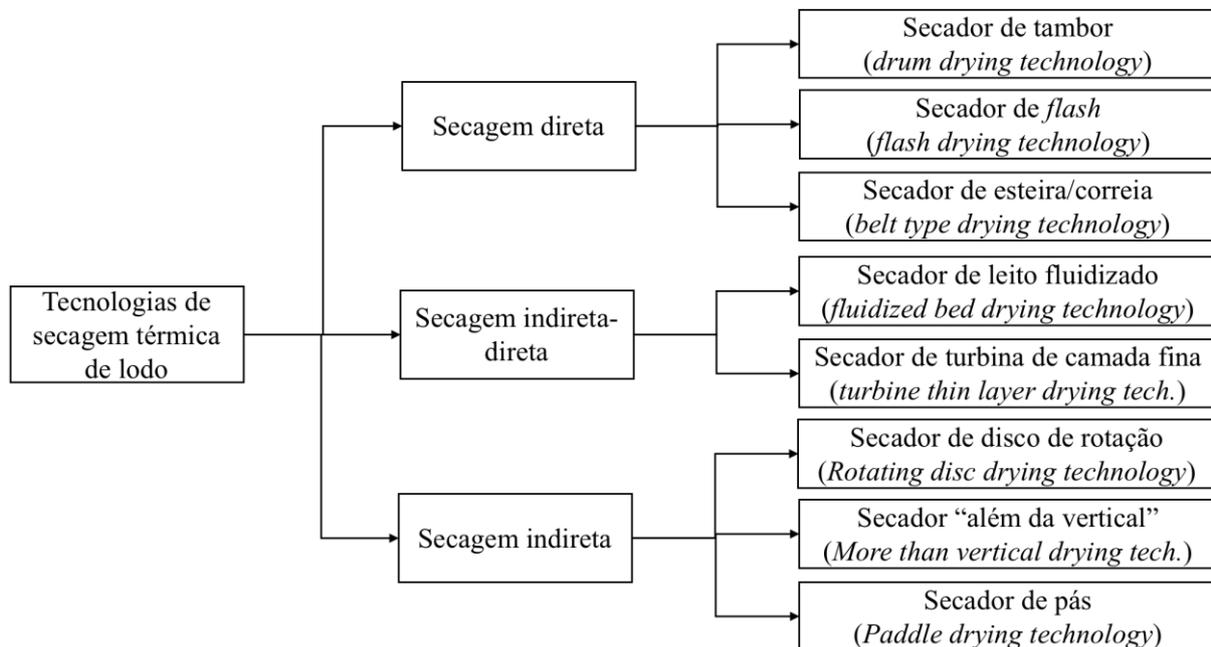
Por se tratar do tema de maior importância no desenvolvimento desta tese, a revisão bibliográfica deste tema será abordada no item “3.5. Biossecagem”, com o objetivo de conferir maior evidência ao assunto e permitir melhor discussão e descrição das contribuições e pesquisas desenvolvidas até o momento, com base na literatura consultada.

### **3.3.4.5. Método Térmico**

Existem vários métodos de secagem de lodo que se classificam como método térmico. Na literatura existem poucas classificações que elucidam as classificações de métodos de secagem de lodo. Inclusive, esta é uma razão de se propor a classificação que existe nesta tese. Na classificação dos métodos de secagem de lodo se observa que alguns processos podem ser classificados em mais do que um tipo de método, primeiro pelas características específicas de funcionamento e, segundo, pelas bases conceituais do processo.

Tao *et al.* (2014) citam que de acordo com a diferença do meio e da forma de contato, as tecnologias de secagem térmica de lodo podem ser divididas em três categorias: método de

secagem direta, método de secagem indireta, e método de secagem combinado (direta-indireta). A Figura 3.24 traz esta divisão proposta por Tao *et al.* (2014).



**Figura 3.24** – Principais tecnologias de secagem térmica existentes.

Fonte: Adaptado de Tao *et al.* (2014).

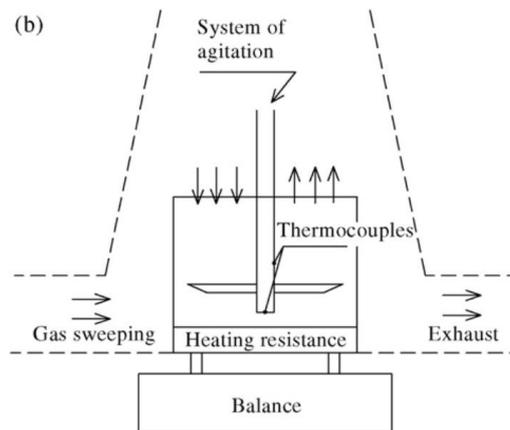
No entanto, para este presente trabalho serão considerados os seguintes processos como tecnologias de método térmico de secagem de lodo: aquecimento convencional, micro-ondas e fritura. Esta subdivisão foi pensada desta forma com objetivo didático, ainda que se possa entender como método térmico todo método de secagem de lodo que demande aumento da temperatura para que ocorra. Logo, como para a remoção de água superficial e intracelular presente no lodo é necessário que exista a quebra da partícula por meio de aplicação de maior nível de energia – na maioria dos casos exercida por aquecimento (aumento da temperatura) – é possível dizer que as tecnologias descritas nos métodos anteriormente tratados neste tópico de “secagem” são suscetíveis de serem classificadas como tecnologias térmicas. Por esta razão, optou-se por propor como métodos térmicos os de aquecimento convencional (em características semelhantes a de inserção do resíduo em fornos convencionais ou estufa), micro-ondas (em características semelhantes a de inserção do resíduo em forno micro-ondas), e de fritura (em características semelhantes a de fritura de alimento).

## Aquecimento Convencional

O aquecimento convencional consiste em tecnologias que se assemelham ao uso de forno (aquecimento de temperatura) para remoção de água de lodo. Existem aplicações como a utilização de gás e energia elétrica para promover o aquecimento. Tais aplicações resultam na remoção de grande parte da água presente no lodo, mas, de maneira geral, deriva de alto consumo de gás e/ou energia. Assim, existem muitos estudos relacionados ao uso de variadas aplicações de aquecimento convencional do lodo para secar o resíduo e destiná-lo a tecnologias de aproveitamento, como, por exemplo, aproveitamento do potencial energético. A seguir são mencionadas aplicações de variações do método térmico de aquecimento.

Romdhana *et al.* (2009), monitoraram o nível de contaminação por micro-organismos patogênicos durante processos de secagem de lodo de esgoto por aquecimento. Dentre as tecnologias utilizadas mencionaram a secagem condutiva por agitação e a secagem em tambor. A primeira consiste em uma tecnologia cujo agente de transferência de calor (resistência elétrica, fluido, etc.) e o produto (lodo) são separados por uma estrutura (parede). Durante o processo, a umidade do lodo de esgoto é mantida em um compartimento de aço aquecido usando um sistema mecânico de agitação (pás, rapadores e outros). A perda de umidade é determinada por pesagem contínua. A temperatura do lodo é medida por termômetros instalados no eixo do agitador em várias posições. A temperatura do lodo aumenta até 100°C no início, e depois diminui para valores mais baixos (entre 100 e 80°C), induzindo um abrandamento da secagem e diminuição da troca de calor. A quantidade de 2,2kg de lodo de esgoto fica completamente seca após cerca de 7 horas. A Figura 3.25 ilustra esquematicamente a secagem condutiva por agitação. Em relação ao secador de tambor, a alimentação de lodo de esgoto é aplicada numa película fina (1mm) para a superfície de um cilindro oco rotativo, aquecido internamente. O tambor rotativo possui termômetros para medir a temperatura, e a temperatura da superfície do tambor onde a camada de lodo é exposta durante a fase de evaporação é relativamente elevada (112 a 137°C). Logo, os tempos

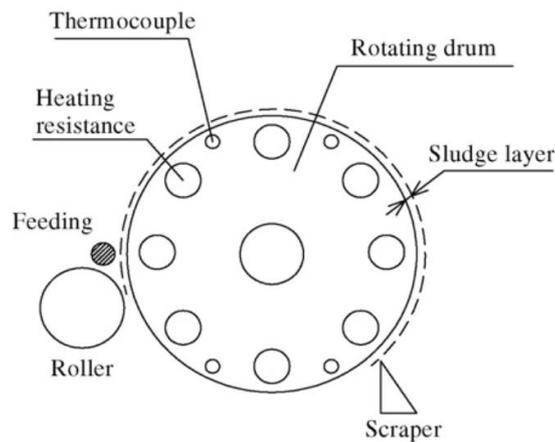
de secagem são consideravelmente curtos (entre 10 e 60s). A Figura 3.26 ilustra esta tecnologia de secagem térmica por aquecimento em tambor.



**Figura 3.25** – Esquema representativo de um secador térmico de aquecimento: secagem condutiva por agitação.

Notas de tradução: *Gas sweeping*: entrada de gás; *System of agitation*: sistema de agitação; *Thermocouples*: termômetros; *Heating resistance*: resistência de aquecimento; *Balance*: balança; *Exhaust*: escape/saída.

*Fonte:* Romdhana et al. (2009).



**Figura 3.26** – Esquema representativo de um secador térmico de aquecimento: secagem em tambor.

Notas de tradução: *Roller*: rolator; *Feeding*: alimentação; *Heating resistance*: resistência de aquecimento; *Thermocouple*: termômetros; *Rotating drum*: tambor rotativo; *Sludge layer*: camada de lodo; *Scraper*: raspador.

*Fonte:* Romdhana et al. (2009).

## Micro-ondas

Comparado com métodos convencionais, a secagem por micro-ondas é considerada eficiente, principalmente no que se refere ao tempo de secagem, que é mais curto. Existem vários estudos realizados usando micro-ondas em alimentos, culturas, madeira, fármacos e plantas medicinais, além de comparação entre métodos convencionais e por micro-ondas. Apesar das vantagens, a secagem por micro-ondas não era comumente aplicada para lodo de

esgoto. Alguns estudos foram realizados para especificar as vantagens da utilização de micro-ondas para secar lodo de esgotos, comparando os resultados com, por exemplo, secagem por convecção de ar. As conclusões foram que o tempo de secagem durante a aplicação com micro-ondas foi, pelo menos, dez vezes menor que na secagem por convecção de ar e, em relação à eficiência energética, a secagem por micro-ondas também foi mais eficiente que a secagem por convecção de ar (BENNAMOUN, 2014).

Bennamoun (2014) estudou a difusão da umidade durante a secagem de lodo de esgoto por micro-ondas e, dentre suas conclusões, apontou que, analisando o perfil de temperatura, foi possível distinguir três fases principais durante a secagem por micro-ondas. A primeira é a fase de adaptação, que é curta, é caracterizada por um rápido aumento da temperatura do lodo, e o efeito das condições de secagem aplicadas nesta fase não é aparente. A segunda fase possui taxa de secagem constante caracterizada por uma temperatura constante, e o efeito das condições de secagem nesta fase é notável, sendo mais intenso se o período de aplicação desta fase for estendido. Durante a terceira fase, a energia serve para evaporação da água do lodo e também para aumentar a sua temperatura. Neste processo as amostras mostraram diminuição de volume na ordem de 40%, quando comparado às condições iniciais. O estudo mostrou que os valores dos coeficientes de difusão foram mais influenciados pelos níveis de potência de micro-ondas, seguidos da espessura inicial e da massa inicial.

Jinping *et al.* (2015) classificam as três fases de secagem de lodo por micro-ondas como fase de aumento, fase de velocidade, e fase de queda de velocidade. Quando o teor de umidade do lodo é superior a 50% durante a secagem por micro-ondas, a taxa de secagem diminui com o aumento da espessura do lodo. Já quando a umidade é inferior a 50%, a taxa de secagem aumenta com o aumento da espessura do lodo. A secagem por micro-ondas pode melhorar muito o deslocamento da água durante o processo.

## **Fritura**

O princípio básico deste método consiste no rápido escape da umidade do lodo através de seus poros para o meio de óleo, conduzida pelo forte gradiente de pressão formado entre os meios de lodo e de óleo. Este gradiente de pressão benéfico para transferência de umidade pode ser consequência da combinação sutil da diferença de propriedades físicas de calor específico e temperatura de ebulição entre água e óleo (SHIN *et al.*, 2011).

Silva, Rudolph e Taranto (2005) aplicaram o processo de fritura de lodo de esgoto por imersão com o objetivo de verificar a secagem do resíduo. Durante a fritura foram obtidas curvas típicas de secagem e se verificou que em relação aos parâmetros temperatura do óleo, tipo de óleo, e forma da amostra; o fator forma da amostra foi o de maior efeito na taxa de secagem, de acordo com as condições estudadas. Dentre as conclusões do estudo, apontaram que a água foi removida rapidamente do lodo, assim como o óleo ficou aderido a ele. A aderência do óleo aumentou o poder calorífico do lodo, tornando o lodo de esgoto frito mais atrativo para geração de energia por incineração.

Shin *et al.* (2011), para determinar as características físicas desta tecnologia de secagem, realizaram uma série de experimentos em que foram variados parâmetros importantes, tais como temperatura de aquecimento do óleo, tempo de secagem, tipo de óleo, e tamanho do lodo. De acordo com os resultados obtidos, o tempo ótimo de secagem para o lodo depende da temperatura de aquecimento. Quando se utilizou óleo de cozinha residual como meio de aquecimento, o decréscimo no teor de umidade do lodo ocorreu rapidamente nos primeiros 10 minutos, e se reduziu para 5% ou menos após 14 minutos, independentemente da temperatura de aquecimento. Verificaram que a perda de umidade do lodo é bastante sensível à temperatura de aquecimento, ou seja, a eficiência da perda ou escape de água do lodo é muito maior a 140°C do que a 120°C, não ocorrendo diferenças significativas em temperaturas acima de 140°C. A utilização de óleo de motor usado no processo demonstrou maior tempo para a secagem do lodo, possivelmente, devido à maior

viscosidade do óleo de motor em relação ao óleo de cozinha residual. Em relação ao tamanho da partícula, verificaram que o aumento do tamanho da partícula desfavorece a perda de umidade.

Por fim, salienta-se que este método demanda estudos complementares para se afirmar sobre a viabilidade de aplicação em escala real.

Com o objetivo de se trazer algumas considerações de maneira resumida e comparativa em relação à etapa de secagem de lodo de esgoto, apresenta-se o Quadro 3.3, elaborado por Bennamoun *et al.* (2013).

**Quadro 3.3** – Vantagens e desvantagens de alguns métodos de secagem de lodo de ETE.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens	Consumo específico de energia (kWh.t <sup>-1</sup> )	Taxa específica de secagem (kg.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )
Secagem convectiva ( <i>Convective drying</i> )	- Projeto permitindo fácil manipulação - Produto seco utilizado na agricultura	- Tempo de secagem relativamente longo - Maus odores - Emissões gasosas	- Secador de correia: 700 a 1140 - Secador de tambor: 900 a 1100 - secador de <i>flash</i> : 1200 a 1400	- Secador de correia: 5 a 30 - Secador de tambor: 3 a 8 - secador de <i>flash</i> : 0,2 a 1
Secagem condutiva ( <i>Conductive drying</i> )	- Nenhuma poluição do meio de transporte de calor - Confinamento de vapor e odor - Baixa concentração de compostos orgânicos voláteis (COV) - Redução dos riscos de incêndio e explosão - Produto seco usado em aplicações industriais	- Tempo de secagem relativamente longo - Fase pegajosa altera performance do secador	- Secador de disco: 855 a 955 - Secador de pás: 800 a 885 - Secador de filme fino: 800 a 900	- Secador de disco: 7 a 12 - Secador de pás: 15 a 20 - Secador de filme fino: 25 a 35
Secagem solar ( <i>Solar drying</i> )	- Uso de energia solar gratuita - Lodo livre de patógenos - Produto seco utilizado na agricultura - Durante a mesma operação, quantidades importantes são secas	- Depende de condições climáticas - Tempo de secagem relativamente longo - Necessidade de grandes áreas	- 30 a 200 (em alguns casos 1000)	
Secagem por fritura ( <i>Frying</i> )	- Curto tempo de secagem - Possibilidade de empregar óleo usado - Lodo seco usado para incineração - Confinamento de odor - Nenhuma emissão gasosa - Redução dos riscos de incêndio e explosão	- Altas temperaturas são necessárias	- 888	
Secagem por super-aquecimento) ( <i>Superheated steam drying</i> )	- Sem poeira - Sem emissão volátil - Lodo livre de patógenos - Curto tempo de secagem - Baixo consumo de energia	- Altas temperaturas são necessárias		

Fonte: Bennamoun *et al.* (2013).

### 3.3.5. Aproveitamento do Resíduo Tratado

Com base no que propõe a Lei 12.305/2010 (institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS) e a partir dos diversos potenciais de uso e aplicação do lodo de esgoto, este subproduto das ETEs deve ser classificado como resíduo, e não rejeito. Assim, como todo

resíduo deve ser passível de aproveitamento, conclui-se o raciocínio de se classificar o lodo de ETE como resíduo. Ainda com base na PNRS e com mesmo direcionamento em diretivas europeias, afirma-se que, segundo estes instrumentos, os aterros sanitários não podem receber resíduos como material de disposição final, mas apenas rejeitos.

Infelizmente, a prática de disposição final de resíduos em aterros sanitários brasileiros ainda se trata de algo corriqueiro, inviabilizando ou aterrando oportunidades diversas de aplicação ou aproveitamento de materiais diversos, além de diminuir a vida útil dos aterros e, conseqüentemente, trazer mais impactos negativos ao meio ambiente.

Neste sentido, e buscando discutir algumas possibilidades de aproveitamento de lodo de esgoto previamente tratado, serão abordadas principalmente aplicações deste resíduo na construção civil e na geração de energia.

#### ***3.3.5.1. Construção Civil***

O lodo de esgoto tratado tem sido estudado e aplicado em vários materiais e agregados relacionados à construção civil ou indústria da construção. Existem aplicações para lodo de esgoto seco e para cinzas de lodo de esgoto. Cinzas de lodo de esgoto são os subprodutos produzidos durante a combustão de lodo desaguado ou seco em um incinerador. As principais aplicações para lodo de esgoto seco são aplicação na indústria cerâmica, em concreto para fins não estruturais (ex. calçadas para pedestres) e em agregado de concreto leve.

Durante Ingunza *et al.* (2006), realizaram estudos relacionados à aplicação de lodo de ETE na indústria cerâmica. O lodo utilizado era proveniente de tratamento por valo de oxidação, seguido de aeração e tanques sépticos. O estudo teve como finalidade caracterizar dois tipos de lodo (ETE – UFRN – lodo aeróbio; e tanques-sépticos – lodo anaeróbio) visando sua incorporação na fabricação de blocos cerâmicos. Uma conclusão importante refere-se ao teor de umidade (fator limitante para incorporação de lodo em maiores proporções). Segundo eles, os aspectos microbiológicos não implicam em riscos para tal aplicação devido às altas

temperaturas dos fornos. Nas análises realizadas o lodo apresentou índice de plasticidade e limite de liquidez iguais a zero.

Suchorab *et al.* (2016) estudaram as propriedades mecânicas e físicas de agregado de concreto leve hidrofobizado<sup>1</sup> com lodo de esgoto. O estudo apresentou exames laboratoriais de parâmetros físicos do material. As análises das propriedades de umidade e calor dos materiais examinados confirmaram a possibilidade de utilizar agregados leves suplementados com lodo de esgoto em produção futura. Em suas conclusões apontam que o lodo de esgoto pode ser aplicado como um aditivo para a produção de agregados leves, sendo passível de sucesso na produção de concretos leves. Destacam que os lodos de esgoto melhoram os parâmetros térmicos dos agregados de concreto leves, o que pode aumentar o desempenho energético dos edifícios construídos com este material modificado. A aplicação de lodo de esgoto diminui a resistência à compressão, o que não é favorável para as paredes de carga dos edifícios. Mencionam também que o agregado de concreto leve suplementado com lodo de esgoto pode ser aplicado com sucesso para a produção de elementos de enchimento de estruturas de madeira ou na forma de blocos para paredes de cortinas de edifício.

Em relação às cinzas de lodo de esgoto, de acordo com Smol *et al.* (2015), as aplicações mais importantes na indústria da construção são:

- componente da mistura de matérias-primas para produção de cimento;
- aditivo ativo para aglutinantes inorgânicos do cimento (concreto e argamassa);
- componente de matéria-prima na fabricação de cerâmica de construção (tijolos, azulejos e telhas cerâmicas);
- componente da síntese de materiais leves;
- substituto da areia e/ou cimento em bases de cimento estabilizadas, sub-bases e aterros em construções rodoviárias.

---

<sup>1</sup> *Hidrofobizado*: que é hidrófobo. Que tem repulsa à água e quaisquer líquidos.

Abordagens específicas sobre cada um destes principais potenciais usos de cinzas de lodo de esgoto são relatadas por Smol *et al.* (2015), com enfoque para a economia circular.

Baeza-Brotons *et al.* (2014) estudaram sistemas de cimento Portland com adição de cinza de lodo de esgoto. Os estudos se deram com aplicações em concretos para a produção de blocos. Ao final, destacaram que a produção de blocos com tempo de cura de 28 dias apresentou densidade e resistência similar à amostra sem aplicação de cinza de lodo de esgoto, além de apresentar redução significativa na absorção de água. Ressaltam também que o comportamento da amostra com substituição de 10% de areia por cinza de lodo de esgoto apresentou o melhor comportamento em termos de densidade, absorção e capilaridade.

Lynn, Dhir e Ghataora (2016) estudaram as características e o potencial de uso de cinzas de lodo de esgoto em tijolos, azulejos e vidros cerâmicos, e concluíram que é viável a utilização deste resíduo, com potencial para aplicação em maior escala.

### **3.3.5.2. Energia**

Segundo Domínguez *et al.* (2006), lodo de esgoto e outros resíduos sólidos orgânicos classificados como biomassa ou biossólidos são exemplos de recursos energéticos renováveis. Eles podem ser utilizados de muitas formas para produzir energia: combustão direta, gaseificação e pirólise. Entre estes três processos termoquímicos, a pirólise tem atraído muita atenção, uma vez que as condições deste processo podem ser otimizadas para maximizar a produção de carvão/cinzas, óleos ou gases, dependendo de interesses específicos.

A partir deste apontamento de Domínguez *et al.* (2006), os principais métodos descritos para aproveitamento energético do lodo serão a combustão/incineração, a gaseificação e a pirólise.

Ressalta-se que serão consideradas neste tópico referente a aproveitamento energético de lodo de ETE alternativas de geração de energia apenas para resíduos previamente desaguados ou secos. Portanto, aproveitamentos de biogás originário de processos de

tratamento de lodo de esgoto (ex. digestão anaeróbia) não serão considerados, uma vez que esta pesquisa tem foco em explorar o potencial de aproveitamento do lodo desaguado e seco, e não a produção de biogás passível de ser utilizado para geração de energia elétrica.

### **Incineração/combustão**

Antes de relatar algumas informações específicas sobre este método, considera-se importante trazer algumas explicações a respeito de poder calorífico e sua relação com a estimativa de produção de energia. O poder calorífico de um material pode ser definido como a quantidade de calor liberado durante a combustão de uma quantidade específica deste material. Esta variável é medida em unidade de energia por unidade do material, geralmente massa, tais como: kcal/kg, kJ/kg, J/mol, Btu/m<sup>3</sup>. No Sistema Internacional (SI), o poder calorífico é expresso em kJ/kg. O poder calorífico é comumente determinado com o uso de bomba calorimétrica.

O poder calorífico se divide em superior e inferior. O Poder Calorífico Superior (PCS) refere-se à quantidade de calor liberadas por um material em sua combustão completa, e quanto maior for este parâmetro, maior será a energia contida no combustível. Nele a combustão se efetua a volume constante, a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado. Já o Poder Calorífico Inferior (PCI) pode ser obtido a partir do valor do PCS. O PCI é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (QUIRINO *et al.* 2005).

A incineração ou combustão consiste em um método térmico, e tem esta classificação devido à incineração de resíduos em situação e temperaturas controladas, em torno de 800 e 1000°C. Para a incineração completa de compostos perigosos, como a dioxina e o furano, a temperatura precisa alcançar 1200°C. Para lodo de esgoto, o método mais utilizado é o método termoquímico. As razões para isso incluem redução do volume do lodo, eliminação

de microrganismos patogênicos, desodorização e conversão de compostos orgânicos tóxicos em CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e calor. O calor que é gerado pode ser usado para secagem e outras finalidades (aquecer estufa de cultivo de flores, aquecimento de escritórios, etc.). Além disso, poluentes tóxicos como a dioxina, furano, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, HCl, etc. podem ser liberados como resultado da incineração de lodo. Devido ao fato de lodo de ETE ter alto teor em azoto (N) e enxofre (S), as emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> devem ser cuidadosamente examinadas. Neste sentido, tecnologias de controle de emissões devem ser utilizadas para reduzir as emissões de gases tóxicos a valores inferiores aos limites das normas de qualidade do ar, o que demanda tratamento destes gases antes de serem liberados. Geralmente, é difícil incinerar apenas lodo de esgoto, principalmente devido ao alto teor de cinzas e umidade. Por esta razão, cavacos ou pedaços de madeira podem ser misturados ao lodo em proporções adequadas e, assim, serem co-incinerados. Além disso, os lodos e as cinzas de lodo (resultado da incineração) também podem ser utilizados para a produção de cimento Portland em fornos de cimento (1450°C). Inclusive, o calor que é obtido a partir de fornos de cimento pode ser usado para pré-secagem do lodo (ADAR *et al.*, 2016).

Mulchandani e Westerhoff (2016) acrescentam que no processo de queima, os metais se concentram e se estabilizam dentro da cinza de lodo. Dependendo da temperatura e do tempo de reação, a fixação do metal à cinza de lodo pode variar entre 50% e 97%. Aproximadamente 18% da entrada de calor total é recuperada para lodo com 20% de sólidos. Esta energia pode ser reciclada para o sistema e usada para secar lodo antes da incineração ou para produzir eletricidade. Afirmam também que a co-incineração de biomassa com carvão ou resíduos sólidos é uma técnica de custo-benefício para produzir energia a partir de múltiplas fontes, mas o processo dilui a densidade e o valor dos metais no lodo, que potencialmente poderiam ser extraídos.

Shao *et al.* (2010) estudaram o processo de biossecagem e triagem de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) com alta umidade para melhorar o aproveitamento energético por

meio de incineração. Dentre suas considerações apontaram que embora os PCIs das frações de resíduos menores que 45mm aumentaram cerca de duas vezes após a biossecagem, eles ainda estavam abaixo dos padrões de qualidade para combustível derivado de resíduo, e foi observado um potencial de poluição por metais pesados muito elevado. Ao final, sugeriram que diferentes estratégias de incineração poderiam ser adotadas para diferentes frações de partícula de RSU, com atenção às propriedades de combustão e poluição. Shao *et al.* (2010) ainda recomenda atenção aos seguintes potenciais de emissão de metais pesados, quando se objetiva incinerar resíduos orgânicos biossecos: Cr (cromo), Pb (chumbo), Cu (cobre), Mn (manganês), Zn (zinco), Hg (mercúrio), HCl (ácido clorídrico), e SO<sub>x</sub> (óxidos de enxofre).

Pecora *et al.* (2012) desenvolveram trabalho cujo objetivo foi comparar o desempenho ambiental de três alternativas para tratamento e disposição de RSU: aterro sanitário, incineração e Tratamento Mecânico-Biológico (TMB). Além das alternativas de tratamento e disposição comparadas foram analisados dois cenários com diferentes composições dos resíduos: (a) sendo 100% RSU e (b) sendo 90% RSU e 10% lodo proveniente do tratamento anaeróbico de uma Estação de Tratamento de Efluente (ETE). Os resultados demonstraram que quando se considerou o cenário (b), a geração de energia diminuiu nas três alternativas. A incineração é a alternativa que exige maior consumo de energia, sendo o TMB considerado como a alternativa com a maior geração de energia excedente para a rede. Apesar do TMB acarretar menores emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a incineração foi considerada a melhor alternativa, principalmente em relação à acidificação, eutrofização e formação de ozônio fotoquímico. Os resultados foram preliminares e é necessário o refinamento dos dados e a consideração também das categorias tóxicas de impacto: toxicidade humana e ecotoxicidade.

Um novo sistema combinando secagem de lodo e co-combustão com carvão foi aplicado na eliminação de lodo, e suas características de emissão atmosféricas foram testados por Lu *et al.* (2013). As emissões de NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e alguns outros poluentes liberados na

secagem térmica e poluentes como os NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> etc. eliminados pelo incinerador foram todos testados. Os resultados indicaram que as concentrações de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> no gás de combustão a partir do incinerador foram de 145 e 16mg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Por fim, concluíram que todos os valores monitorados foram muito inferiores às normas de emissão na China, e não se notou qualquer odor impactante no secador de ar em torno do lodo, o que demonstrou que este sistema de secagem com co-combustão é eficiente no controle de poluentes e é uma opção viável para o tratamento em grande escala de lodos industriais e lodos de esgoto.

Fytili e Zabaniotou (2008) apontam que as vantagens da incineração podem ser resumidas da seguinte forma:

- grande redução do volume do lodo (os pesquisadores concluíram que o volume final de lodo após incineração é de aproximadamente 10% do volume após o desaguamento mecânico);
- destruição térmica de compostos orgânicos tóxicos;
- significativo poder calorífico do lodo de esgoto (quase igual ao do carvão, logo, a incineração oferece a possibilidade de aproveitar este conteúdo energético); e
- minimização da geração de odor.

No entanto, a incineração não constitui um método completo de eliminação, uma vez que cerca de 30% dos sólidos permanecem na forma de cinza após o processo. Esta cinza é geralmente aterrada e, em certos casos, deve ser considerada como altamente tóxica, dado seu conteúdo e concentração. Embora exista a preocupação com possíveis emissões nocivas, a introdução de novas tecnologias para o controle das emissões gasosas pode minimizar os efeitos adversos mencionados, enquanto a redução do custo correspondente confere à incineração vantagens consideráveis no futuro em comparação com outras vias de eliminação disponíveis. A quantidade de lodo incinerado na Dinamarca já atingiu 24% do total de lodo produzido, 20% na França, 15% na Bélgica, 14% na Alemanha, enquanto nos EUA e no

Japão o percentual aumentou para 25% e 55%, respectivamente (FYTILI E ZABANIOTOU, 2008).

No que se refere à tipologia de processamento térmico de lodo de esgoto, a mono e a co-combustão de lodo de esgoto são talvez as mais estabelecidas no mercado, sendo a mono-combustão ainda mais predominante. Forno de múltiplas lareiras e forno de leito fluidizado são os mais populares, e o último tem sido amplamente aplicado. A diferença entre os dois tipos de fornos é que os fornos de múltiplas lareiras normalmente queimam lodo mecanicamente desaguados (úmidos), enquanto que os fornos de leito fluidizado podem queimar lodos úmidos e semi-secos, com teor de matéria seca entre 41 e 65%. Em relação à saúde pública, as fontes de emissão de poluentes mais importantes na aplicação deste método são: libertação de metais pesados; manuseio de resíduos sólidos (ex. leito e filtro de cinzas); e emissões de dioxinas, furanos,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  e  $\text{C}_x\text{H}_y$ . Os problemas potenciais de eliminação de cinzas e lixiviação de metais pesados podem ser manipulados ou restringidos com o aumento da temperatura durante a combustão ou mesmo com a gaseificação. No que diz respeito às emissões de mercúrio, dioxinas e furanos, estas são controláveis. Atualmente, muitos incineradores de lodo de esgoto em escala real atendem aos rigorosos limites de emissão, utilizando tecnologias avançadas para tanto. Apesar do notável teor de nitrogênio (N) no lodo de esgoto, a taxa de conversão de N para  $\text{NO}_x$  durante o processo é inferior a 5%, e as emissões líquidas totais de  $\text{NO}_x$  alcançam níveis muito baixos. Neste sentido, afirma-se que é injustificada a preocupação pública crescente com o potencial de efeitos adversos da combustão de lodo de esgoto (FYTILI E ZABANIOTOU, 2008).

Gyllenhammer (1998) e Vayda *et al.* (1993) comentaram que para alguns tipos de lodos a combustão não consegue se autossustentar e é necessário um combustível adicional como suporte, como carvão ou madeira. Götsching *et al.* (1996) acrescenta que geralmente um material combustível seco, com teor de sólidos totais de 45 a 60% é requerido para combustão autógena de lodo. Experiências de queima de lodo de papel e celulose foram

analisadas por Gyllenhammer (1998) que recomenda um valor mínimo de 57% de teor de sólidos totais (ou valor máximo de umidade do lodo em torno de 43%). Zhao *et al.* (1999), trabalhando com o mesmo tipo de lodo também recomenda valores acima de 57% de sólidos totais (ou umidade do lodo abaixo de 43%). Kudra *et al.* (2002) recomenda que o mesmo tipo de lodo, para que seja incinerado produzindo ganho de energia em processo de combustão, deve conter pelo menos 45% de sólidos totais.

### **Gaseificação**

A gaseificação é um processo realizado a altas temperaturas (4800°C) e sob pressão atmosférica para converter a biomassa em gases incineráveis na presença parcial de O<sub>2</sub>. Os gases gerados como resultado da gaseificação incluem gases não condensáveis, como H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, e hidrocarbonetos leves, como CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> e C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>. O poder calorífico do gás gerado como resultado da gaseificação é de cerca de 4MJ/m<sup>3</sup>. Esta energia gerada pode ser utilizada na produção de gás natural ou hidrogênio, produção de calor para secagem de lodo ou produção de matérias-primas (como a produção de metano) para síntese química, dependendo do conteúdo. Neste método, o teor de água do lodo deve ser reduzido para 10%. A gaseificação é um processo que reduz os problemas ambientais relacionados aos lodos de esgoto e não requer combustível adicional em condições estáveis (ADAR *et al.*, 2016).

Fytili e Zabaniotou (2008) trazem informações complementares relacionadas a este método, mencionadas ao longo deste parágrafo. Destacam que nem todos os biocombustíveis permitem a gaseificação; que propriedades do combustível, como superfície, tamanho, forma, teor de umidade, matéria volátil e teor de carbono influenciam a gaseificação; e que o teor de energia do gás produzido através deste processo depende de vários fatores, como o combustível de alimentação, o tipo de reator, etc. A principal atratividade do uso de turbinas a gás para converter a energia de biocombustível em eletricidade é a eficiência potencialmente elevada do ciclo. A escolha entre motores a gás e turbinas a gás é principalmente uma questão

de tamanho (as turbinas são mais apropriadas para as usinas de maior porte, e os motores para as de pequeno porte). Alvo idealizado para aplicação da gaseificação de lodo de esgoto é a produção de gás combustível limpo com alta eficiência. Comparada com a incineração, a gaseificação, devido ao fato de ser um processo líquido quimicamente redutor, pode prevenir a ocorrência de problemas, incluindo a necessidade de combustível suplementar, emissões de óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, metais pesados e cinzas, e a potencial produção de dibenzodioxinas e dibenzofuranos clorados. A gaseificação consiste em uma série de sub-processos químicos e térmicos sequenciais complexos. O processo total é energeticamente autossustentável e, geralmente, em condições estáveis, nenhuma entrada de energia é necessária. Durante o processo de gaseificação, o lodo de esgoto sofre complexa alteração física e química, começando pela secagem ou remoção de umidade. O lodo seco é, então, pirólise ou termicamente decomposto. No passo final, os produtos da pirólise, os vapores condensáveis e não condensáveis e cinzas são submetidos à gaseificação, momento em que são simultaneamente oxidados e depois reduzidos a gases permanentes na zona de redução. Na zona de secagem, o lodo de esgoto desce para o gaseificador e a umidade é evaporada usando o calor gerado nas zonas anteriores. A taxa de secagem depende da área de superfície do combustível, da velocidade de recirculação, da umidade relativa destes gases e das diferenças de temperatura entre a alimentação e os gases quentes, bem como da difusividade interna da umidade dentro do combustível. O lodo com menos de 15% de umidade, de maneira característica, perde toda umidade nesta zona.

### **Pirólise**

A pirólise é um processo termoquímico em que as matérias orgânicas são convertidas em cinza, bio-óleo e produtos gasosos em temperaturas entre 300 e 900°C, sob pressão atmosférica. O bio-óleo é o alvo principal da pirólise e é composto por compostos complexos, tais como diversos hidrocarbonetos alifáticos, hidrocarbonetos aromáticos, ácidos orgânicos

de cadeia longa de carbono e álcoois, etc. Os hidrocarbonetos líquidos podem ser utilizados como matéria-prima em diversas indústrias, como a petroquímica. Quanto aos produtos gasosos, eles são compostos de gases incineráveis como CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e compostos orgânicos ligeiramente voláteis, além de CO<sub>2</sub>. A distribuição e composição do produto da pirólise depende das características do lodo de esgoto (matéria volátil e teor de cinzas). O poder calorífico do bio-óleo é geralmente superior a 30MJ/kg. Após o tratamento do bio-óleo, este pode ser usado como combustível, inclusive em veículos. A cinza produzida durante a pirólise pode ser depositada em aterros sanitários, ser utilizada como carvão ativado, incinerada ou ser utilizada como fertilizante devido ao seu teor em fósforo. Para realizar este processo, o teor de sólidos totais do lodo de esgoto precisa ser aumentado até aproximadamente 95%, o que pode ser um fator limitante para aplicação da técnica. A pirólise assegura a redução do volume de lodo, esteriliza o produto final e não necessita de sistemas adicionais para prevenir a poluição atmosférica, uma vez que gera menos poluentes em comparação com a incineração (ADAR *et al.*, 2016).

De acordo com Pedroza *et al.* (2010), a pirólise pode ser definida como a degradação térmica de qualquer material orgânico na ausência parcial ou total de agente oxidante, ou até mesmo, em ambiente com concentração de oxigênio capaz de evitar a gaseificação intensiva do material orgânico.

Na pirólise, as reações que ocorrem são reações de fracionamento/rachadura térmica e de condensação. Comparada ao processo de combustão, que é altamente exotérmico, a pirólise é bastante endotérmica, da ordem de 100kJ.kg<sup>-1</sup>, e sua reação é basicamente representada como se segue (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008):



As frações principais que se formam após a degradação térmica do lodo em uma atmosfera inerte ou no vácuo são as seguintes (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008):

- fração gasosa (este gás não condensável contém principalmente hidrogênio,

metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e vários outros gases em concentrações menores).

- fração líquida (esta corrente é constituída por um alcatrão e/ou óleo, que contém substâncias como ácido acético, acetona e metanol).
- fração sólida (que consiste principalmente de cinza, que é na maioria das vezes puro carbono com pequenas quantidades de materiais inertes).

Com o objetivo de se comparar algumas características referentes a estes três métodos de aproveitamento energético do lodo de esgoto, apresenta-se o Quadro 3.4, elaborado por Adar *et al.* (2016), que representa uma análise SWOT, incluindo estes métodos.

De maneira complementar e curiosa, é válido comentar o caso da ETE do município de São José do Rio Preto-SP, gerenciada pelo Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (SEMAE), a qual possui um projeto implantado de sistema de cogeração de energia elétrica com resíduos da digestão anaeróbia. Em seus parâmetros de projeto, a energia é gerada por meio da queima do lodo e o seu poder calorífico complementa o processo de secagem final do resíduo, que, segundo projetistas da ETE, para geração de energia elétrica no sistema da ETE deve possuir no máximo 10% de umidade. Além disso, o sistema conta também com três estufas de secagem natural, para serem usadas complementarmente. Segundo os responsáveis, as tecnologias aplicáveis para sistemas de cogeração em ETEs são basicamente três: pequenas turbinas a vapor, pequenas turbinas a gás, e motores de combustão interna (VILLANI JR., *et al.* 2011).

**Quadro 3.4** – Análise SWOT dos métodos de aproveitamento energético do lodo de esgoto.

<b>Método</b>	<b>Critério</b>	<b>Forças</b>	<b>Fraquezas</b>	<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
<b>Incineração</b>	<b>Solução do problema (a)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- redução do volume de lodo até 90%</li> <li>- eliminação praticamente completa de matéria orgânica</li> <li>- Beneficiamento de cinzas geradas</li> <li>- possibilidade de recuperação de energia</li> <li>- destrói micro-organismos patogênicos e compostos tóxicos</li> <li>- geração de odor minimizada</li> <li>- redução da necessidade de áreas de aterro em uma taxa de até 90-95%</li> <li>- tem eficiência energética razoável e é capaz de gerar 0,85MWh/ano.ton de resíduos</li> <li>- ajuda a reduzir o consumo de combustíveis fósseis</li> <li>- menor custo em comparação com outras tecnologias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- necessidade de combustível adicional</li> <li>- problemas de poluição do ar (emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, dioxinas e furanos)</li> <li>- baixa eficiência energética</li> <li>- necessita grandes volumes</li> <li>- demanda maior quantidade de resíduos e tratamento adicional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- incineração com outros combustíveis convencionais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- concorrência com outras tecnologias térmicas</li> <li>- dificuldades para convencer investidores</li> </ul>
	<b>Emissão de gás de efeito estufa (b)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- existe um sistema de controle de emissão</li> <li>- não há emissão de metano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- emite de CO<sub>2</sub></li> <li>- geração de compostos clorados</li> <li>- preocupação ambiental devido às emissões perigosas</li> <li>- controle de emissão caro devido ao aumento da demanda por tratamento de gás e rigorosos controles ambientais</li> </ul>	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- preocupação ambiental devido a emissões elevadas e perigosas</li> <li>- aumento das alterações climáticas</li> </ul>
	<b>Desenvolvimento tecnológico (c)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tecnologia consolidada</li> <li>- existe infraestrutura para fornos de energia</li> <li>- disponível para uso em sistemas de combustão atuais</li> <li>- a qualidade da matéria-prima não é importante e vários tipos de resíduos podem ser usados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- necessidade de tecnologia auxiliar</li> <li>- necessidade de aplicações em larga escala para garantir viabilidade econômica</li> <li>- baixo consumo de energia</li> <li>- problemas de disposição das cinzas devido ao teor de metais pesados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- desenvolvimento de sistemas de controle que auxiliem na redução da emissão de elementos não desejados</li> <li>- maior segurança com o avanço tecnológico</li> <li>- alivia a preocupação das pessoas com o futuro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ambiente econômico instável</li> <li>- preço dos combustíveis adicionais</li> </ul>
	<b>Aspectos legais (d)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- atualizado e aceitável</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- a incineração de resíduos demanda controle jurídico rigoroso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- maior consciência ambiental</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- maiores controles legislativos</li> </ul>

<b>Método</b>	<b>Critério</b>	<b>Forças</b>	<b>Fraquezas</b>	<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
<b>Gaseificação</b>	<b>Solução do problema (a)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tecnologia integrada</li> <li>- diminuição das emissões ambientais (sem produção de dioxinas e furanos)</li> <li>- recuperação de energia com alta eficiência</li> <li>- capacidade de usar a maioria dos compostos inorgânicos do lodo</li> <li>- produção de resíduos sólidos inertes</li> <li>- produção de gases incineráveis</li> <li>- menor demanda de energia de entrada</li> <li>- o produto que é gerado é usado como matéria-prima para a produção de gás natural e hidrogênio e síntese química</li> <li>- trouxe avanços como tecnologia verde em estações de tratamento térmico</li> <li>- reduz a necessidade de aterro em até 90-95%</li> <li>- os resíduos que são mais adequados para recuperação são gerados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- problemas de disposição/eliminação de cinzas (metais pesados)</li> <li>- é necessário desaguar/secar o lodo</li> <li>- experiência inadequada</li> <li>- não ocorre conversão completa</li> <li>- dificuldade no uso de tipos variáveis de resíduos devido à necessidade de matérias-primas homogêneas</li> <li>- a composição do resíduo e as condições de funcionamento resultam na produção de produtos não desejáveis, como o alcatrão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- maior independência energética</li> <li>- aumento do número de investidores</li> <li>- diminuição do uso de combustíveis fósseis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geralmente é considerada como incineração</li> <li>- dificuldades na obtenção de financiamento</li> <li>- concorrência com outros processos térmicos</li> </ul>
	<b>Emissão de gás de efeito estufa (b)</b>	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- liberação intensa de poluentes orgânicos</li> <li>- emissões de CO e CO<sub>2</sub></li> </ul>	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumento das alterações climáticas</li> </ul>
	<b>Desenvolvimento tecnológico (c)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tecnologia consolidada</li> <li>- alta eficiência energética e balanço de carbono</li> <li>- capacidade de alimentação em conjunto com biomassa distinta</li> <li>- produtos comercializáveis (produção de gás de síntese e matéria-prima)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- é geralmente considerada como incineração</li> <li>- muito poucas aplicações comerciais</li> <li>- caro tratamento de gás para aplicações de gás de síntese</li> <li>- custos de investimento e operação elevados</li> <li>- gás resultante contém alcatrão, carvão/cinza e hidrocarbonetos, então o sistema deve ser resistente a estes poluentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumento da taxa de geração de eletricidade como resultado do desenvolvimento</li> <li>- cooperação tecnológica para tecnologias em P&amp;D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ambiente econômico instável</li> <li>- preço dos combustíveis fósseis</li> <li>- preocupações sobre a viabilidade ambiental da implantação</li> <li>- baixo nível de interesse devido aos desafios públicos e de marketing</li> </ul>
	<b>Aspectos legais (d)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- existe regulamento, mas não é suficiente</li> <li>- padrões ambientais e deficiências nas tecnologias disponíveis</li> </ul>	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maior consciência ambiental</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- padrões ambientais e deficiências nas tecnologias disponíveis</li> </ul>

<b>Método</b>	<b>Critério</b>	<b>Forças</b>	<b>Fraquezas</b>	<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
<b>Pirólise</b>	<b>Solução do problema (a)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- é um processo sem combustão</li> <li>- produção de misturas de gás, combustível líquido e resíduos sólidos inertes</li> <li>- redução de volume e rendimento de alta eficiência, geração de carvão de carbono esterilizado e energia autossuficiente</li> <li>- conversão de resíduos em matérias-primas valiosas (bio-óleo)</li> <li>- a composição e a eficiência dos produtos da pirólise podem ser alteradas por parâmetros operacionais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- é necessário desaguar ou secar o lodo</li> <li>- dificuldades na aceitação de tipos variados de resíduos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- maior independência energética</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- competição com outras tecnologias</li> </ul>
	<b>Emissão de gás de efeito estufa (b)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- diminuição das emissões de gases de efeito estufa</li> <li>- tecnologia alternativa com impacto mínimo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- emissões de CO e CO<sub>2</sub></li> </ul>	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumento nas alterações climáticas</li> </ul>
	<b>Desenvolvimento tecnológico (c)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- produtos potencialmente comercializáveis</li> <li>- as estações de pirólise típicas são muito menores que as de incineração</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- muito poucas aplicações comerciais</li> <li>- pouca experiência</li> <li>- é geralmente considerada como incineração</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumento das oportunidades de negócio e investimento</li> <li>- cooperação para tecnologias renováveis em P&amp;D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ambiente econômico instável e desafios financeiros</li> <li>- deficiência nas tecnologias atuais</li> <li>- é geralmente considerada como incineração</li> <li>- preocupações sobre a viabilidade comercial da instalação</li> </ul>
	<b>Aspectos legais (d)</b>	x		<ul style="list-style-type: none"> <li>- deficiência na padronização de produtos</li> <li>- existe regulamento, mas não é suficiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- maior consciência ambiental</li> </ul>

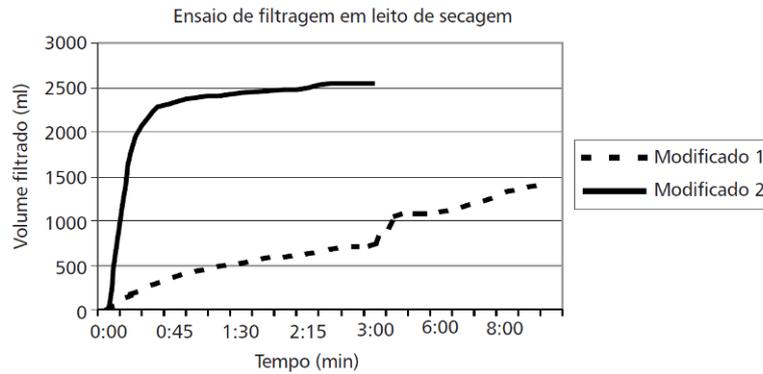
Fonte: Adaptado de Adar *et al.* (2016).

Por fim, segundo *Parliamentary Office of Science and Technology* (2007) de Londres, existem algumas tecnologias futuras para produção de energia por meio do uso de subprodutos do tratamento de esgotos, as quais são: conversão de lodo em óleo e gás (*conversion of sludge to oil and gas*), culturas de biomassa (*biomass crops*), hidrogênio de esgoto (*hydrogen from sewage*), e células de combustível microbianas (*microbial fuel cells*). Contudo, trabalhos e estudos adicionais são necessários para melhorar o desempenho, a confiabilidade e o custo-benefício.

Além destes aproveitamentos de para o lodo de esgoto, existem muitos outros estudos e relatos passíveis de serem consultados na bibliografia, como experiências de aplicação na agricultura (RANGEL *et al.*, 2004), em reflorestamento (HALL, 2000 citado por BAUERFELD, 2008), entre outros.

### **3.4. LEITO DE DRENAGEM**

Conforme mencionado anteriormente, o Leito de Drenagem (LD) se trata de uma tecnologia de desaguamento concebida para lodo de ETA. Ao longo do processo de desenvolvimento, baseou-se nos leitos de secagem tradicionais, possuindo ao final a configuração de apenas duas camadas drenantes: camada de brita (aproximadamente 5cm) e, sobre ela, manta geotêxtil (esta com contato direto com o lodo despejado). Pode-se afirmar que esta tecnologia possui duas fases (drenagem e evaporação), ocorrendo simultaneamente nas primeiras horas após o despejo e dependendo da evaporação após remoção da água livre. O principal diferencial do LD em relação ao leito de secagem tradicional consiste na significativa diminuição do tempo de drenagem de água livre presente no lodo, ou seja, alta drenabilidade inicial, conforme ilustrado na Figura 3.27.



**Figura 3.27** – Curvas de remoção de água de sistema modificado por Cordeiro (1993) e remodelado em 2000.  
Notas de informação: Modificado 1: leito de secagem tradicional; Modificado 2: leito de drenagem.  
*Fonte:* Cordeiro (2001).

O LD foi utilizado em várias pesquisas com aplicações de lodo de ETA, por exemplo, Cordeiro (2001); Achon e Cordeiro (2003); Fontana (2004); Barroso (2007); Achon, Barroso e Cordeiro (2008); Reis (2011); Silveira (2012); Kuroda *et al.* (2013), Barroso *et al.* (2014), Cordeiro *et al.* (2014), entre outras. Para lodo de ETE, poucas foram as investigações realizadas, podendo-se citar Fontana *et al.* (2007), Mortara (2011), Achon *et al.* (2016), Coimbra *et al.* (2016), e Coimbra e Achon (2016).

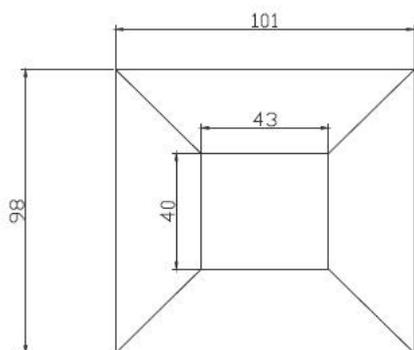
A grande maioria dos estudos foram conduzidos em protótipos de LD, com algumas variações nas dimensões, mas que se basearam nos protótipos ilustrados nas Figuras 3.28, 3.29, 3.30 e 3.31.



**Figura 3.28** – Protótipo leito de drenagem – Vista frontal.  
*Fonte:* Cordeiro/PROSAB (1999).

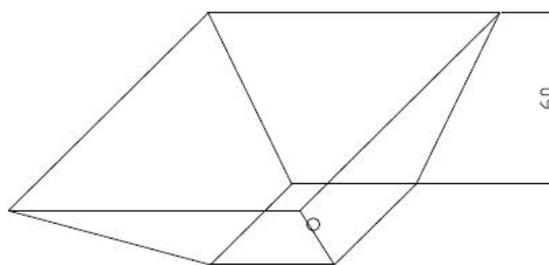


**Figura 3.29** – Protótipo leito de drenagem.  
*Fonte:* Cordeiro/PROSAB (1999).



**Figura 3.30** – Planta baixa do protótipo leito de drenagem.

Fonte: Cordeiro/PROSAB (1999).



**Figura 3.31** – Vista perspectiva do protótipo leito de drenagem.

Fonte: Cordeiro/PROSAB (1999).

Atualmente, a tecnologia de LD desenvolvida por Cordeiro (2001) já se encontra consolidada e com várias aplicações em escala real para desaguamento de lodo de ETA, como resumidamente identificado em alguns exemplos na Tabela 3.8.

**Tabela 3.8** – Dados de alguns exemplos de implantações em escala real de leito de drenagem em ETAs.

ETA	Capacidade de Tratamento (L/s)	Estimativa de Produção de lodo (kg/dia)	Nº de unidades do LD	Área total das unidades de LD (m <sup>2</sup> )	Características dos LDs
Cardoso – SP (Sabesp)	25	115,3	2	60	Coberto
Guanhães – MG (SAAE)	60	134,8	4	120	Sem cobertura
Guaíra – SP (DEAGUA)	130	299,22	4	1040	Sem cobertura

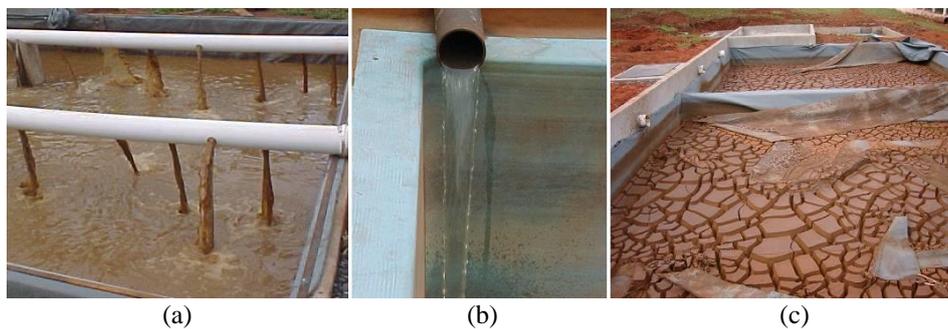
LD: Leito de Drenagem

Fonte: Fontana (2004), Coelho (2011) e Borba (2011) citados por Reis (2011).

Alguns apontamentos principais sobre estas implantações em escala real levantados por Fontana (2004), Coelho (2011) e Borba (2011) citados por Reis (2011) são referentes (i) às precipitações, que quando ocorrem principalmente nos primeiros dias após o despejo interferem na secagem; (ii) ao desempenho dos LDs, reduzindo cerca de 98% do volume de resíduos; (iii) à qualidade do drenado quanto à turbidez, cor e pH, possibilitando a reciclagem desta água para o início do sistema (realizada em Cardoso e Guaíra); e (iv) ao tempo de detenção do resíduo no leito, que por depender de variáveis climáticas (temperatura, radiação, velocidade dos ventos, etc.) pode ser mais ou menos estendido, com possibilidade de ser ainda mais longo, quando se utiliza taxas de aplicação de sólidos elevadas devido à maior

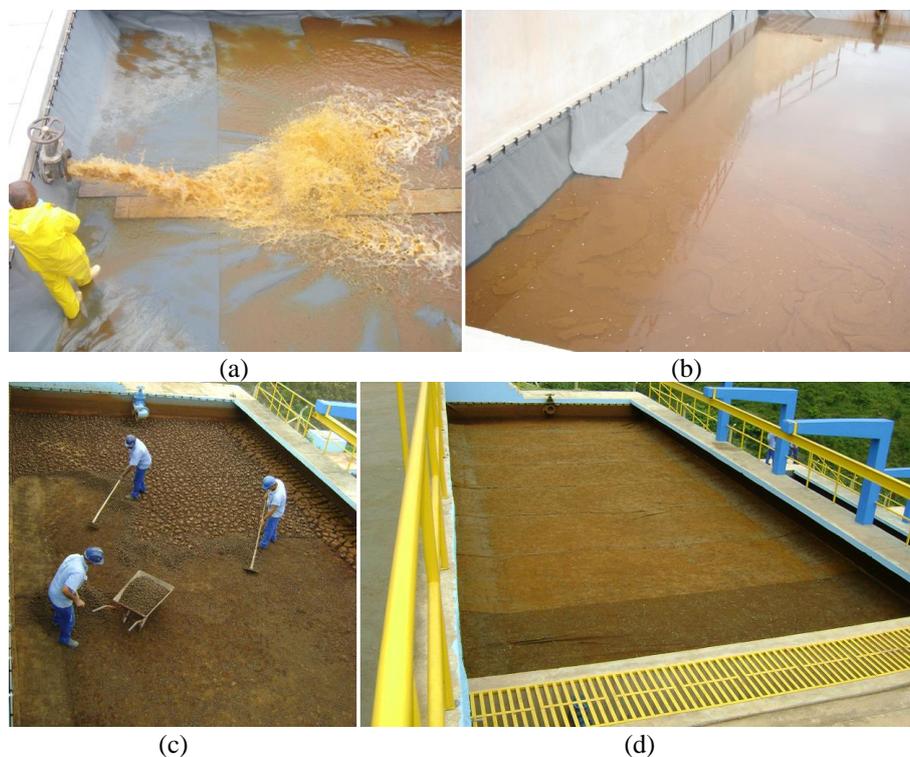
quantidade de lodo existente (ex. em épocas de chuva). A manta geotêxtil utilizada nestas aplicações em escala real mencionadas foi do tipo não tecida de poliéster, de referência comercial MT 600 da Maccaferri, com densidade superficial ou gramatura de  $600\text{g/m}^2$ , abertura de  $0,06$  a  $0,13\mu\text{m}$  e espessura de  $4,4\text{mm}$ , que é a mais recomendada para fins de projetos em ETAs.

As Figuras 3.32, 3.33 e 3.34 apresentam sequência de fotos dos leitos de drenagem de Cardoso-SP, Guanhães-MG e Guaíra-SP, respectivamente.



**Figura 3.32** – Leito de drenagem construído na ETA de Cardoso-SP. Sequência ilustrando (a) o despejo do lodo no leito; (b) a água livre drenada; (c) o lodo “seco”.

*Fonte:* Fontana (2004) citado por Reis (2011).



**Figura 3.33** – ETA de Guanhães-MG: (a) despejo de lodo em leito de drenagem; (b) leito de drenagem com lodo bruto; (c) remoção de lodo desaguado; (d) leito de drenagem pronto para receber novo despejo.

*Fonte:* Coelho (2011) citado por Reis (2011).



**Figura 3.34** – Leito de drenagem ETA de Guaíra-SP: (a) disposição da manta geotêxtil; (b) leitos cheios; (c) leito de drenagem com lodo desaguado; (d) lodo “seco”.

Fonte: Borba (2011) citado por Reis (2011).

Em relação aos estudos utilizando LD para desaguamento de lodo de ETE, poucos são os dados até o momento, e os resultados distintos daqueles utilizando lodo de ETA, dada a natureza e características particulares diversas do lodo de ETE, inclusive já discutidas neste trabalho.

Fontana *et al.* (2007) realizaram investigações com a utilização de LD para remoção de água de lodo de lagoa de estabilização. Nesta aplicação foram implantados dois módulos de LD, com volume total de 262m, cada. O primeiro foi revestido com manta geotecida de polipropileno com densidade superficial de 160g/m<sup>2</sup>, e o segundo com manta não tecida de poliéster com densidade superficial de 400g/m<sup>2</sup>. A operação se deu em dois ciclos de 30 dias, utilizando condicionante polimérico e Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) entre 14 e 17kgST/m<sup>2</sup>, resultando em redução de volume da ordem de 94%.

Mortara (2011) avaliou o desempenho de LD no desaguamento de lodo de reatores UASB com e sem emprego de condicionante químico. As características específicas deste estudo em protótipos de LD foram: manta geotêxtil de  $289\text{g/m}^2$ , dosagem de polímero de  $4\text{g/kg}$ , lodo com teor de sólidos inicial de  $2,68\%$ , TAS de  $14,9\text{kgST/m}^2$ , e altura inicial do lodo no protótipo de  $45\text{cm}$ . Após 1 (um) dia de ensaio obteve teor de sólidos de  $13,79\%$  e após 31 dias, teor de sólidos de  $37,42\%$ , com altura da torta final de  $10\text{cm}$ . Foram realizados também ensaios sem utilização de polímeros. Um destes ensaios – com teor de sólidos inicial de  $2,76\%$ , altura inicial de lodo de  $45\text{cm}$  e TAS de  $15,35\text{kgST/m}^2$  – alcançou torta com teor de sólidos de  $34,65\%$  e altura final de  $10\text{cm}$ , após 34 dias de secagem. Ao final, apontou dentre as conclusões que, comparando estes resultados, no que se refere à evolução do teor de sólidos, o lodo condicionado e sem adição de polímeros apresentou comportamento semelhante.

Quando comparou os resultados com variação na dosagem de polímero, independente da dosagem, Mortara (2011) obteve teor de sólidos de cerca de  $13\%$  após 1 (um) dia, e valores de  $25$  a  $30\%$  só foram obtidos após 30 dias. Apesar dos resultados semelhantes de evolução do teor de sólidos do lodo com e sem uso de polímero, relatou que se encontrou diferença em relação à remoção da torta da manta geotêxtil após o processo, mencionando que lodos não condicionados tornaram a operação mais trabalhosa, visto que houve impregnação da torta na manta.

Coimbra *et al.* (2016) realizaram dois ensaios simultâneos em protótipos de LD, sem uso de condicionantes, com mantas geotêxteis não tecidas de gramatura de  $200$  e  $600\text{g/m}^2$ , TAS de  $7,4$  e  $7,9\text{kgST/m}^2$ , aplicando um volume de  $20\text{L}$  de lodo de reator UASB em cada ensaio. Nestes ensaios foram realizadas medições de vazão de drenagem, teor de sólidos e qualidade do líquido drenado. Os resultados demonstraram que a característica da manta geotêxtil pode influenciar na fase de drenagem (três primeiras horas). A vazão inicial do líquido drenado para a manta com menor gramatura é maior, porém ao longo da fase de

drenagem este fato se inverte e a vazão de drenagem após 10 minutos é maior na manta com maior gramatura, chegando a valores próximos novamente após uma hora de ensaio. Isso pode ser explicado devido ao preenchimento dos vazios da manta pelos sólidos presentes no lodo. A qualidade do líquido drenado melhora à medida que o tempo de drenagem evolui, alcançando resultados semelhantes para ambas as mantas após 30min. O volume drenado acumulado, assim como a redução de volume durante a fase de drenagem é maior para a manta com maior gramatura, considerando a TAS de 7,9KgST/m<sup>2</sup>. Ao final da fase de drenagem para ambos os ensaios houve redução considerável de volume de lodo, da ordem de 55% para a manta de 200g/m<sup>2</sup> e 50% para a manta de 600g/m<sup>2</sup>. Por fim, segundo os autores, a secagem mostrou-se eficaz, visto que foram obtidos teores de sólidos da ordem de 33 a 45% em cinco dias e da ordem de 90% após 29 dias, este último, independente da manta utilizada.

Achon *et al.* (2016) realizaram quatro ensaios com lodo de reator UASB, aplicando-se 20L de lodo em protótipos de LD com mantas geotêxteis não tecidas de densidade superficial de 200, 300, 400 e 600g/m<sup>2</sup>, sem uso de condicionantes, e com TAS de 7,4; 7,1; 7,3 e 7,9KgST/m<sup>2</sup>, respectivamente. Durante os ensaios, assim como em Coimbra *et al.* (2016), mediu-se a vazão de drenagem, teor de sólidos e qualidade do líquido drenado. Os resultados demonstraram que ao término da fase de drenagem (três horas) o volume de lodo reduzido foi igual ou superior a 50% em todos os ensaios, alcançando 65% de redução no melhor deles. A drenagem foi finalizada após três horas do início dos ensaios, e para a manta de 600g/m<sup>2</sup> foram obtidos valores de turbidez de 27NTU e cor aparente de 90uC, após 1 hora de ensaio. Após três dias o teor de sólidos totais foi superior a 20% em todos os ensaios, com destaque para as mantas de densidade superficial de 200 e 600g/m<sup>2</sup>, que alcançaram 31,72 e 37,72%, respectivamente.

Coimbra e Achon (2016), com o objetivo de analisar os mesmos parâmetros dos dois relatos anteriores (vazão de drenagem, cor aparente e turbidez), acrescido do pH do drenado, realizaram quatro ensaios utilizando mantas geotêxteis não tecidas de densidade superficial de

300g/m<sup>2</sup> e 400g/m<sup>2</sup> limpas e usadas/sujas. Os resultados demonstraram vazão inicial média de 1,21L/min, sendo alcançado até 1,54L/min para a manta de 400g/m<sup>2</sup> limpa. Após 120 minutos, o volume de lodo foi reduzido em 59% em média, alcançando 67% para manta de 300g/m<sup>2</sup> usada. Após 60 minutos os ensaios apresentaram turbidez média de 33NTU e cor aparente média de 345uC, sendo que o pH variou entre 6,7 e 8,4.

Assim, com base nestas experiências de aplicação de lodo de ETA e, principalmente, de ETE em leito de drenagem, pode-se afirmar que existem alguns aspectos influenciadores no comportamento de desaguamento que podem ser relativos ao tipo e característica da manta utilizada, à taxa de aplicação de sólidos (TAS) e altura/volume de lodo, às condições climáticas, e à frequência de aplicação (mantas limpas e usadas). Além destes aspectos, acredita-se que um aspecto que possa influenciar significativamente na remoção de água do lodo de ETE em LD é a realização de revolvimento e a frequência de revolvimento da massa de lodo no LD. Neste sentido, propôs-se nesta pesquisa a utilização de diferentes mantas geotêxteis no desaguamento de lodo de ETE (buscando-se obter resultados para a fase de drenagem), diferentes TAS e altura/volume de lodo no LD, e realização de revolvimento da massa de lodo (buscando-se obter resultados para a fase de evaporação).

### **3.5. BIOSSECAGEM**

A biossecagem ou *biodrying* consiste em um processo que pode ser aplicado para a secagem do lodo de esgoto previamente desaguado, que deve ser conduzido de maneira a não permitir a perda de calor para a atmosfera, portanto, em reatores herméticos ou semi-herméticos. Ela é ativada devido à atividade biológica, que degrada a matéria orgânica presente e libera calor, aumentando a temperatura no interior da massa, o que resulta na quebra da partícula de lodo devido à energia liberada e, conseqüentemente, na evaporação das frações de água que exigem um nível de energia mais elevado para serem removidas e que ainda estão presentes na massa. Para tanto, é necessário que haja espaços livres no interior da

massa de lodo, que são promovidos por meio da adição e mistura de material estruturante ao lodo “bruto” desaguado e, com a injeção de ar, o contato com o oxigênio pelos microorganismos aeróbios decompositores é favorecido, a atividade biológica é ativada e a água evaporada é removida por convecção, uma vez que o ar injetado possui canais de entrada e de saída do reator. Além disso, por apresentar relativamente baixa remoção de sólidos voláteis da massa ao final do processo, consiste em um método que tem sido considerado de relevante atratividade para a geração de energia, dado o poder calorífico do resíduo biosseco.

Este método consiste em tema recente estudado para lodo de esgoto, com artigos mais antigos publicados datados a partir do ano de 2010. Anteriormente a isso, existem publicações e aplicações deste método para outros resíduos, como lodo do tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose, resíduos sólidos urbanos, outros resíduos orgânicos, etc.

A revisão bibliográfica deste método foi elaborada essencialmente por meio de consulta a artigos científicos e, inicialmente, com seleção de artigos diversos que tratavam do método, independente do resíduo aplicado na investigação. Dessa forma, os parágrafos em sequência descreverão aplicações e conclusões levantadas por vários autores e, ao final da descrição das contribuições consultadas, uma tabela contendo a compilação de resultados de artigos científicos que trabalharam a biossecagem de lodo de esgoto será apresentada e discutida, levantando pontos relevantes na aplicação e estudo do método para este resíduo.

Navae-Ardeh *et al.* (2010) estudando análises de variáveis-chave em um processo de biossecagem para secagem de mistura de lodo encontrou que o perfil de umidade relativa de saída de ar é considerado variável-chave em um reator de biossecagem, sendo necessária a busca pela manutenção de alta umidade relativa do ar de saída, o que garante maior eficiência na remoção de água e, portanto, maior concentração final de teor de sólidos na amostra.

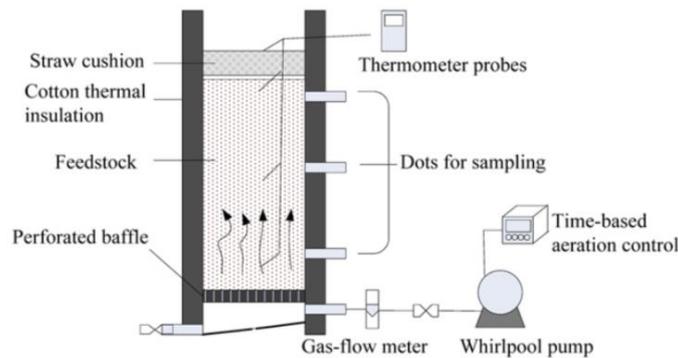
Frei *et al.* (2006) analisaram o processo de biossecagem (utilizando resíduo de madeira como material estruturante) para remoção de umidade de lodos do tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose com o objetivo de enviar o resíduo final para

combustão. Segundo eles, a secagem foi alcançada usando circulação de ar através da massa orgânica, o que faz com que ocorra um aquecimento interno devido à degradação microbiana da biomassa. Entretanto, prevendo a implantação para o caso específico que estudaram, concluíram que a amortização da implantação do projeto foi afetada pelo teor de umidade inicial do lodo, tempo de residência para secagem, quantidade de resíduo de madeira usado como estruturante, e manutenção da temperatura interna da biomassa.

Huiliñir e Villegas (2014) também estudaram o processo de biossecagem aplicado para lodo secundário de papel e celulose. Os experimentos foram conduzidos com diferentes vazões de entrada de ar para um teor de sólidos inicial do lodo entre 34 e 36%. Dentre as conclusões destacaram que altas vazões de ar causam como resultado mais alto teor de umidade final, temperatura mais baixa na matriz de lodo, e baixa redução de sólidos voláteis. Aumentando ainda mais a vazão de ar, a partir de um dado momento, o processo não pode ser chamado de biossecagem, pois não há secagem biológica devido à baixa temperatura, ocorrendo apenas secagem convectiva.

Zhao *et al.* (2010) aplicaram a biossecagem analisando os efeitos da vazão de ar e da frequência de revolvimento de lodo de esgoto previamente desaguado. Foram fixados dois valores de vazão de ar duplicados ( $0,76\text{L}/\text{min.kg}_{(\text{base úmida})}$  e  $1,515\text{L}/\text{min.kg}_{(\text{b.u.})}$ , ambos na mesma base úmida de 67,8% de umidade da mistura) em quatro reatores, sendo intermitente durante os 20 dias de experimento (1º ao 8º dia: 10min com aeração e 20min sem aeração; 9º ao 19º dia: 10min com aeração e 50min sem aeração), e realizando o revolvimento a cada 2 e a cada 4 dias para cada valor de aeração. Os estruturantes utilizados com o lodo de esgoto foram palha picada e pó de serragem, na proporção em massa de 15:1:2 (lodo:palha:serragem). Os reatores utilizados possuíam capacidade volumétrica de 81 litros cada, e a amostra utilizada (lodo + estruturantes) para cada reator foi de 22 kg. Dentre as conclusões que ressaltaram estão que para se atingir temperaturas mais altas no processo é necessário mais baixa vazão de ar e mais baixa frequência de revolvimento da massa.

Destacaram também que a realização do revolvimento resulta em maior homogeneidade e elimina gradiente de umidade, entretanto, em situação específica, o revolvimento pode ser substituído por uma aeração mais efetiva, atentando-se para não comprometer a manutenção da temperatura. Uma ilustração esquemática do experimento de Zhao *et al.* (2010) está representada na Figura 3.35.



**Figura 3.35** – Representação de aparato experimental para biossecagem de lodo.

Notas de tradução: *Straw cushion*: camada de palha; *Cotton thermal insulation*: Isolamento térmico de algodão; *Feedstock*: Massa (lodo + estruturantes); *Perforated baffle*: Fundo difusor perfurado; *Gas-flow meter*: Medidor de vazão de ar ou Rotâmetro; *Whirlpool pump*: Compressor; *Time-based aeration control*: Controlador de aeração intermitente ao longo do tempo; *Dots for sampling*: Aberturas para coleta de amostras; *Thermometer probes*: Sonda de temperatura ou Termômetro.

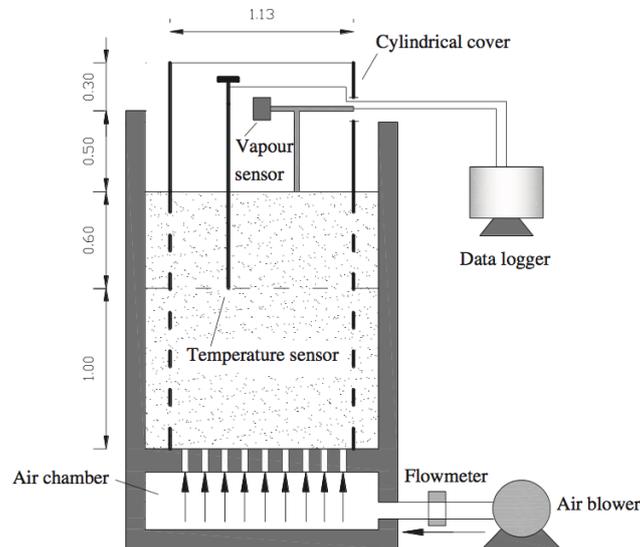
Fonte: Zhao *et al.* (2010).

Cai *et al.* (2012) investigaram a variação da umidade associada com a água de entrada e a água de evaporação durante a biossecagem de lodo de esgoto. Considerações relevantes para um processo de biossecagem foram levantadas, tais como: (i) o processo de biossecagem pode ser dividido em quatro fases (fase de aumento da temperatura, fase termofílica, segunda fase de aumento da temperatura, e fase de resfriamento); (ii) a aeração da massa dentro do reator consiste também em quantidade de água adicionada ao processo, devido à umidade do ar injetado, sendo maior, quanto maior a aeração; (iii) no início do processo a demanda de ar tende a ser baixa (fase de aumento da temperatura e fase termofílica), demandando revolvimento da massa e maior volume de ar quando a temperatura tende a cair (segunda fase de aumento da temperatura) e, por fim, após o segundo aumento de temperatura e posterior declínio, o processo de biossecagem está praticamente finalizado e menor vazão de ar significa menor quantidade de água adicionada à massa final; (iv) a demanda por maior

volume de ar tende a ocorrer antes do início da segunda fase de aumento da temperatura e após revolvimento, favorecendo este novo acréscimo de temperatura da massa; (v) o processo aeróbico de fermentação realizado pela comunidade microbiana gera um tipo de água classificada como “água de geração” ou geração de água; (vi) o aquecimento da massa provocado pela atividade biológica libera energia compatível para destruir a ligação da água superficial e gera um tipo de água classificada como “água de evaporação” ou evaporação de água, que é favoravelmente removida devido à aeração da massa; (vii) durante a fase de aumento da temperatura e a fase termofílica, o teor de sólidos, a água de geração e a água de evaporação aumentam e depois diminuem; (viii) o revolvimento favorece o início da segunda fase de aumento da temperatura, resultando no aumento da água de geração e água de evaporação, o que favorece a remoção de água.

Cai *et al.* (2013) analisaram a influência do volume de ar forçado na evaporação de água durante a biossecagem de lodo de esgoto. A mistura inserida no reator, com massa total de 1.280kg, possuía inicialmente 34% de teor de sólidos e, após 20 dias de biossecagem, com revolvimentos realizados no 9º, 12º, 15º e 18º dias, alcançou 51,3% de teor de sólidos. A mistura foi realizada em base volumétrica, tendo a proporção de 3:2:1, sendo lodo desaguado (com 17,6% de teor de sólidos), produto de biossecagem (lodo biosseco anteriormente), e pó de serragem. Por se tratar de um experimento para controle e monitoramento da influência do volume de ar forçado na evaporação de água da amostra, Cai *et al.* (2013) monitoraram a temperatura ao longo do experimento, uma vez que esta é uma variável de fundamental importância para permitir a perda de água. Sendo assim, classificaram o experimento em quatro fases, conforme Cai *et al.* (2012): aumento da temperatura (1º e 2º dias), termofílica (3º ao 9º dia), segundo aumento da temperatura (10º ao 15º dia), e resfriamento (16º ao 20º dia). A temperatura inicial da amostra foi de 22,5°C, ultrapassou 55°C no terceiro dia, e alcançou o valor mais alto no 9º dia (72,3°C). Depois do primeiro revolvimento (9º dia), a temperatura caiu para 47,2°C, e durante a fase de segundo aumento da temperatura (10º ao 15º dia), a

temperatura chegou a 57,8°C. Após o 15º dia a amostra foi se resfriando até 21,7°C, no 20º dia. A representação do equipamento experimental utilizado por Cai *et al.* (2013) encontra-se na Figura 3.36.



**Figura 3.36** – Estrutura do experimento de biossecagem de lodo de esgoto (unidade: m).

Notas de tradução: *Air chamber*: Câmara de ar; *Temperature sensor*: Sensor de temperatura; *Vapour sensor*: Sensor de vapor; *Cylindrical cover*: Cobertura cilíndrica ou Tampa cilíndrica; *Data logger*: Registro de dados; *Flowmeter*: Medidor de vazão ou Rotâmetro; *Air blower*: Compressor.

*Fonte:* Cai *et al.* (2013).

Dentre suas conclusões, Cai *et al.* (2013) mencionaram que a velocidade do ar e a evaporação da água foram significativamente dependentes do volume de ar forçado e aumentaram juntamente com o volume de ar durante a fase de aumento da temperatura, fase termofílica, e fase de segundo aumento da temperatura. Durante o processo de biossecagem do lodo de esgoto, a aeração forçada controlou a temperatura da amostra e melhorou a evaporação, conduzindo à perda de água.

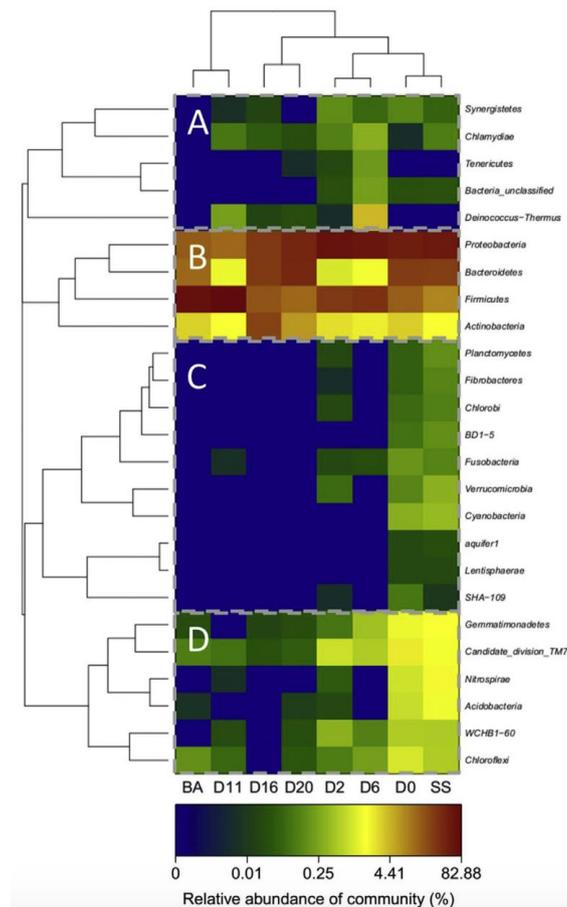
Villegas e Huiliñir (2014) também realizaram pesquisa utilizando o processo de biossecagem para lodo de esgoto. Utilizando três umidades iniciais distintas para o processo, identificaram que com teor de sólidos inicial da massa de aproximadamente 30% a temperatura da massa e o consumo de sólidos voláteis aumentam, apresentando mais alta remoção de umidade em valores de umidade inicial mais baixos. Baixas vazões de ar conduzem a temperaturas da massa e consumo de sólidos voláteis mais altos, todavia, altas

vazões de ar favorecem o aumento da remoção de água. A umidade inicial da massa exerce um efeito mais significativo nos perfis de temperatura, teor de umidade, espaço de ar livre e consumo de sólidos voláteis, enquanto a vazão de ar tem um efeito estatisticamente significativo apenas no perfil de temperatura. Além disso, Villegas e Huiliñir (2014) propuseram modelos cinéticos aceitáveis para simular a biodegradação de sólidos voláteis sob várias condições em um processo de biossecagem.

Huiliñir e Villegas (2015) estudaram o efeito simultâneo do teor de umidade inicial e da vazão de ar na biossecagem de lodo de esgoto. Foi utilizado lodo secundário desaguado previamente em filtro prensa com a adição de floculantes orgânicos para alcançar o teor de sólidos inicial de 11,75%. Foram feitos nove ensaios, variando três vazões de ar (1, 2 e 3L/min.kg<sub>(ST)</sub>) em três teores de sólidos iniciais diferentes (do mais seco para o mais úmido: 41, 32 e 22%). Para obter estes teores de sólidos iniciais, o lodo desaguado foi misturado com cavacos de madeira em proporções distintas (lodo:estruturante): 2:1, 3,33:1 e 10:1, respectivamente. Ao longo dos ensaios foram realizados revolvimentos diários após dois dias do início e os ensaios duraram um período total de oito dias. Neste estudo foram apresentados os efeitos da umidade inicial e da vazão de ar nos perfis de temperatura, na remoção de água, na remoção de sólidos voláteis, no balanço energético e na eficiência do processo de biossecagem. Em relação à temperatura, foram monitoradas as temperaturas da amostra dentro do reator e do ar de saída do reator. Verificou-se que um aumento rápido na temperatura ocorreu nas primeiras 24 horas de todos os ensaios, e este aumento foi mais expressivo na mais baixa vazão de ar (1L/min.kg<sub>(ST)</sub>) para todas as umidades iniciais aplicadas. Os resultados com maior atividade microbiana e maior temperatura alcançada foram obtidos para teor de sólidos inicial de 32%. Com maior umidade inicial (teor de sólidos igual a 22%) foi observada necessidade de maior tempo para alcançar picos de temperatura, que foram inferiores às outras duas situações de umidade inicial estudadas. Isso se atribuiu à baixa atividade microbiana. Verificou-se também que baixa vazão de ar conduziu a

temperaturas mais altas na amostra e na saída de ar do que alta vazão de ar. Isso se explica pois baixas vazões conduzem à manutenção da energia dentro do reator, evitando perda de energia por aeração (VILLEGAS e HUILINIR, 2014). Ainda sobre a temperatura, quanto maior o teor de sólidos inicial da amostra, mais rápido se atinge o seu primeiro valor máximo. Contudo, são valores ótimos de teor de sólidos inicial que favorecem alcançar temperaturas mais altas. Sobre a remoção de água, foi constatado que quando a temperatura de saída de ar apresentava comportamento semelhante, quanto maior a vazão de ar, maior o volume de ar seco injetado e, portanto, maior a taxa de remoção de água. Reportaram também que quanto maior a vazão de ar, maior a remoção de água, e que teor de sólidos inicial próximo a 32% favorece a remoção de água. Quanto à remoção de sólidos voláteis, foi constatado que a vazão de ar não apresenta influência significativa. Já o teor de sólidos inicial da mistura, sendo muito alto ou muito baixo, apresenta remoção de sólidos voláteis mediana, porém, quando há maior teor de sólidos foi possível inferir que ocorre menor remoção de sólidos voláteis do que em baixo teor de sólidos. A respeito do balanço de energia, concluiu-se que a vazão de ar também não possui significativa influência, uma vez que a produção de energia por reação biológica está associada ao consumo de sólidos voláteis. Por fim, em se tratando da eficiência do processo de biossecagem, que foi calculada a partir da razão entre a massa de água removida pela massa de sólidos voláteis, verificou-se que maiores teores de sólidos inicial conduzem a um melhor resultado de eficiência do processo.

Cai *et al.* (2016a) investigaram as variações das comunidades bacterianas e o relacionamento entre comunidades bacterianas, evaporação de água, geração de água, e degradação de matéria orgânica durante a biossecagem de lodo de esgoto. As condições deste experimento seguiram as mesmas características descritas em Cai *et al.* (2013). A respeito da variação das comunidades bacterianas ao longo do processo de biossecagem, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3.37.



**Figura 3.37** – Análise de mapa de aquecimento de comunidades bacterianas, mostrando sua distribuição em nível de filo. O agente estruturante (BA – *Bulking Agent*) e o lodo de esgoto (SS – *Sewage Sludge*) foram coletados a 22,5°C; as amostras do dia 0 (D0) foram coletadas a 25,5°C e as do 2º dia (D2) foram coletadas a 48,5°C durante a fase mesofílica; as amostras do 6º dia (D6) foram coletadas a 68,3°C durante a primeira fase termofílica; as do 11º dia (D11) foram coletadas a 50,3°C durante a segunda fase termofílica; no 16º dia (D16) coletou-se as amostras a 38,7°C durante a fase de esfriamento; e, por fim, no 20º dia (D20) foram coletadas a 21,9°C que correspondeu ao final do processo de biossecagem.

Fonte: Cai *et al.* (2016a).

Analisando a Figura 3.37, Cai *et al.* (2016a) destacaram que para todas as amostras, as comunidades bacterianas foram mais abundantes no grupo B, enquanto nos grupos A e C foram menos abundantes, e no grupo D, moderadamente abundantes. Os grupos C e D mostraram que a abundância das comunidades diminuiu depois de ocorrer o aquecimento devido à atividade biológica na mistura utilizada. Considerações específicas sobre os filos dominantes durante o processo de biossecagem também foram apontadas. Proteobactérias, Bacteroidetes, Firmicutes, e Actinobactérias foram os quatro filos dominantes identificados durante todo o processo de biossecagem, representando coletivamente 91,5 e 99,7% das sequências totais no início do experimento (dia 0) e no fim (20º dia), respectivamente. Os

percentuais de Bacteroidetes e Actinobactérias diminuíram de 26,6 e 3,3% no dia 0 para 1,4 e 1,8% no 11º dia (durante a fase termofílica), e se recuperaram na fase de esfriamento, alcançando 39,1 e 6,8% no 20º dia, respectivamente. Em contrapartida, as Proteobactérias e as Firmicutes aumentaram de 46,8 e 14,8% no dia 0 para seus valores máximos de 65,3% no 2º dia e 82,9% no 11º dia, respectivamente, após a temperatura ter aumentado. A maioria dessas bactérias tem sido reconhecida como *Acinetobacter* (filo Proteobacteria) e *Bacillus* (filo Firmicutes). A abundância das comunidades bacterianas nos grupos C e D (Figura 3.37) diminuiu após a entrada na fase termofílica e não mostrou aumentos após o resfriamento da massa, implicando que estas comunidades foram mortas a temperaturas superiores a 50°C. Cai *et al.* (2016a) identificaram também as bactérias dominantes, em nível de gênero, durante as diferentes fases da biossecagem:

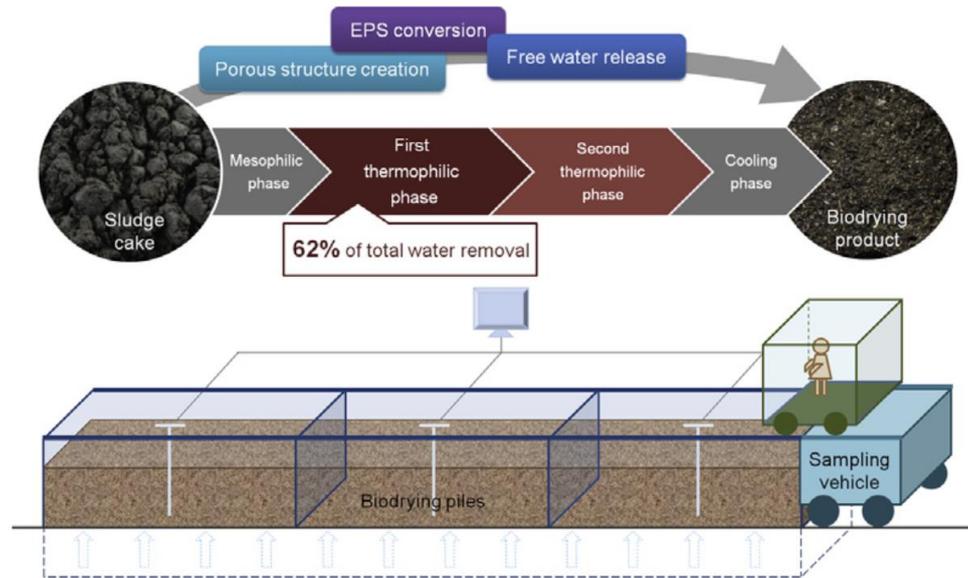
*Fase mesofílica:* no início desta fase, nenhum gênero estava presente em altas proporções na mistura. *Ferri-bacterium* (6,8%, filo Proteobactéria), *Arcobacter* (5,7%, filo Proteobactéria), *Flavobacterium* (4,5%, filo Bacteroidetes) e um gênero não cultivável de *Chitinophagaceae* (1,6%, filo Bacteroidetes) foram dominantes no início da fase mesofílica, no dia 0. À medida que a temperatura aumentava, a abundância destes gêneros era significativamente menor (2º dia), exceto para o *Flavobacterium* que se recuperou durante a fase de resfriamento, tornando o segundo gênero mais dominante no final do processo de biossecagem (10,9%, 20º dia). No último estágio da fase termofílica, o *Acinetobacter* (filo Proteobactéria) aumentou de 0,8 no dia 0, para 47,2% no 2º dia, tornando-se o gênero termofílico mais abundante, e sua abundância diminuiu para 1,6% no 20º dia, quando a biossecagem foi finalizada. As abundâncias de *Tepidimicrobium* (filo Firmicutes) e *Comamonas* (Filo Proteobactéria) aumentaram de 0,03 e 0,5% no dia 0, para 7,4 e 5,5% no 2º dia, sendo, respectivamente, o segundo e o terceiro gêneros mais dominantes no último estágio da fase mesofílica (CAI *et al.*, 2016a).

*Fase termofílica:* na primeira fase termofílica, o *Acinetobacter* (filó Proteobactéria) manteve sua predominância, representando 42,3% das bactérias no 6º dia, seguido do gênero *Bacillus* (filó Firmicutes), com 5,8%, também no 6º dia. Na segunda fase termofílica, o *Bacillus* (filó Firmicutes) se tornou o gênero mais abundante (51,6% no 11º dia), embora sua abundância diminuiu para 5,9% no 20º dia, tornando-se a quarta bactéria mais abundante ao final do experimento (CAI *et al.*, 2016a).

*Final da biossecagem:* *Sphingobacterium* (filó Bacteroidetes) foi o gênero mais dominante quando o processo de biossecagem terminou (23,8%), seguido do *Flavobacterium*, com 10,9% (CAI *et al.*, 2016a).

Em relação ao relacionamento entre comunidades bacterianas, evaporação de água, geração de água, e degradação de matéria orgânica durante a biossecagem de lodo de esgoto, Cai *et al.* (2016a) constataram que, durante a fase termofílica, as taxas diárias de evaporação de água, geração de água, e degradação de sólidos voláteis atingiram seus valores máximos. Especialmente durante o estágio inicial e intermediário da primeira fase termofílica, as taxas de degradação diária de compostos hidrolisáveis, lipídicos e hemicelulósicos alcançaram seus valores máximos, impulsionando assim a taxa de evaporação diária da água para o seu valor máximo, enquanto as taxas de degradação de celulose e lignina alcançaram suas máximas durante a segunda fase termofílica.

Cai *et al.* (2016b) realizaram novas investigações durante o processo de biossecagem de lodo de esgoto. O experimento foi conduzido conforme representação sumarizada na Figura 3.38.



**Figura 3.38** – Representação sumarizada dos procedimentos e resultados obtidos, e estrutura da área do experimento de biossecagem de lodo de esgoto.

**Notas de tradução:** *Sludge cake*: Lodo desaguado (19,8% teor de sólidos); *Mesophilic phase*: Fase mesofílica; *First thermophilic phase*: Primeira fase termofílica; *Second thermophilic phase*: Segunda fase termofílica; *Cooling phase*: Fase de resfriamento; *Biodrying product*: produto biosseco; *Porous structure creation*: Criação de estruturas porosas; *Extracellular Polymeric Substances (EPS) conversion*: Conversão de Substâncias Poliméricas Extracelulares (SPE); *Free water release*: Liberação de água livre; *Biodrying piles*: Massa em biossecagem; *Sampling vehicle*: Veículo para coletar amostra; *62% of total water removal*: 62% de remoção de água durante o processo.  
 Fonte: Cai *et al.* (2016b).

Neste experimento, Cai *et al.* (2016b) utilizou pó de serragem com diâmetro aproximado de 2mm e produto biosseco como materiais estruturantes na preparação da mistura. A proporção de mistura utilizada foi de 6:1:3, em termos de massa, para lodo desaguado (19,8% de teor de sólidos), pó de serragem, e produto biosseco, respectivamente. O teor de sólidos inicial da mistura e o percentual de sólidos voláteis obtidos foram de 37,7% e 79,5%. Os ajustes de vazão de ar e a frequência de revolvimentos mecanizados eram controlados automaticamente baseados na temperatura da massa e na concentração de oxigênio. Durante o experimento foram realizados revolvimentos no 9º, 12º, 15º e 18º dia, e a duração total do experimento foi de 20 dias. Nesta pesquisa foram investigadas a taxa de remoção de água, a estrutura do lodo (análise morfológica), a variação das Substâncias Poliméricas Extracelulares (SPE)<sup>2</sup>, e a liberação de água livre ao longo do processo. O

<sup>2</sup> Substâncias Poliméricas Extracelulares (SPE): “tecnicamente, biofilmes são uma conglomeração de bactérias, fungos, algas, protozoários, resíduos ou produtos de corrosão

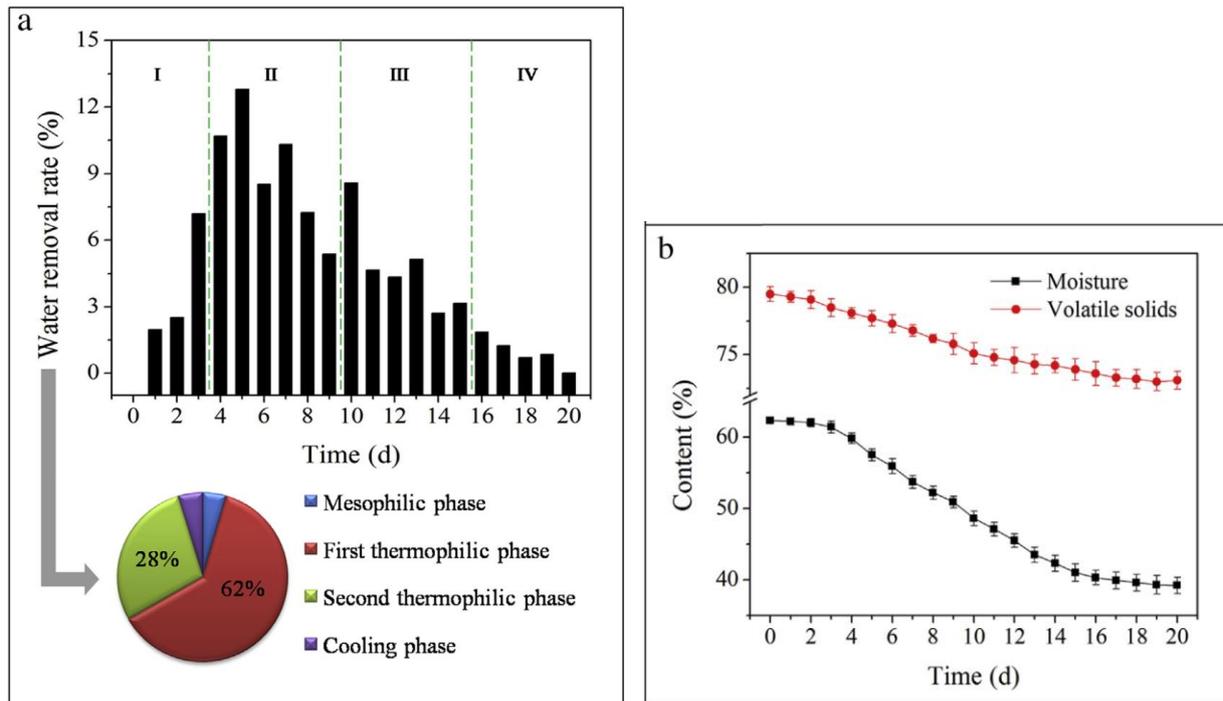
processo de biossecagem foi dividido em quatro fases, sendo redenominado a partir de Cai *et al.* (2012), do início para o final: (1) fase mesofílica (fase de aumento da temperatura, em Cai *et al.* (2012)), (2) primeira fase termofílica (fase termofílica, em Cai *et al.* (2012) - quando a temperatura alcança valores maiores que 50°C), (3) segunda fase termofílica (segunda fase de aumento da temperatura, em Cai *et al.* (2012) - após o revolvimento a temperatura aumenta novamente acima de 50°C e depois decresce), e (4) fase de resfriamento (fase de resfriamento, em Cai *et al.* (2012) - a temperatura decresce até retomar a temperatura inicial). A Figura 3.39 ilustra os resultados obtidos por Cai *et al.* (2016b) para taxa de remoção de água ao longo do processo.

Assim, Cai *et al.* (2016b) notaram que a maior taxa de remoção de água ocorre durante a primeira fase termofílica (62% do total removido), o que denota que altas temperaturas possuem relação de proporcionalidade direta com a remoção de água na biossecagem. Em relação aos resultados referentes à estrutura do lodo, apontaram que a estrutura da amostra inicial é mais compacta e viscosa do que a estrutura da amostra final (biosseca), e o processo remodelou a estrutura das partículas de lodo, formando uma estrutura estratificada mais nítida e oca. Comparando amostras secas termicamente em estufas com as amostras da biossecagem (em mesmas condições de umidade), perceberam que, em relação às amostras de biossecagem, as atividades microbianas mantêm a estrutura menos angular, com bordas mais suaves e deixam muitos poros. Quanto à variação das SPE, notaram que, devido à biossecagem, as proteínas aromáticas e subprodutos microbianos solúveis nas SPE foram

---

*aderidos em uma matriz autoproduzida e secretada de Substâncias Poliméricas Extracelulares (SPE). A SPE pode ser composta de polissacarídeos, proteínas, ácidos nucléicos e lipídeos. Essencialmente, um biofilme pode se formar quando bactérias aderem a superfícies em ambientes aquosos e começam a excretar SPE, uma substância pegajosa e grudenta que pode ancorá-las a todos os tipos de materiais, tais como metais, plásticos, partículas de solo, materiais de implantes médicos e tecidos. Uma vez ancoradas à uma superfície, os microrganismos do biofilme carregam uma variedade de reações prejudiciais ou benéficas (para os padrões humanos), dependendo das condições ambientais circundantes. Um exemplo de reação benéfica é a aplicação de biofilme para degradar cloreto de vinila, um solvente tóxico que pode contaminar o lençol freático e colocar em risco os recursos de água potável” (PACHECO, 2009).*

significativamente degradadas. Por fim, em relação à liberação de água livre ao longo do processo, concluíram que a fase termofílica foi a fase que resultou na maior liberação de água livre, ou seja, a que propiciou a transformação de água ligada (intersticial, superficial e intracelular) em água livre.



**Figura 3.39** – Taxa de remoção de água, teor de umidade, ou sólidos voláteis na biossecagem de lodo de esgoto. **a** – Taxa de remoção de água durante o processo de biossecagem de lodo de esgoto. As áreas separadas por linhas tracejadas são: I – fase mesofílica, II – primeira fase termofílica, III – segunda fase termofílica, e IV – fase de resfriamento. **b** – Teor de umidade e teor de sólidos voláteis na biossecagem de lodo de esgoto.

**Notas de tradução:** *Water removal rate (%)*: Taxa de remoção de água (%); *Time (d)*: Tempo (dias); *Mesophilic phase*: fase mesofílica; *First thermophilic phase*: Primeira fase termofílica; *Second thermophilic phase*: Segunda fase termofílica; *Cooling phase*: Fase de resfriamento; *Content (%)*: Teor (%); *Moisture*: Umidade; *Volatile solids*: Sólidos voláteis.

*Fonte:* Cai *et al.* (2016b).

Cai, Gao e Hong (2015) averiguaram os efeitos de diferentes regimes de revolvimento mecanizados nas mudanças de temperatura e evaporação durante a biossecagem de lodo de esgoto. Para tanto, prepararam a mistura em proporções volumétricas de 3:2:1, utilizando lodo desaguado (com 17,6% de teor de sólidos), lodo biosseco, e pó de serragem, e conduziram o processo durante 20 dias. O teor de sólidos inicial e de sólidos voláteis da mistura foi de 34,4 e 73,7%. Para investigarem o efeito do revolvimento, três frequências distintas de revolvimento foram aplicadas, sendo: (i) no 3º, 12º, 15º e 18º dia; (ii) no 6º, 12º, 15º e 18º dia; e (iii) no 9º, 12º, 15º e 18º dia. Ao final do experimento, os seguintes teores de sólidos totais e

sólidos voláteis foram obtidos para os revolvimentos, respectivamente: em (i) 39,6 e 68,4%; em (ii) 43,9 e 67,3%, e em (iii) 49,7 e 66,7%. Ao final, concluíram que realizando o primeiro revolvimento na fase de mesofílica (i) foi a estratégia menos eficaz. Já o primeiro revolvimento ao final da primeira fase termofílica (iii), seguido de três revolvimentos após a primeira fase termofílica, permitiu obter a mais alta temperatura, derivada do que se denominou “bio-aquecimento” (1,641 MJ/kg de material de biossecagem inicial). Nesta situação (iii), obteve-se a mais alta taxa de evaporação (0,379 kg/kg de material de biossecagem inicial), e alcançou uma taxa de utilização de aquecimento de 58,1%.

Yang, Zhang e Jahng (2014) realizaram vários ensaios de biossecagem com o objetivo de identificar a influência da umidade inicial (ou teor de sólidos inicial) no processo e de identificar o melhor estruturante dentre: lodo seco por aeração, lodo biosseco, borracha picada e pó de serragem. Dentre suas observações destacaram que o teor de sólidos inicial ótimo para a biossecagem está entre 30 e 50%, e que a atividade microbiana foi reduzida quando o teor de sólidos inicial era demasiadamente alto ou baixo. Se o teor de sólidos inicial for muito baixo, o excesso de umidade aumenta a espessura da película e preenche os poros menores entre as partículas, o que limita o transporte de oxigênio. Nessas circunstâncias, a atividade microbiana é impedida e a biossecagem não pode ocorrer. Quando a água é removida e os vazios são cheios de ar, a transferência de oxigênio do ar para a película de água é aumentada, o que facilita a biossecagem. Mas, se demasiada água é removida, a atividade microbiana é retardada por falta de umidade, o que resulta em um desempenho de secagem reduzido. Segundo eles (YANG; ZHANG; JAHNG, 2014), geralmente se acredita que o teor de sólidos inicial está relacionado com o Espaço de Ar Livre (EAL). O EAL de uma mistura para ser submetida à biossecagem é importante para a determinação da quantidade e do movimento do ar através dela. A expressão “teor de sólidos inicial ótimo” representa uma compensação entre a demanda de umidade pelos micro-organismos e, simultaneamente, a sua necessidade para um fornecimento adequado de oxigênio. Para a remoção efetiva de água em um processo de

biossecagem é necessária a manutenção de altas temperaturas o maior tempo possível. Em relação às conclusões sobre os ensaios variando o estruturante, identificaram que o uso do lodo seco por aeração e do lodo biosseco resultou em maior aumento na temperatura, maior redução de peso da massa, e maior remoção de água do que o uso da borracha picada e do pó de serragem. Mesmo assim, o uso da borracha picada e do pó de serragem também é recomendado por outros autores como agente estruturante, pois proporciona porosidade e estrutura suficientes. Contudo, a borracha não pode absorver água do lodo ou impedir a formação de gomos de lodo. Além disso, a borracha picada é extremamente resistente à decomposição microbiana, por isso, a partir do seu uso a contribuição para a produção de calor metabólico não é esperada. Em relação ao uso do pó de serragem, embora este absorva água do lodo, sua capacidade de absorção é muito mais baixa do que a do lodo seco por aeração e a do lodo biosseco, porque a fração solúvel dos cavacos de madeira é desprezível e os polímeros de celulose e hemicelulose no pó de serragem são insolúveis ou bloqueados pela massa insolúvel. Ademais, o pó de serragem quase não é degradado no processo de biossecagem, o que significa que calor metabólico não é produzido através dele. Por fim, embora o uso do lodo seco por aeração como estruturante tenha apresentado melhor desempenho no processo do que o uso do lodo biosseco, o lodo biosseco, que pode ser obtido com facilidade no próprio processo, ou seja, no mesmo local, é um agente estruturante preferível para a biossecagem de lodo de esgoto quando se considera o processo de biossecagem em aplicações práticas.

Winkler *et al.* (2013) apresentaram a implantação de processo de biossecagem de lodo em escala real. Neste artigo mencionam que se trata de uma estação de tratamento de lodo instalada na cidade de *Zutphen*, na Holanda (*GMB BioEnergie®*). Alguns apontamentos importantes são relatados a respeito do processo (WINKLER *et al.*, 2013):

- durante a aeração, microrganismos produzem aquecimento enquanto quebram/degradam a matéria orgânica, resultando na evaporação da água ligada e, portanto, levando à redução do volume de lodo;
- a água evaporada somente pode ser removida do reator se o ar de entrada for mais frio que o ar de saída;
- o processo todo dura cerca de 24 dias, usa resíduo de madeira como estruturante, e ocorre em duas etapas: uma de 10 e outra de 14 dias;
- com o objetivo de acelerar o processo, o ar de saída é constantemente recirculado, favorecendo a manutenção de temperaturas altas dentro dos reatores e, portanto, uma evaporação mais efetiva;
- antes de adentrar o processo de biossecagem, o lodo bruto é previamente desaguado em centrífuga, entrando no processo com aproximadamente 15 a 20% de teor de sólidos e, após processado, apresenta aproximadamente 67% de teor de sólidos.
- o resíduo final é destinado à geração de energia elétrica em uma usina de combustão e uma menor parte destinada à aplicação no solo;
- as capacidades de secagem do ar a 35, 55, 60 e 70°C são, respectivamente, 36, 100, 130 e 270g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/m<sup>3</sup><sub>ar</sub>;
- a estação trata 150 kton (peso úmido) de lodo por ano, consome menos que 0,5 MW de energia e gera 9,3 MW de energia;
- o aquecimento devido à decomposição da matéria orgânica também é aproveitado internamente para aquecer os escritórios da empresa;
- um atributo positivo adicional da biossecagem consiste nos esforços operacionais, que são mínimos. Portanto, não demanda trabalhadores com alto nível educacional, e procedimentos de manutenção e reparos podem ser facilmente executados, dada a facilidade de operação.

Informações complementares sobre a *GMB BioEnergie®* (WINKLER *et al.*, 2013) estão detalhados no item 5.1.1, que consiste em um relatório de visita à estação de tratamento de *Zutphen*.

Conforme mencionado no início deste tópico, ao longo da leitura de artigos científicos que investigaram o método de biossecagem aplicado para lodo de esgoto, compilou-se uma tabela (Tabela 3.9) com resultados de todos os ensaios mencionados nos artigos encontrados na literatura. Para encontrar e selecionar os artigos foi utilizada a base de dados *Web of Science*. Antes de realizar a pesquisa efetiva e final dos artigos na base de dados, no dia 19 de janeiro de 2017, foram realizadas algumas tentativas apenas com a palavra *biodrying* ou *bio-drying* como “assunto” de artigos científicos, e foi encontrado um total de 112 artigos. Ao realizar a leitura dos títulos dos artigos, suspeitando-se da aplicação do método de biossecagem para lodo de esgoto, realizava-se a leitura dos resumos. Ao final, notou-se que mais de 90% dos artigos tratavam de biossecagem com aplicações em outros resíduos ou apenas citavam o método. Assim, optou-se realizar uma nova busca com a palavra *biodrying* ou *bio-drying* e *sludge* como “assunto” de artigos científicos, e foram encontrados 47 artigos, contudo, a grande maioria não se tratava de aplicações de biossecagem em lodo de esgoto. Realizou-se mais uma tentativa acrescentando a palavra *sewage* como “assunto” em relação à busca anterior, e obteve-se um total de 29 artigos. Todavia, ainda assim, ao realizar a leitura dos resumos notou-se que mais de 60% dos artigos trabalhavam com mistura de resíduos ou apenas outro resíduo ou traziam abordagens genéricas em que se mencionava a biossecagem para lodo de esgoto. Então, por fim, para obter os artigos a serem revisados, na mesma plataforma, decidiu-se realizar a pesquisa pelas mesmas palavras, neste momento requerendo a presença das palavras no “título” dos artigos, o que gerou a seguinte fórmula de busca: *biodrying AND sludge AND sewage in title OR bio-drying AND sludge AND sewage in title*. Dessa maneira, um total de 9 artigos foi obtido, conforme elencado, do mais antigo para o mais recente, no Quadro 3.5 a seguir.

**Quadro 3.5** – Artigos obtidos em busca na plataforma *Web of Science* para biossecagem de lodo de esgoto.

<b>Título do artigo</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Periódico</b>
<i>Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying</i>	Cai, L (Cai, Lu); Gao, D (Gao, Ding); Chen, TB (Chen, Tong-Bin); Liu, HT (Liu, Hong-Tao); Zheng, GD (Zheng, Guo-Di); Yang, QW (Yang, Qi-Wei)	Aug 2012	<i>Bioresource Technology</i>
<i>Influence of forced air volume on water evaporation during sewage sludge bio-drying</i>	Cai, L (Cai, Lu); Chen, TB (Chen, Tong-Bin); Gao, D (Gao, Ding); Zheng, GD (Zheng, Guo-Di); Liu, HT (Liu, Hong-Tao); Pan, TH (Pan, Tian-Hao)	Sep 2013	<i>Water Research</i>
<i>The biodrying concept: An innovative technology creating energy from sewage sludge</i>	Winkler, MKH (Winkler, M. -K. H.); Bennenbroek, MH (Bennenbroek, M. H.); Horstink, FH (Horstink, F. H.); van Loosdrecht, MCM (van Loosdrecht, M. C. M.); van de Pol, GJ (van de Pol, G. -J.)	Nov 2013	<i>Bioresource Technology</i>
<i>Importance of Initial Moisture Content and Bulking Agent for Biodrying Sewage Sludge</i>	Yang, B (Yang, Benqin); Zhang, L (Zhang, Lei); Jahng, D (Jahng, Deokjin)	Jan 2014	<i>Drying Technology</i>
<i>Biodrying of sewage sludge: Kinetics of volatile solids degradation under different initial moisture contents and air-flow rates</i>	Villegas, M (Villegas, Manuel); Huilindir, C (Huilindir, Cesar)	Dec 2014	<i>Bioresource Technology</i>
<i>The Effects of Different Mechanical Turning Regimes on Heat Changes and Evaporation During Sewage Sludge Biodrying</i>	Cai, L (Cai, Lu); Gao, D (Gao, Ding); Hong, N (Hong, Nian)	Aug 2015	<i>Drying Technology</i>
<i>Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge</i>	Huilindir, C (Huilindir, Cesar); Villegas, M (Villegas, Manuel)	Oct 2015	<i>Water Research</i>
<i>Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge</i>	Cai, L (Cai, Lu); Chen, TB (Chen, Tong-Bin); Gao, D (Gao, Ding); Yu, J (Yu, Jie)	Mar 2016	<i>Water Research</i>
<i>Structure modification and extracellular polymeric substances conversion during sewage sludge biodrying process</i>	Cai, L (Cai, Lu); Krafft, T (Krafft, Thomas); Chen, TB (Chen, Tong-Bin); Gao, D (Gao, Ding); Wang, L (Wang, Li)	Sep 2016	<i>Bioresource Technology</i>

Analisando-se o Quadro 3.5, nota-se que a publicação dos artigos varia de 2012 a 2016, dada a novidade da aplicação de biossecagem em lodo de esgoto, e nota-se que, dentre

os autores, os que mais publicaram foram *Gao, D.* e *Cai, L.*, com cinco registros cada, seguidos de *Chen, T. B.* (com quatro registros), *Zheng, G. D.*, *Villegas, M.*, *Liu, H. T.* e *Huiliñir, C.* (com três registros cada), seguidos dos demais com apenas um registro cada. Dentre os três periódicos de publicação, a ordem de maior número de publicações para menor número de publicações é: *Bioresource Technology* (quatro artigos), *Water Research* (três artigos), e *Drying Technology* (dois artigos).

Para compilar a Tabela 3.9, foi realizada a leitura dos nove artigos citados no Quadro 3.5, acrescida da leitura de mais um artigo, datado de 2010, que não apareceu nas buscas por palavras no título, mas notou-se que se tratava de aplicação de biossecagem em lodo de esgoto ao realizar a leitura do resumo no momento de realização de tentativas anteriores (Quadro 3.6):

**Quadro 3.6** – Artigo extra obtido em busca na plataforma *Web of Science* para biossecagem de lodo de esgoto.

<b>Título do artigo</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Periódico</b>
<i>Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge</i>	<i>Zhao, L (Zhao, Ling); Gu, WM (Gu, Wei-Mei); He, P-J (He, Pin-Jing); Shao, LM (Shao, Li-Ming)</i>	<i>July 2010</i>	<i>Water Research</i>

Dessa forma, compilou-se a Tabela 3.9, apresentada a seguir, seguindo ordem cronológica de publicação dos artigos científicos (do mais antigo para o mais recente), e incluindo dados de todos os ensaios realizados em cada artigo. Vale ressaltar que não se encontra na tabela em questão o artigo de Villegas e Huiliñir (2014), pois os dados utilizados para a confecção dos dois artigos destes autores foram os mesmos, tendo apenas um enfoque diferente.

Ao todo, na Tabela 3.9, foram compilados 34 ensaios relatados nos dez artigos revisados. No que se refere às variáveis presentes na tabela, notou-se que em relação à vazão de ar ( $Q_{ar}$ ), na maioria dos ensaios foi utilizado valor fixo, com apenas sete ensaios utilizando controle automático desta vazão, baseado na taxa de consumo de oxigênio (algoritmo e *software* específico). Em um dos ensaios (WINKLER *et al.*, 2013) a  $Q_{ar}$  não foi informada.

**Tabela 3.9** – Compilação de dados de ensaios de biossecagem para lodo de esgoto dos artigos existentes até o momento e com acesso a partir da base de dados *Web of Science*.

Q <sub>ar</sub> (L/min. Kg <sub>b.u.</sub> )	Q <sub>ar</sub> (L/min. Kg <sub>ST</sub> )	Regime Q <sub>ar</sub>	Caracte- rísticas regime Q <sub>ar</sub> (on:off) minutos	Origem do lodo	Teor ST Lodo (%)	Método desagua- mento inicial	Teor SV Lodo (% ST)	Relação C/N Lodo	Estrutu- rante (E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>n</sub> )	EAL (E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>n</sub> )	Proporção mistura (L:E <sub>1</sub> :E <sub>2</sub> : E <sub>n</sub> )	Tamanho estrutu- rante (E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>n</sub> ) (mm)	Teor ST mistura (%)	Teor SV mistura (% ST)	EAL mis- tura	Relação C/N mistura	Tipo revolvi- mento	Fre- quência revolvi- mento	Massa total amostra (kg)	Dura- ção (dias)	Teor ST final (%)	Teor SV final (% ST)	Poder calóri- fico (kJ/ kg <sub>(ST)</sub> )	Refe- rência
0,7584	0,244 <sup>e</sup>	Intermi- tente	0-8d 10:20 ; 9-19d 10:50	Mistu- rado <sup>c</sup>	20,1	Centrí- fuga <sup>a</sup>	67,4	5,71	Palha picada, pó de serragem	NE	15:1:2 (m/m)	2-3 (E <sub>1</sub> )	32,2	80,4	NE	11,3	Manual	2 dias	22	20	77,15	52,26	14100 <sup>d</sup>	Zhao <i>et al.</i> (2010)
1,515	0,244 <sup>e</sup>	Intermi- tente	0-8d 10:20 ; 9-19d 10:50	Mistu- rado <sup>c</sup>	20,1	Centrí- fuga <sup>a</sup>	67,4	5,71	Palha picada, pó de serragem	NE	15:1:2 (m/m)	2-3 (E <sub>1</sub> )	32,2	80,4	NE	11,3	Manual	2 dias	22	20	78,44	50,89	14100 <sup>d</sup>	Zhao <i>et al.</i> (2010)
0,7584	0,244 <sup>e</sup>	Intermi- tente	0-8d 10:20 ; 9-19d 10:50	Mistu- rado <sup>c</sup>	20,1	Centrí- fuga <sup>a</sup>	67,4	5,71	Palha picada, pó de serragem	NE	15:1:2 (m/m)	2-3 (E <sub>1</sub> )	32,2	80,4	NE	11,3	Manual	4 dias	22	20	71,19	55,48	14100 <sup>d</sup>	Zhao <i>et al.</i> (2010)
1,515	0,4878 <sup>e</sup>	Intermi- tente	0-8d 10:20 ; 9-19d 10:50	Mistu- rado <sup>c</sup>	20,1	Centrí- fuga <sup>a</sup>	67,4	5,71	Palha picada, pó de serragem	NE	15:1:2 (m/m)	2-3 (E <sub>1</sub> )	32,2	80,4	NE	11,3	Manual	4 dias	22	20	76,27	52,9	14100 <sup>d</sup>	Zhao <i>et al.</i> (2010)
NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	Intermi- tente	NE	NE	17,7	NE	61,3	NE	Lodo biosseco, pó de serragem	NE	3:2:1 (v/v)	NE	33,9	73,7	NE	NE	Mecâ- nico	9°, 12°, 15°, 18° dia	1280	20	45,3	NE	NE	Cai <i>et al.</i> (2012)
NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	Intermi- tente	10:30	NE	17,6	NE	NE	NE	Lodo biosseco, pó de serragem	NE	3:2:1 (v/v)	NE	34	NE	NE	NE	Mecâ- nico	9°, 12°, 15°, 18° dia	1280	20	51,3	NE	NE	Cai <i>et al.</i> (2013)
NE	NE	Contí- nuo	NA	Variado	15-20	Centrífuga	NE	NE	Pedaços de madeira	NE	20:1 (m/m)	NE	25	NE	NE	NE	Mecâ- nico	10° dia	NE	24	67	NE	7700- 10400	Winker <i>et al.</i> (2013)
3,2 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	18,2	<i>belt press</i>	71,6	NE	NA	NA	NA	NA	18,2	71,6	53,3	NE	Manual	6° dia	1	10	19,2	70,2	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
2,3135 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	25,2	<i>belt press</i> + injeção de ar	71,9	NE	NA	NA	NA	NA	25,2	71,9	53,3	NE	Manual	6° dia	1	10	27	70,7	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
1,99 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	29,3	<i>belt press</i> + injeção de ar	71,8	NE	NA	NA	NA	NA	29,3	71,8	56,2	NE	Manual	6° dia	1	10	34,9	65,9	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
1,51 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	38,6	<i>belt press</i> + injeção de ar	71,7	NE	NA	NA	NA	NA	38,6	71,7	58	NE	Manual	6° dia	1	10	50,3	66,8	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
1,3 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	44,7	<i>belt press</i> + injeção de ar	72,2	NE	NA	NA	NA	NA	44,7	72,2	58,2	NE	Manual	6° dia	1	10	57,7	68,3	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
1,14 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	51,1	<i>belt press</i> + injeção de ar	71,4	NE	NA	NA	NA	NA	51,1	71,4	60,1	NE	Manual	6° dia	1	10	63,7	68,9	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)

Q <sub>ar</sub> (L/min. Kg <sub>b.u.</sub> )	Q <sub>ar</sub> (L/min. Kg <sub>ST</sub> )	Regime Q <sub>ar</sub>	Caracte- rísticas regime Q <sub>ar</sub> (on/off) minutos	Origem do lodo	Teor ST Lodo (%)	Método desagua- mento inicial	Teor SV Lodo (% ST)	Relação C/N Lodo	Estrutu- rante (E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>n</sub> )	EAL (E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>n</sub> )	Proporção mistura (L:E <sub>1</sub> :E <sub>2</sub> : E <sub>n</sub> )	Tamanho estrutu- rante (E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>n</sub> ) (mm)	Teor ST mistura (%)	Teor SV mistura (% ST)	EAL mis- tura	Relação C/N mistura	Tipo revolvi- mento	Fre- quência revolvi- mento	Massa total amostra (kg)	Dura- ção (dias)	Teor ST final (%)	Teor SV final (% ST)	Poder calóri- fico (kJ/ kg <sub>ST</sub> )	Refe- rência
0,942 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	61,9	belt press + injeção de ar	71,2	NE	NA	NA	NA	NA	61,9	71,2	63,3	NE	Manual	6 <sup>o</sup> dia	1	10	66,7	71	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
0,765 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	76,2	belt press + injeção de ar	71,7	NE	NA	NA	NA	NA	76,2	71,7	65,7	NE	Manual	6 <sup>o</sup> dia	1	10	80	71	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
1,822 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	16,4	belt press	NE	NE	Lodo aerado ("seco")	73,5	2,88:1 (m/m)	0,05-4,5	32	77,6	57,2	NE	Manual	5 <sup>o</sup> dia	7	12,9	45,8	52,53	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
1,5143 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	16,4	belt press	NE	NE	Borracha picada	71,1	2,88:1 (m/m)	5-7	38,5	NA (borra- cha)	56,4	NE	Manual	5 <sup>o</sup> dia	7	12,9	40	NA (borra- cha)	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
2,6743 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	16,4	belt press	NE	NE	Pó de serragem	95,3	17,33:1 (m/m)	0,05 diâmetro e < 6 compr- imento	21,8	86,5	62,8	NE	Manual	5 <sup>o</sup> dia	5,5	12,9	22,8	76,38	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
1,924 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	16,4	belt press	NE	NE	Lodo biosseco	73,5	2,88:1 (m/m)	0,05-4,5	30,3	73,7	57,5	NE	Manual	7 <sup>o</sup> dia	7	12,1	39,2	69,3	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
1,7774 <sup>e</sup>	0,583	Contí- nuo	NA	NE	16,4	belt press	NE	NE	Lodo aerado ("seco")	70,5	2,88:1 (m/m)	0,05-4,5	32,8	79,3	57,5	NE	Manual	7 <sup>o</sup> dia	7	12,1	46,9	74,7	NE	Yang, Zhang e Jahng (2014)
NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	Intermi- tente	NE	NE	17,6	NE	NE	NE	Lodo biosseco, pó de serragem	NE	3:2:1 (v/v)	NE	34,4	72,3	NE	NE	Mecâ- nico	3 <sup>o</sup> , 12 <sup>o</sup> , 15 <sup>o</sup> , 18 <sup>o</sup> dia	1280	20	39,6	68,4	NE	Cai, Gao e Hong (2015)
NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	Intermi- tente	NE	NE	17,6	NE	NE	NE	Lodo biosseco, pó de serragem	NE	3:2:1 (v/v)	NE	34,4	73,9	NE	NE	Mecâ- nico	6 <sup>o</sup> , 12 <sup>o</sup> , 15 <sup>o</sup> , 18 <sup>o</sup> dia	1280	20	43,9	67,3	NE	Cai, Gao e Hong (2015)
NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	Intermi- tente	NE	NE	17,6	NE	NE	NE	Lodo biosseco, pó de serragem	NE	3:2:1 (v/v)	NE	34,4	73,7	NE	NE	Mecâ- nico	9 <sup>o</sup> , 12 <sup>o</sup> , 15 <sup>o</sup> , 18 <sup>o</sup> dia	1280	20	49,7	66,7	NE	Cai, Gao e Hong (2015)
2,44 <sup>e</sup>	1	Contí- nuo	NA	Lodo secun- dário	11,75	Filtro prensa <sup>b</sup>	NE	7,82	Cavacos de madeira	NE	2:1 (m/m)	2,5	41	95,52	NE	12,05	Manual	2 <sup>o</sup> , 3 <sup>o</sup> , 4 <sup>o</sup> , 5 <sup>o</sup> , 6 <sup>o</sup> , 7 <sup>o</sup> dia	4,5	8	47,5	NE	NE	Huiliñir e Villegas (2015)
4,878 <sup>e</sup>	2	Contí- nuo	NA	Lodo secun- dário	11,75	Filtro prensa <sup>b</sup>	NE	7,82	Cavacos de madeira	NE	2:1 (m/m)	2,5	41	95,52	NE	12,05	Manual	2 <sup>o</sup> , 3 <sup>o</sup> , 4 <sup>o</sup> , 5 <sup>o</sup> , 6 <sup>o</sup> , 7 <sup>o</sup> dia	4,5	8	47,5	NE	NE	Huiliñir e Villegas (2015)
7,317 <sup>e</sup>	3	Contí- nuo	NA	Lodo secun- dário	11,75	Filtro prensa <sup>b</sup>	NE	7,82	Cavacos de madeira	NE	2:1 (m/m)	2,5	41	95,52	NE	12,05	Manual	2 <sup>o</sup> , 3 <sup>o</sup> , 4 <sup>o</sup> , 5 <sup>o</sup> , 6 <sup>o</sup> , 7 <sup>o</sup> dia	4,5	8	49	NE	NE	Huiliñir e Villegas (2015)

Q <sub>ar</sub> (L/min. Kg <sub>b.u.</sub> )	Q <sub>ar</sub> (L/min. Kg <sub>ST</sub> )	Regime Q <sub>ar</sub>	Caracte- rísticas regime Q <sub>ar</sub> (on:off) minutos	Origem do lodo	Teor ST Lodo (%)	Método desagua- mento inicial	Teor SV Lodo (% ST)	Relação C/N Lodo	Estrutu- rante (E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>n</sub> )	EAL (E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>n</sub> )	Proporção mistura (L:E <sub>1</sub> :E <sub>2</sub> : E <sub>n</sub> )	Tamanho estrutu- rante (E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>n</sub> ) (mm)	Teor ST mistura (%)	Teor SV mistura (% ST)	EAL mis- tura	Relação C/N mistura	Tipo revolvi- mento	Fre- quência revolvi- mento	Massa total amostra (kg)	Dura- ção (dias)	Teor ST final (%)	Teor SV final (% ST)	Poder calorí- fico (kJ/ kg <sub>(ST)</sub> )	Refe- rência
3,125 <sup>e</sup>	1	Contí- nuo	NA	Lodo secun- dário	11,75	Filtro prensa <sup>b</sup>	NE	7,82	Cavacos de madeira	NE	3,33:1 (m/m)	2,5	32	91,81	NE	10,27	Manual	2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 7° dia	6,77	8	36	NE	NE	Huiliñir e Villegas (2015)
6,25 <sup>e</sup>	2	Contí- nuo	NA	Lodo secun- dário	11,75	Filtro prensa <sup>b</sup>	NE	7,82	Cavacos de madeira	NE	3,33:1 (m/m)	2,5	32	91,81	NE	10,27	Manual	2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 7° dia	9	8	36	NE	NE	Huiliñir e Villegas (2015)
9,37 <sup>e</sup>	3	Contí- nuo	NA	Lodo secun- dário	11,75	Filtro prensa <sup>b</sup>	NE	7,82	Cavacos de madeira	NE	3,33:1 (m/m)	2,5	32	91,81	NE	10,27	Manual	2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 7° dia	8	8	40	NE	NE	Huiliñir e Villegas (2015)
4,545 <sup>e</sup>	1	Contí- nuo	NA	Lodo secun- dário	11,75	Filtro prensa <sup>b</sup>	NE	7,82	Cavacos de madeira	NE	10:1 (m/m)	2,5	22	84,65	NE	8,68	Manual	2°, 4°, 5°, 7° dia	14,71	8	23,5	NE	NE	Huiliñir e Villegas (2015)
9,09 <sup>e</sup>	2	Contí- nuo	NA	Lodo secun- dário	11,75	Filtro prensa <sup>b</sup>	NE	7,82	Cavacos de madeira	NE	10:1 (m/m)	2,5	22	84,65	NE	8,68	Manual	2°, 4°, 5°, 7° dia	14,48	8	23,5	NE	NE	Huiliñir e Villegas (2015)
13,636 <sup>e</sup>	3	Contí- nuo	NA	Lodo secun- dário	11,75	Filtro prensa <sup>b</sup>	NE	7,82	Cavacos de madeira	NE	10:1 (m/m)	2,5	22	84,65	NE	8,68	Manual	2°, 4°, 5°, 7° dia	15,74	8	23,5	NE	NE	Huiliñir e Villegas (2015)
NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	Intermi- tente	NE	NE	17,7	NE	NE	NE	Lodo biosseco, pó de serragem	NE	3:2:1 (v/v)	NE	33,9	737,5 g/kg	NE	NE	Mecâ- nico	9°, 12°, 15°, 18° dia	1280	20	45,3	667,3 g/kg	NE	Cai <i>et al.</i> (2016a)
NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	NE (consu- mo O <sub>2</sub> )	Intermi- tente	NE	NE	19,8	NE	62,1	NE	Lodo biosseco, pó de serragem	NE	6:1:2 (m/m)	NE, 2	37,7	79,5	NE	NE	Mecâ- nico	9°, 12°, 15°, 18° dia	NE	20	60,8	73,1	NE	Cai <i>et al.</i> (2016b)

b.u.: base úmida (*wet basis*).

Características regime (on:off) minutos: on=ligado ; off=desligado.

ST: Sólidos Totais.

SV: Sólidos Voláteis.

EAL: Espaço de Ar Livre.

NA - Não se Aplica.

NE - Não Especificado.

C/N: razão Carbono/Nitrogênio.

m/m: massa/massa (proporção em massa).

v/v: volume/volume (proporção em volume).

a: com adição de agentes orgânicos de floculação.

b: tipo parafuso, com agentes orgânicos de floculação.

c: processo anaeróbio-anóxico-aeróbio.

d: estimado pela média de perda de poder calorífico até o 16º dia de experimento.

e: estimado a partir do teor de ST da mistura.

Ainda em relação a esta variável ( $Q_{ar}$ ), notou-se que na maioria dos ensaios foi utilizada unidade por quilograma de sólidos totais ( $kg_{ST}$ ) ao invés de quilograma na base úmida ou *wet basis* ( $kg_{b.u.}$ ). Assim, os valores utilizados nos ensaios variaram de 0,244 a 3,0  $L \cdot min^{-1} \cdot kg_{ST}^{-1}$ . Quanto ao regime da  $Q_{ar}$ , 11 ensaios utilizaram regime intermitente e 23 utilizaram regime contínuo. Em relação à origem do lodo, quando especificado, utilizaram lodo misturado (originário de tratamento anaeróbico, anóxico e aeróbico), ou lodo classificado como “variado”, uma vez que se trata de estação de tratamento de lodo que recepciona lodo de variadas origens, ou ainda, apenas menção de se tratar de lodo proveniente de tratamento secundário. Ressalta-se que em nenhum ensaio foi registrado o uso de lodo de origem anaeróbia, acreditando-se ainda não ter existido aplicações de biossecagem para esta origem de lodo apenas.

Por se tratar de um método que demanda utilização de lodo previamente desaguado, uma parcela da água (aquela de maior facilidade de remoção) do que se convencionava lodo “bruto” em um processo de biossecagem deve ser retirada antes de realizar sua aplicação. Sendo assim, o teor de sólidos totais presente no lodo desaguado variou de 11,75 a 76,2%, lembrando que alguns ensaios que possuíam altos teores de sólidos iniciais (25,2 a 76,2%) consistiram em ensaios para investigar exclusivamente a influência da umidade inicial da massa em um processo de biossecagem e, portanto, estes altos teores foram obtidos com o auxílio de aplicação controlada e prolongada de aeração (YANG, ZHANG e JAHNG, 2014). Logo, pode-se afirmar que o teor de sólidos inicial do lodo desaguado variou de 11,75 a 20%.

Quanto ao método de desaguamento para obter os teores de sólidos iniciais, todos os ensaios que citaram a tecnologia utilizada para tanto, informaram sobre a utilização de método mecânico, sendo métodos de filtração (filtro prensa ou *belt press*) e centrifugação. Em nenhum ensaio foi utilizado método natural de

desaguamento do lodo para obter amostra passível de ser aplicada na biossecagem. Em relação ao teor de sólidos voláteis (SV) do lodo desaguado, este variou de 62,1 a 72,2%. Recordando que, conforme mencionado ao longo da descrição dos artigos nesta revisão, o teor de SV do lodo e, principalmente, da mistura (lodo e estruturante(s)) consiste em variável de grande importância, uma vez que, para este processo, considera-se este parâmetro como o percentual de matéria orgânica contido na amostra.

A respeito da relação C/N (carbono/nitrogênio) do lodo desaguado, este parâmetro, quando especificado, variou de 5,71 a 7,82, enquanto que este mesmo parâmetro para a mistura (lodo e estruturante(s)), variou de 8,68 a 12,05. Neste processo, devido à relativamente baixa relação C/N do lodo e maior proporção do lodo na mistura, este parâmetro tende a ser menor na biossecagem em relação à compostagem. Contudo, devido à maior efetividade da aeração na biossecagem (aeração mecanizada) em relação à compostagem, se aplicado em condições adequadas, no processo de biossecagem a massa tem menos probabilidade de alcançar condições de anaerobiose.

No que concerne ao estruturante e seu tamanho, foram utilizados os seguintes estruturantes, com os respectivos tamanhos ou variações de tamanho: palha picada (2 a 3mm), pó de serragem (0,05 a 2mm), cavacos de madeira (2,5mm), borracha picada (5 a 7mm), lodo aerado (0,05 a 4,5mm), e lodo biosseco (0,05 a 4,5mm). Sobre as proporções lodo:estruturante(s) utilizadas, estas foram muito variáveis, inclusive com proporção de mistura realizada em termos de massa e em termos de volume. Verificou-se que a proporção mais utilizada em ensaios distintos de biossecagem foi a de 3:2:1 (v/v), sendo lodo desaguado:lodo biosseco:pó de serragem (CAI *et al.*, 2012, 2013, 2016a; Cai, Gao e Hong, 2015).

Em referência ao teor de sólidos totais na mistura, os valores variaram de acordo com o teor de sólidos totais do lodo desaguado, do(s) estruturante(s), e da proporção da mistura, o que correspondeu a um intervalo de variação real (desconsiderando os valores iniciais de Yang, Zhang e Jahng (2014) quando aeraram o lodo para investigarem a influência da umidade inicial da massa) de 21,8 a 41%. Vale recordar que, segundo Yang, Zhang e Jahng (2014), o intervalo ótimo de teor de sólidos inicial da mistura para realizar biossecagem é de 30 a 50%. Na análise da Tabela 3.9, os ensaios que mais demonstraram um perfil característico, principalmente relativo à temperatura (passando pelas fases mesofílica, primeira termofílica, segunda termofílica, e resfriamento), utilizaram teor de sólidos inicial da mistura entre 32 e 37,7%, sendo a média geral, considerando todos os ensaios, igual a 34,77%. Sobre o teor de sólidos voláteis da mistura, este variou de 71,2 a 95,52%, com média de 80,04%. Outra variável de grande interesse e mencionada principalmente em experimentos de compostagem é o Espaço de Ar Livre (EAL). Segundo Yang, Zhang e Jahng (2014), o EAL consiste em um fator importante na determinação da quantidade e do movimento do ar através da massa, sendo necessário um EAL adequado para fornecer oxigênio para os micro-organismos aeróbios, pois, se for insuficiente, pode prolongar o período de biodegradação e pode levar a condições anaeróbias. Apenas os ensaios realizados por Yang, Zhang e Jahng (2014) analisaram o EAL, que variou de 53,3 a 65,7%, com média de 58,42%.

No tocante ao revolvimento, em todos os ensaios conduzidos foi realizado pelo menos um revolvimento, 26 deles realizados de maneira manual e oito mecanicamente. É importante ressaltar que, quando realizado de maneira manual, conforme recomendado por Zhao *et al.* (2010), o tempo de mistura da massa, seja antes de iniciar o experimento ou no momento de revolvimento, deve ser de 30 a 60

minutos, para garantir maior homogeneidade na massa, bem como reduzir a presença de gomos de lodo, que impedem o contato do oxigênio, dada a baixa ou mínima porosidade deste resíduo.

Quanto à massa total aplicada no reator, apenas as experiências relatadas por Cai *et al.* (2012, 2013 2016a); Cai, Gao e Hong (2015) e por Winkler *et al.* (2013) que se trataram de maiores quantidades, sendo de 1.280kg e não especificada (NE) dada a natureza em escala real, respectivamente. Nas demais aplicações, a massa total aplicada nos reatores de biossecagem variaram de 1 a 22kg. A duração total dos ensaios variou de 8 a 24 dias, sendo relatadas mais aplicações com duração de 20 dias. A média de duração dos ensaios compilados foi de 13,5 dias.

No que se refere ao teor de sólidos totais ao final dos ensaios, desconsiderando-se aqueles em que Yang, Zhang e Jahng (2014) aeraram o lodo desaguado antes do processo para investigarem a influência da umidade inicial da massa, este variou de 22,8 a 78,4%. Calculando-se o percentual de remoção de água ao longo do processo para os mesmos ensaios antes considerados, obteve-se um intervalo de variação de remoção de água de 1,28 a 68,2%. Analisando-se apenas o percentual de remoção de água ao longo do experimento, os ensaios conduzidos por Zhao *et al.* (2010) foram os que mais removeram água da massa durante o processo de biossecagem, com uma média de remoção, em seus quatro ensaios conduzidos, de 64,25%. Sobre o teor de sólidos voláteis (SV) ao final da biossecagem, os valores registrados variaram entre 50,89 e 76,38%, e o percentual de redução de sólidos voláteis ao longo do processo, comparando percentual de SV da mistura com percentual de SV final, variou de 5,39 a 36,7%, sendo os três maiores percentuais de remoção, ensaios conduzidos por Zhao *et al.* (2010) e, dos cinco ensaios que mais reduziram o teor de SV, quatro são destes mesmos autores. Vale destacar que um

ensaio conduzido por Yang, Zhang e Jahng (2014) resultou em maior percentual de redução de SV (32,31%) do que um dos ensaios conduzidos por Zhao *et al.* (2010) (31%), mesmo removendo apenas 20,29% de água, ao passo que em Zhao *et al.* (2010) foram removidos 57,51%.

Por fim, quanto ao poder calorífico da amostra final de lodo biosseco, os autores que analisaram e especificaram este dado foram Zhao *et al.* (2010) e Winkler *et al.* (2013). Zhao *et al.* (2010) apresenta este dado em análise realizada no 16º dia, assim, para o final dos ensaios (20º dia), o valor do poder calorífico foi estimado pela média de perda de poder calorífico até o 16º dia de experimento, resultando em um valor aproximado de 14.100kJ/kg<sub>ST</sub>. Winkler *et al.* (2013), registrou valores de poder calorífico da massa ao final do processo, a qual é conduzida à combustão para geração de energia, variando de 7.700 a 10.400kJ/kg<sub>ST</sub>, no que se refere ao Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI), respectivamente. Ressalta-se que, de acordo com a literatura consultada, o poder calorífico do lodo biosseco está diretamente relacionado ao percentual de SV presente na amostra. Contudo, uma vez que o aumento da temperatura durante o processo de biossecagem está diretamente relacionado à redução dos SV durante a degradação microbiana (o que significa que está ocorrendo atividade biológica, e que traz como consequência maior quantidade de água removida da massa ao longo do processo), quanto mais se conserva os SV e mais água se remove da mistura, maior tende a ser o poder calorífico ao final. Logo, pode-se inferir que é importante encontrar um índice ótimo entre manutenção do percentual de SV e percentual de sólidos totais ou percentual de remoção de água ao final de um processo de biossecagem.

Ainda no contexto relacionado aos SV, Huiliñir e Villegas (2015) destacaram que teor de umidade muito alto ou muito baixo da massa (lodo e estruturante(s)) a ser

biosseca inibe a atividade biológica no processo, conseqüentemente não favorece o aumento da temperatura e, portanto, não conduz à remoção de água satisfatória, mas conserva os SV. Assim, mesmo obtendo-se maiores valores de SV no produto final (o que favorece obter alto poder calorífico), devido à baixa remoção de água, o valor de poder calorífico é diminuído e o aproveitamento energético do resíduo pode ser inviável. Por outro lado, obtendo-se um teor de umidade inicial ideal da massa (lodo e estruturante(s)), favorece-se a ocorrência de alta atividade biológica, elevando-se a temperatura da massa à fase termofílica, reduzindo-se o percentual de SV (dada a alta atividade biológica na massa), e obtendo-se como resultado um material mais seco. Logo, embora suspeita-se que obter um material mais seco ao final do processo pode ser de maior importância do que ter um material final com altos teores de SV, porém com alta umidade, estas podem ser variáveis a serem estudadas e comparadas em experimentos futuros. Ou seja, constatar o que é mais viável: ter um produto final muito seco e com baixo teor de SV, ou ter um produto final mais úmido e com teor de SV mantido. Assim, a partir dos resultados, pode-se discorrer sobre a obtenção de proporção ótima entre estas variáveis para que se obtenha um produto final com maior poder calorífico e, portanto, com maior eficiência no aproveitamento de energia através dele durante um processo de incineração, por exemplo.

Por fim, as observações finais que se pode fazer em relação à revisão bibliográfica realizada referente ao processo de biossecagem é que se notou uma carência no detalhamento dos aspectos construtivos do experimento por parte dos autores (o que levou à elaboração de um tópico específico nesta tese – tópico 7.2 – sobre recomendações para construção de experimento de biossecagem). Identificou-se também carência de abordagens referentes à padronização no uso de materiais, procedimentos básicos, e controle de variáveis (unidades), o que facilitaria a

comparação de resultados, compilação de dados e evolução no controle e conhecimento do processo. Como aspectos que evidenciam o ineditismo dos estudos da biossecagem nesta pesquisa, ressalta-se que todas as aplicações da biossecagem utilizando lodo de esgoto até o momento se trataram de aplicações com lodo de origem misturada (anaeróbio, anóxico e aeróbio), bem como utilização de métodos de desaguamento inicial mecânico. Logo, a contribuição da utilização da biossecagem para este resíduo nesta tese vem no sentido de se utilizar apenas lodo de origem anaeróbia (proveniente de reator UASB – amplamente utilizado em ETEs no Brasil), desaguado previamente por meio de método natural (leito de drenagem modificado), observando-se e comparando-se os resultados para estas condições.

### **3.6. ASPECTOS LEGAIS**

Existem vários instrumentos legislativos que se relacionam direta e/ou indiretamente à questão dos lodos de esgotos. O Quadro 3.7 identifica sinteticamente as legislações brasileiras vigentes que possuem estas relações com a questão dos lodos, e que devem ser criteriosamente analisadas.

De modo geral e assertivo é possível afirmar que, sensível à necessidade de preservação ambiental, o ordenamento pátrio registra expressiva legislação ambiental, dispondo e regulando o trato dessa questão. Em relação à problemática do lodo de ETE, por se classificar como resíduo sólido e estar diretamente relacionado com os recursos hídricos e com todos os subsistemas que compõem o sistema de saneamento ambiental, existem muitos instrumentos legais que abordam a questão, como os citados no Quadro 3.7.

Contudo, não raramente a proteção ambiental encontra obstáculos para sua efetiva concretização. Além de obstáculos relacionados à falta de recursos humanos,

instrumentos técnicos e engajamento funcional para realizar fiscalizações, identificar e quantificar impactos ambientais que estão ocorrendo, bem como prever implicações futuras derivadas de determinados aspectos ambientais, segundo Marin e Lunelli (2010), tais obstáculos representam-se, também, pela falta de adequada tutela jurisdicional.

**Quadro 3.7** – Legislações vigentes sobre lodos.

<b>LEGISLAÇÃO</b>	<b>ÂMBITO</b>	<b>CAP./ART./PAR./INC.</b>	<b>ASSUNTO</b>
<b>Constituição 1988</b>	Federal	Art. 225, caput	Direito ao meio ambiente equilibrado.
<b>Constituição 1988</b>	Federal	Art. 23, VI	Proteger o meio ambiente.
<b>Lei 6.938 de 1981</b>	Federal	Art. 2º	Manutenção da qualidade ambiental (PNMA).
<b>Lei 9.605 de 1998</b>	Federal	Art. 54, § 2º, V	Crime por lançamento de resíduos sólidos.
<b>Lei 12.305 de 2010</b>	Federal	Art. 3º, XVI	Definição de resíduos sólidos.
<b>Lei 12.305 de 2010</b>	Federal	Art. 13, I, “a” e II	Classificação de resíduos sólidos quanto à origem e periculosidade.
<b>NBR 10.004/2004</b>	Federal	-	Consideração de lodo como resíduo sólido.
<b>Res. CONAMA 357 de 2005</b>	Federal	-	Classificação de corpos d’água e lançamentos de efluentes.
<b>Res. CONAMA 375 de 2006</b>	Federal	-	Critérios e procedimentos – uso agrícola de lodo de ETE.
<b>Lei 997 de 1976</b>	Estadual-SP	Capítulo I	Proibição do lançamento de poluentes.
<b>Lei 12.300 de 2006</b>	Estadual-SP	Art. 14, V	Nenhum resíduo sólido pode ser lançado no sistema público de esgoto.
<b>Decreto-Lei 8.468 de 1976</b>	Estadual-SP	Arts. 3º, 4º e 19-B	Condições gerais sobre poluição e a questão do lançamento de lodo de ETA em ETE.

CAP.: capítulo; ART.: artigo; PAR.: parágrafo; INC.: inciso.

Fonte: Arquivo pessoal.

Marin e Lunelli (2010) complementam que essa tutela ambiental, realizada por meio de ações judiciais que seguem os princípios e procedimentos do processo civil, destinado primeiramente à solução de conflitos individuais, pode registrar reduzida efetividade, na medida em que sofre as influências de um processo fundado em princípios que se regem por ótica distinta.

Assim, é possível e não surpreendente afirmar que a efetividade e aplicabilidade da legislação ambiental, incluindo a questão do lodo, é deficiente. Entretanto, não se pode generalizar argumentos de que a legislação ambiental não é aplicada, mas sim que encontra muitos desafios e dificuldades. Inclusive, para a

questão de poluição devido a práticas inadequadas relativas à gestão e gerenciamento do sistema de esgotamento sanitário, é possível encontrar exemplos, principalmente devido à falta de tratamento de esgoto, lançamento de esgoto com parâmetros em desacordo com a legislação para a situação específica onde se situa o sistema, inexistência de tratamento do lodo de ETE e consequente infração nas práticas adotadas ou falta delas.

Por fim, como argumento de grande importância no que se refere à gestão de lodo de ETE que deve ser frisado é a destinação deste resíduo bruto ou tratado para aterros sanitários, o que, conforme já mencionado anteriormente, se trata de uma prática inadequada (segundo o que disciplina a Lei 12.305/2010 – PNRS) e amplamente adotada no país (IBGE/PNSB, 2008).

### **3.7. SÍNTESE E ANÁLISE CRÍTICA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os tópicos desta revisão bibliográfica podem ser sintetizados como uma abordagem que parte de um ponto macro e converge para discussões micro ou mais específicas. Ou seja, as discussões se iniciaram trazendo informações sobre o sistema de saneamento ambiental como um todo, apresentação do panorama do subsistema de esgotamento sanitário, reflexões sobre o tratamento dos esgotos, suas fases de tratamento, tratamento da fase sólida (lodo), características dos lodos (aeróbio e anaeróbio), etapas de remoção de água de lodo de ETE (adensamento, digestão, desaguamento, secagem, e aproveitamento/destinação final), métodos de desaguamento, métodos de secagem, abordagens específicas e mais aprofundadas sobre as tecnologias de maior interesse para este trabalho (leito de drenagem e biossecagem), e aspectos legais relacionados à questão dos lodos de ETE.

Em relação às críticas (problemas e dificuldades) que se pode pontuar e que foram surgindo ao longo dos estudos de cada tópico, as que se julgou de maior relevância são as que se encontram nos próximos parágrafos.

Ao buscar informações sobre o panorama do saneamento no Brasil, embora existam documentos oficiais que informam e discutem os dados (IBGE/PNSB, 2008; PLANSAB, 2014), o que se pode afirmar é que a situação do sistema de saneamento básico/ambiental de modo geral no Brasil é deficiente e distante do que se convencionou universalização dos serviços (Lei 11.445/2007). Quando se restringe o foco para o subsistema de esgotamento sanitário, esta situação negativa se intensifica ainda mais. Como crítica a este tema se menciona a imprecisão dos dados e o tratamento destes dados de saneamento no Brasil. No próprio PLANSAB (2014) existe afirmação neste sentido, inclusive apontando dificuldades para se compilar os dados e elaborar o Plano Nacional de Saneamento Básico. No corpo do texto deste documento levanta-se também o questionamento à confiabilidade e credibilidade das informações, uma vez que são alimentadas por distintas administrações públicas e privadas, que podem informar erroneamente, de maneira incompleta ou até mesmo inverídica.

Outro ponto a se discutir nesta crítica da revisão bibliográfica realizada é referente à falta de definição ou padronização das etapas de tratamento da fase sólida em uma ETE. Na literatura consultada não se encontrou uma publicação que definisse ou agrupasse todas as etapas que compõem o tratamento da fase sólida em uma ETE ou mesmo uma simulação que direcionasse e ordenasse tais etapas. Assim, após o estudo realizado e conforme exposto ao longo da revisão, foram encontradas várias etapas que podem compor as etapas de tratamento da fase sólida em ETE, sendo elas: condicionamento, adensamento, digestão, estabilização, desaguamento, secagem, e

aproveitamento/disposição final. Desse modo, para este trabalho e de acordo com seus objetivos, foi considerada a seguinte ordem e etapas como constituintes do tratamento da fase sólida em ETE (Figura 3.4): adensamento, digestão, desaguamento, secagem, e aproveitamento/disposição final.

Ainda em relação ao tratamento da fase sólida na ETE, outra crítica se refere aos variados métodos e tecnologias existentes e onde enquadrá-los. As dúvidas principais no enquadramento dos métodos e tecnologias foram referentes à etapa de desaguamento e secagem. Acredita-se que isso se deu também devido à dificuldade de se limitar até onde se considera desaguamento e a partir de que momento se trata de secagem. Além disso, a questão da classificação dos métodos térmicos gerou algumas incertezas, uma vez que a partir dos estudos realizados se entendeu que método térmico é todo aquele que demanda aumento da temperatura para que ocorra. Sendo assim, ainda que existam algumas classificações na literatura consultada (ex. Tao *et al.*, 2014), a partir dessa premissa, não se pode considerar as classificações existentes como absolutas ou completas, demandando, portanto, mais estudo e meditação para se propor uma classificação mais abrangente no que se refere às tecnologias existentes.

Sobre o leito de drenagem (LD), muitas são as aplicações, estudos e implantações quando se trata de lodo de ETA, o que consolidou esta tecnologia para este tipo de resíduo. Todavia, poucos e recentes são os experimentos com utilização de lodo de ETE. Logo, para este resíduo, novas aplicações e variações de experimentos são bem-vindas e devem ser exploradas e relatadas, como proposto nesta pesquisa.

No que diz respeito à biossecagem, as aplicações para lodo de esgoto são muito recentes, assim como no caso do LD. Acredita-se que por esta razão, as publicações existentes até o momento são obviamente relevantes e evolutivas, porém

carecem de padronização de metodologias, assim como demandam novas formas de aplicação, como a realizada nesta pesquisa, utilizando lodo anaeróbio previamente desaguado em sistema natural. Por esta razão também que se realizou a revisão deste tema de maneira a compilar os dados em uma tabela final (Tabela 3.9), o que facilitou a visualização e identificação das variáveis e do processo como um todo. Outros apontamentos críticos sobre biossecagem foram detalhadamente discutidos ao final do tópico “3.5. Biossecagem”.

Por fim, pode-se mencionar também a carência de fiscalização ambiental mais incisiva e abrangente para garantir boas práticas relativas à gestão e gerenciamento do lodo de esgoto, o que teria como consequência a promoção do artigo 225 da Constituição Federal Brasileira vigente e do que se convencionou desenvolvimento sustentável.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento desta pesquisa podem ser divididos em experimentos realizados no exterior e experimentos realizados no Brasil. Os experimentos realizados no exterior se referem a visitas técnicas e experimentos de biossecagem (lodo misturado/aeróbio – lodos ativados), e ocorreram devido à realização de Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE), financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Processo nº 99999.003698/2014-09, no Departamento de Engenharia Química, junto ao grupo de pesquisa em compostagem (*Grup d'Investigació en Compostatge – GICOM*), da *Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)*, orientado pelo prof. Dr. Xavier Font, em Barcelona, Espanha. Os experimentos realizados no Brasil se referem a experimentos relacionados à etapa de desaguamento de lodo de ETE com utilização de leito de drenagem, e relacionados à etapa de secagem, com utilização de processo de biossecagem, em ambas se utilizando de lodo anaeróbio (reator UASB).

### 4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados durante o período no exterior foram:

- três reatores semi-herméticos de 10 litros de capacidade volumétrica, devidamente equipados com sensores de temperatura (conectados a um computador com *software* específico), canal de entrada e saída de ar, e sistema de mangueiras e telas interno ao reator para melhor distribuição e direcionamento do ar do fundo para o topo do reator (Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4);



**Figura 4.1** – Reator semi-hermético de 10L de capacidade, utilizado no experimento de biossecagem.



**Figura 4.2** – Reatores semi-herméticos de 10L de capacidade, utilizados no experimento de biossecagem, equipados com sensor de temperatura, e mangueiras de entrada e saída de ar.

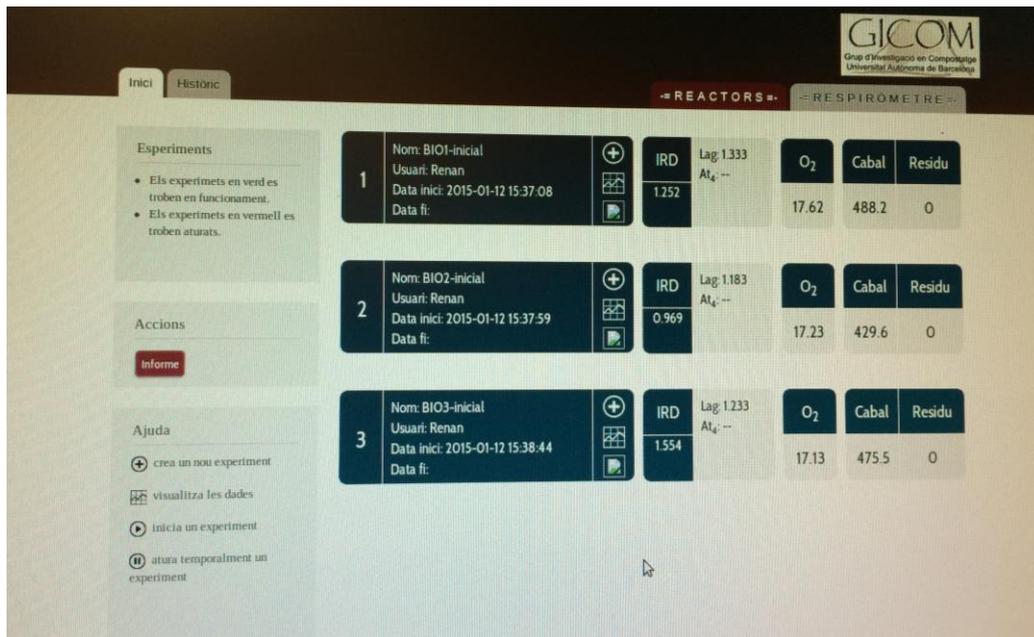


**Figura 4.3** – Reatores semi-herméticos de 10L de capacidade, um de controle (fechado) e dois de biossecagem (abertos após o terceiro dia).



**Figura 4.4** – Aparato de mangueira com quatro pontos de entrada de ar alocado ao fundo do reator, melhorando a distribuição ao longo da massa, do fundo para o topo.

- sistema computacional com controle de vazão de ar de entrada nos reatores a partir da taxa de consumo de oxigênio (*Oxygen Uptake Rate – OUR*), e com registro da temperatura interna da massa dentro do reator (*GICOM*), Figura 4.5;



**Figura 4.5** – Interface do sistema computacional do *software* utilizado no laboratório do GICOM.

- dois rotômetros para controle e regulagem da vazão de ar de entrada no reator (Figura 4.6);



**Figura 4.6** – Rotômetros utilizados para controle da vazão de ar (fixo) após atingir a máxima temperatura (apenas dois em utilização).

- lodo de esgoto misturado (originário de tratamento anaeróbico, anóxico e aeróbico), desaguado em centrífuga (Figura 4.7);



**Figura 4.7** – Lodo de esgoto misturado (anaeróbio, anóxico e aeróbio) e desaguado em centrífuga, da ETE Bèsos, Barcelona, Espanha.

- *pallets* de madeira descartados para triturar e obter dimensão adequada para preparação da mistura lodo-estruturante;
- triturador de madeira;
- madeira triturada peneirada, com dimensões  $\leq 7,10\text{mm}$ , utilizada como material estruturante (Figura 4.8);



**Figura 4.8** – Madeira triturada e peneirada utilizada como material estruturante ( $\leq 7,10\text{mm}$ ).

- peneira utilizada para peneirar a madeira triturada (Figura 4.9);



**Figura 4.9** – Peneira utilizada para peneirar a madeira de *pallets* triturada, com abertura de 7,10mm.

- equipamentos para análises de caracterização do lodo desaguado e para acompanhamento do experimento, em análises de sólidos totais (estufa), sólidos voláteis (mufla), e poder calorífico superior (bomba calorimétrica);
- *softwares* para compilação dos resultados (*Microsoft*<sup>®</sup> Excel, Word, Power Point, e Smartdraw<sup>®</sup>)

Os materiais utilizados durante o período no Brasil podem ser divididos para experimentos da etapa de desaguamento e para experimentos da etapa de secagem, no que se refere ao tratamento do lodo de esgoto. Sendo assim, os materiais utilizados para a etapa de desaguamento foram:

- protótipos de leito de drenagem em escala piloto (Figura 4.10) alocados na ETE, ao lado do reator UASB, para estudos de evaporação em distintas Taxas de Aplicação de Sólidos (TAS), altura da camada de lodo e mantas geotêxteis;
- rastelo para realização de revolvimentos;



**Figura 4.10** – Três protótipos de leito de drenagem em escala piloto alocados ao lado do reator UASB, para estudo da evaporação (um com capacidade volumétrica de 260L e dois com 50L).



**Figura 4.11** – Protótipos de leito de drenagem em escala piloto (menores).



**Figura 4.12** – Protótipo de leito de drenagem em escala piloto (maior).

- protótipos de LD em escala laboratorial (Figura 4.13), usados em laboratório, para estudo da drenagem com distintas mantas geotêxteis e TAS;



**Figura 4.13** – Protótipos de leito de drenagem em escala laboratorial, para estudo da drenagem das mantas (com capacidade volumétrica de 25L).

- mantas geotêxteis fornecidas pela Huesker® (Figuras 4.14, 4.15 e 4.16):
  - HaTe® 55/55 UV, gramatura ou densidade superficial de 272g/m<sup>2</sup> (geotêxtil tecido biaxial produzido a partir de filamentos de polipropileno, com aplicações principais em separação de materiais, filtração e reforço construtivo);
  - HaTe® 80/80 UV, gramatura ou densidade superficial de 397g/m<sup>2</sup> (geotêxtil tecido biaxial de polipropileno, com aplicações principais em separação, filtração e estabilização);
  - HaTe® 105/105 DW, gramatura ou densidade superficial de 450g/m<sup>2</sup> (geotêxtil tecido biaxial de polipropileno, com aplicações principais em separação, filtração, reforço e, especialmente, desaguamento).



Figura 4.14 – Hate® 55/55 UV.



Figura 4.15 – Hate® 80/80 UV.



Figura 4.16 – Hate® 105/105 DW.

- lodo anaeróbio proveniente de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo – UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*);
- equipamentos para análises laboratoriais de sólidos totais (estufa), sólidos voláteis (mufla), sólidos fixos, pH (peagâmetro), condutividade (condutivímetro), cor (colorímetro), turbidez (turbidímetro), DQO, DBO, N<sub>total</sub>, C<sub>total</sub>, e balança analítica.

Os materiais utilizados para a etapa de secagem foram:

- dois reatores semi-herméticos de inox com 17 litros de capacidade volumétrica, devidamente equipados com sensores de temperatura (conectados a um computador com *software* específico), canal de entrada e saída de ar, e sistema de mangueiras e telas interno ao reator para melhor distribuição e direcionamento do ar do fundo para o topo (Figuras 4.4, 4.17, 4.18 e 4.19);



**Figura 4.17** – Reator semi-hermético com sensor de temperatura ao centro e mangueiras de entrada e saída de ar.

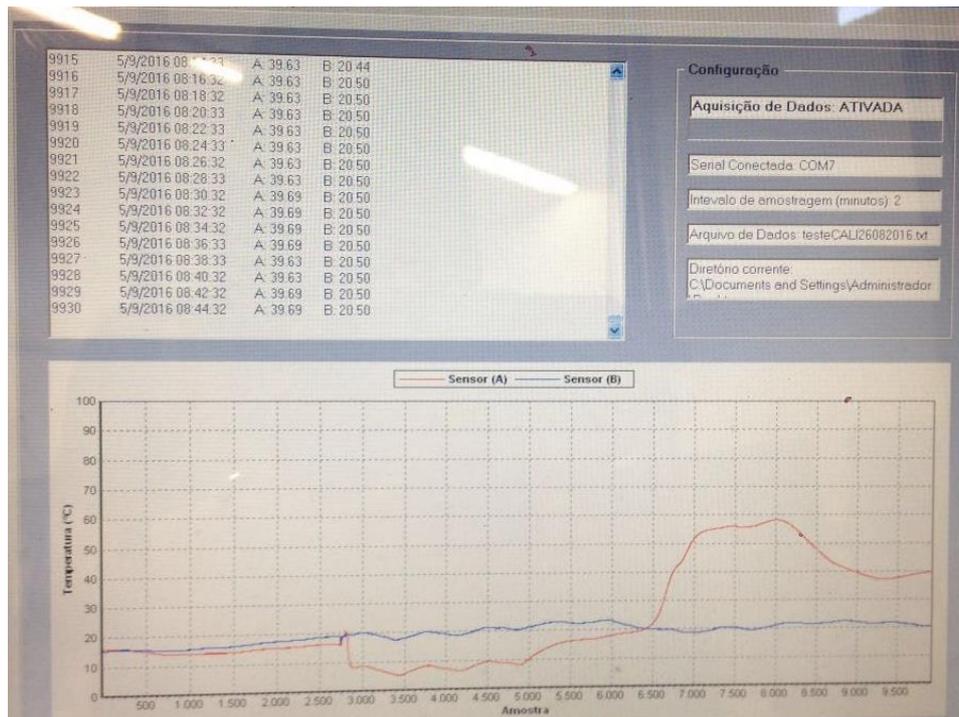


**Figura 4.18** – Reatores semi-herméticos utilizados nos experimentos de biossecagem no Brasil.



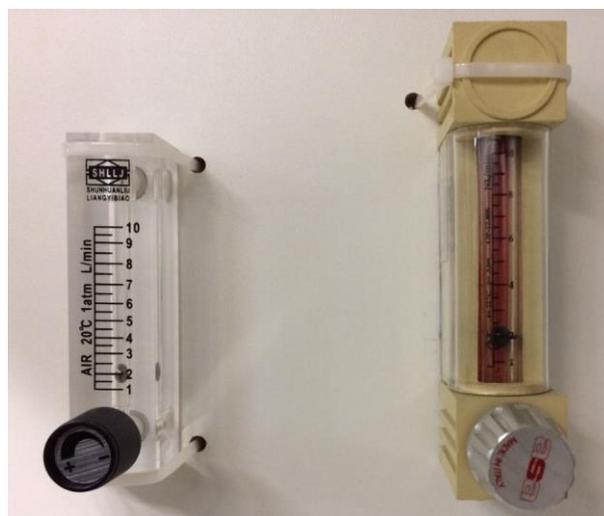
**Figura 4.19** – Tampa do reator de biossecagem ilustrando canais de entrada e saída de ar e local para sensor de temperatura.

- sistema computacional para monitoramento da temperatura interna da massa dentro do reator (Figura 4.20), desenvolvido em parceria com a UNESP de Bauru;



**Figura 4.20** – Interface do *software* específico utilizado para monitoramento da temperatura interna nos reatores semi-herméticos.

- dois rotômetros para controle e regulagem da vazão de ar de entrada no reator (Figura 4.21);



**Figura 4.21** – Rotômetros utilizados para controle da vazão de ar.

- lodo anaeróbico previamente desaguado em leito de drenagem, durante um período total de 33 dias de exposição (Figura 4.22);



**Figura 4.22** – Lodo anaeróbico previamente desaguado em leito de drenagem (sistema natural).

- cavaco de madeira com dimensões entre 5 e 15mm (Figura 4.23) para utilizar como material estruturante em experimentos de biossecagem;



**Figura 4.23** – Material estruturante (cavaco de madeira) com dimensões entre 5 e 15mm.

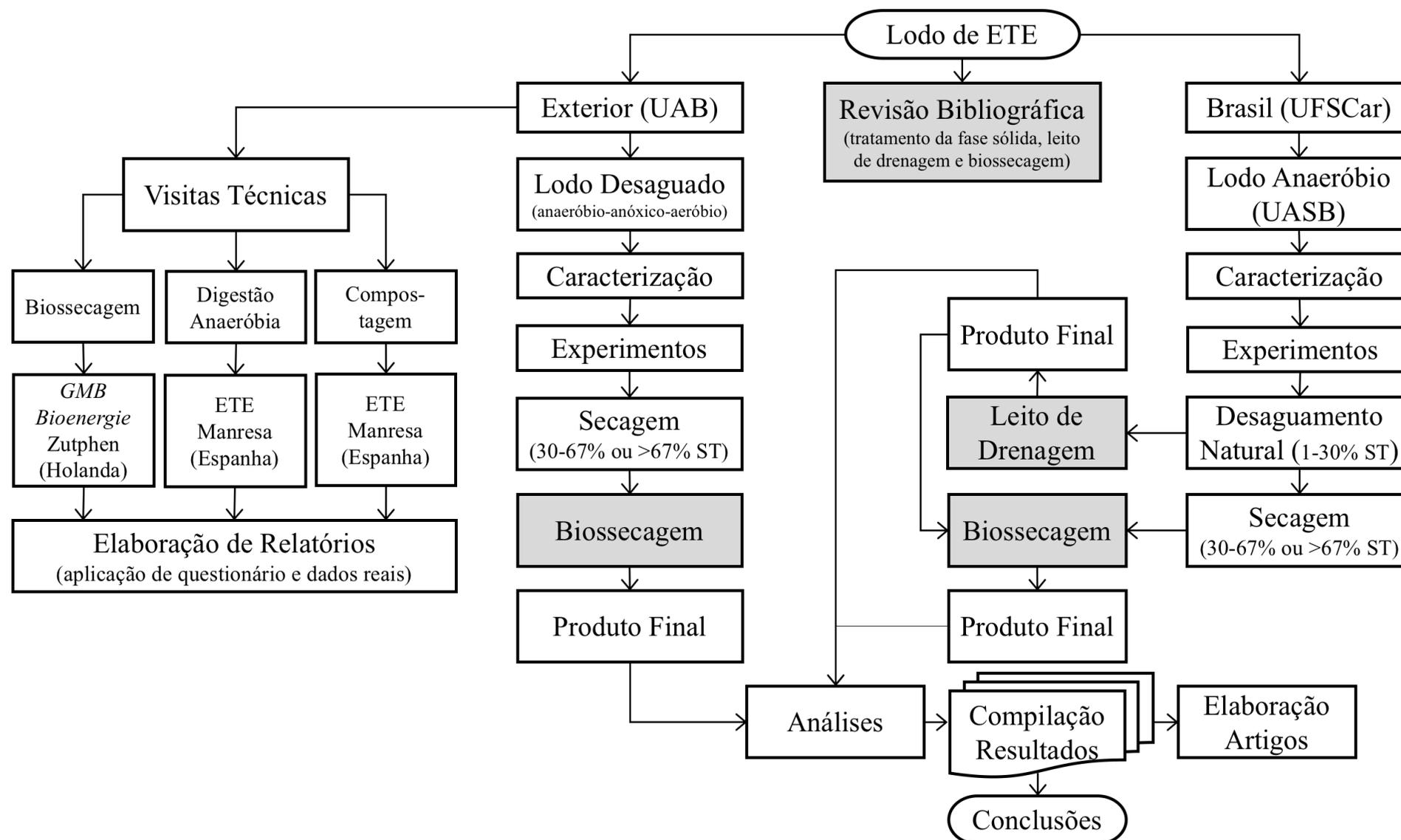
- equipamentos para análises laboratoriais de sólidos totais (estufa), sólidos voláteis (mufla), pH (peagâmetro), condutividade (condutivímetro), DQO, DBO,  $N_{total}$ ,  $C_{total}$ , poder calorífico superior e inferior (bomba calorimétrica), e metais (Cr, Pb, Cu, Mn, Zn, Hg,  $SO_x$ , P).

## 4.2. MÉTODOS

Antes de descrever e detalhar os métodos separadamente no que se refere aos procedimentos no exterior e no Brasil, elaborou-se um fluxograma geral resumido (Figura 4.24) de todos os procedimentos que compuseram os trabalhos desenvolvidos para obter os resultados apresentados e discutidos nesta tese. Optou-se por apresentar este fluxograma em um primeiro momento para facilitar o entendimento geral dos métodos utilizados e trabalhos realizados.

A Figura 4.24 inicia-se com a problemática de lodo de ETE subdividida em Brasil (UFSCar), Exterior (UAB), e Revisão Bibliográfica. Em relação à esta última, ressalta-se que foi desenvolvida ao longo de todo o período de pesquisa de doutorado, estando destacada por ser considerada um dos importantes resultados da presente tese, o que resultou na elaboração de artigo científico de revisão relacionado à biossecagem.

Em relação aos procedimentos realizados no exterior (UAB), estes compreenderam experimentos laboratoriais e visitas técnicas. As visitas técnicas foram realizadas em dois locais, compreendendo três temas: biossecagem, digestão anaeróbia e compostagem. Em relação à biossecagem, visitou-se uma estação de tratamento de lodo de esgotos que utiliza o processo de biossecagem (*GMB Bioenergie*<sup>®</sup>), localizada em Zutphen, na Holanda. Quanto à digestão anaeróbia e compostagem, visitou-se uma estação de tratamento de esgotos localizada em Manresa, na Espanha, a qual adota sistemas de digestão anaeróbia e compostagem do lodo de esgoto. Todas as visitas foram dirigidas por responsável técnico pelo local, ocorrendo registro fotográfico e aplicação de questionário, o que resultou em elaboração de relatórios de visita, apresentados no tópico 5.1.1. desta tese.



**Figura 4.24** – Fluxograma geral resumido dos métodos realizados para elaboração da tese, com destaque para quatro tópicos principais (cinza).

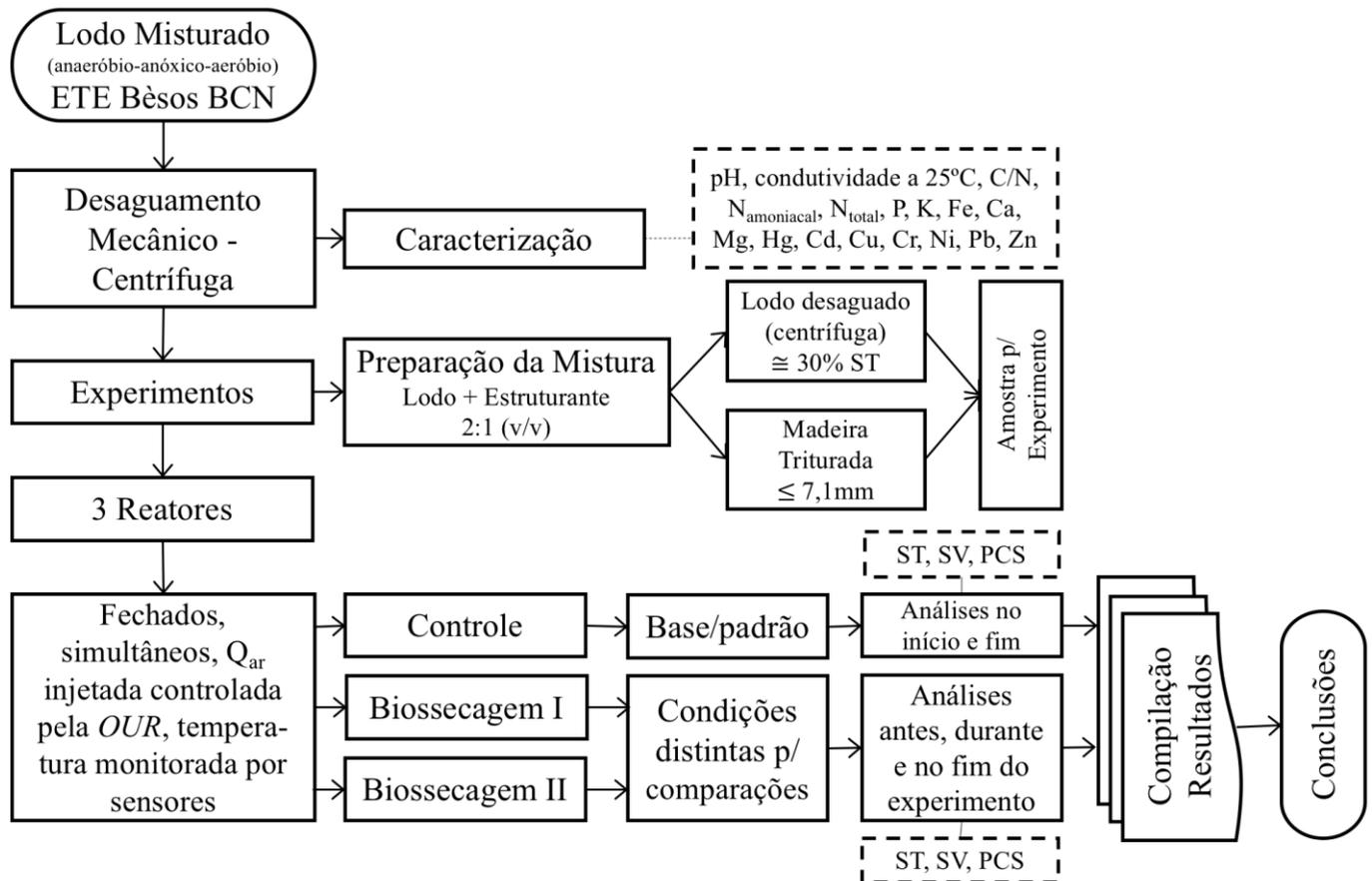
No que se refere aos procedimentos relativos aos experimentos conduzidos no exterior, estes compreenderam ensaios de biossecagem, com um reator considerado como controle para fins de comparação dos resultados, ambos utilizando lodo de esgoto misturado (proveniente de sistema de tratamento anaeróbio, anóxico e aeróbio), previamente desaguado em sistema mecânico (centrífuga). Nesta parte do fluxograma existe um elemento destacado (“biossecagem”), por compor um dos resultados principais desta tese, e resultar na compilação de artigo científico.

Com relação aos procedimentos desenvolvidos no Brasil (UFSCar), estes compreenderam ensaios relativos às etapas de desaguamento e secagem de lodo anaeróbio, proveniente de reator UASB. Sobre a etapa de desaguamento, investigou-se a utilização de leito de drenagem modificado para remoção de água em estudos de drenagem e de evaporação, envolvidos nesta tecnologia. No que concerne à etapa de secagem, investigou-se a aplicação de lodo anaeróbio (UASB), previamente desaguado em leito de drenagem (sistema natural de desaguamento), em processo de biossecagem, estudando variáveis como vazão de entrada de ar, temperatura, remoção de água, remoção de sólidos voláteis (matéria orgânica), e poder calorífico. Os elementos “leito de drenagem” e “biossecagem” estão destacados nesta parte do fluxograma apresentado na Figura 4.24 por também compreenderem resultados principais desta tese e resultarem na compilação de artigos científicos.

Assim, pode-se afirmar que, em termos de produção de artigos científicos para periódicos, os trabalhos desenvolvidos ao longo do período de pesquisa de doutorado resultaram na produção de quatro artigos científicos principais de alto impacto: um de revisão da literatura, e outros três de procedimentos experimentais, sendo um referente ao período no exterior (UAB) e dois conduzidos no Brasil (UFSCar).

### 4.2.1. Exterior

Como já mencionado, os procedimentos realizados durante o período no exterior consistiram em visitas técnicas e condução de experimentos de biossecagem. Em relação às visitas técnicas, os resultados foram compilados em forma de relatórios de visita. Quanto à parte experimental, a Figura 4.25 traz uma representação dos métodos adotados.



**Figura 4.25** – Fluxograma representando os métodos adotados para os experimentos conduzidos no exterior.

Os experimentos realizados duraram 14 dias e foram conduzidos em três reatores com capacidade volumétrica de 10L (Figura 4.1). O lodo foi previamente desaguado em centrífuga (alcançando aproximadamente 30% de ST), coletado na ETE Bèsos da área metropolitana de Barcelona, que conta com processo de lodos ativados para tratamento do esgoto. Em um primeiro momento, foi coletada amostra do lodo desaguado para caracterização. Na caracterização foram levantados dados de potencial hidrogeniônico (pH), condutividade a 25°C, relação carbono/nitrogênio (C/N), nitrogênio amoniacal ( $N_{\text{amoniacal}}$ ), nitrogênio total

( $N_{total}$ ), fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), cálcio (Ca), magnésio (Mg), mercúrio (Hg), cádmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), chumbo (Pb), e zinco (Zn).

Antes de se iniciar o experimento, foi realizada a preparação da mistura lodo:estruturante (L:E), com o objetivo de facilitar o contato do oxigênio injetado no reator com a matéria orgânica. O estruturante utilizado foi madeira de *pallets* triturada e peneirada, obtendo-se cavacos de madeira com dimensão menor ou igual a 7,10mm. A proporção de mistura L:E foi realizada em termos volumétricos, sendo de 2:1 (v/v). O experimento se iniciou de maneira idêntica e simultânea nos três reatores com 4kg de amostra em cada um, estando os três reatores fechados, com vazão de entrada de ar monitorada em *software*/algoritmo específico e controlada pela taxa de consumo de oxigênio (*Oxygen Uptake Rate – OUR*), com o objetivo de, após atingir a máxima temperatura, alterar os parâmetros de dois dos reatores (Biossecagem I e Biossecagem II), para comparar seus resultados com o reator Controle (C), mantido fechado e com vazão de ar controlada pela *OUR* durante todo o experimento. A representação da configuração do experimento (considerando-se apenas um reator) encontra-se apresentada na Figura 4.26.

Os três reatores foram colocados em operação e finalizados no mesmo momento. Os dois reatores de biossecagem, após três dias, quando alcançaram a máxima temperatura (aproximadamente 63°C), foram abertos, revolvidos, retirou-se o controle de vazão de ar pela *OUR*, e aplicou-se vazão de ar fixa mais elevada (1,0L/min.kg<sub>(base úmida inicial)</sub>). No décimo dia de experimento, um dos dois reatores de biossecagem recebeu novo aumento na vazão de ar com o objetivo de se observar o comportamento desta alteração (passando de 1,0L/min.kg<sub>(b.u.i.)</sub> para 2,5L/min.kg<sub>(b.u.i.)</sub>). Os dois reatores de biossecagem (B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub>), após abertos receberam revolvimento de toda a sua amostra a cada dois dias, com o objetivo de aumentar a qualidade da aeração e de coletar amostras mais homogêneas para monitoramento de teor de ST. A Figura 4.27 resume e representa detalhadamente como se deram os métodos do experimento conduzido ao longo dos 14 dias, bem como traz alguns parâmetros de entrada.

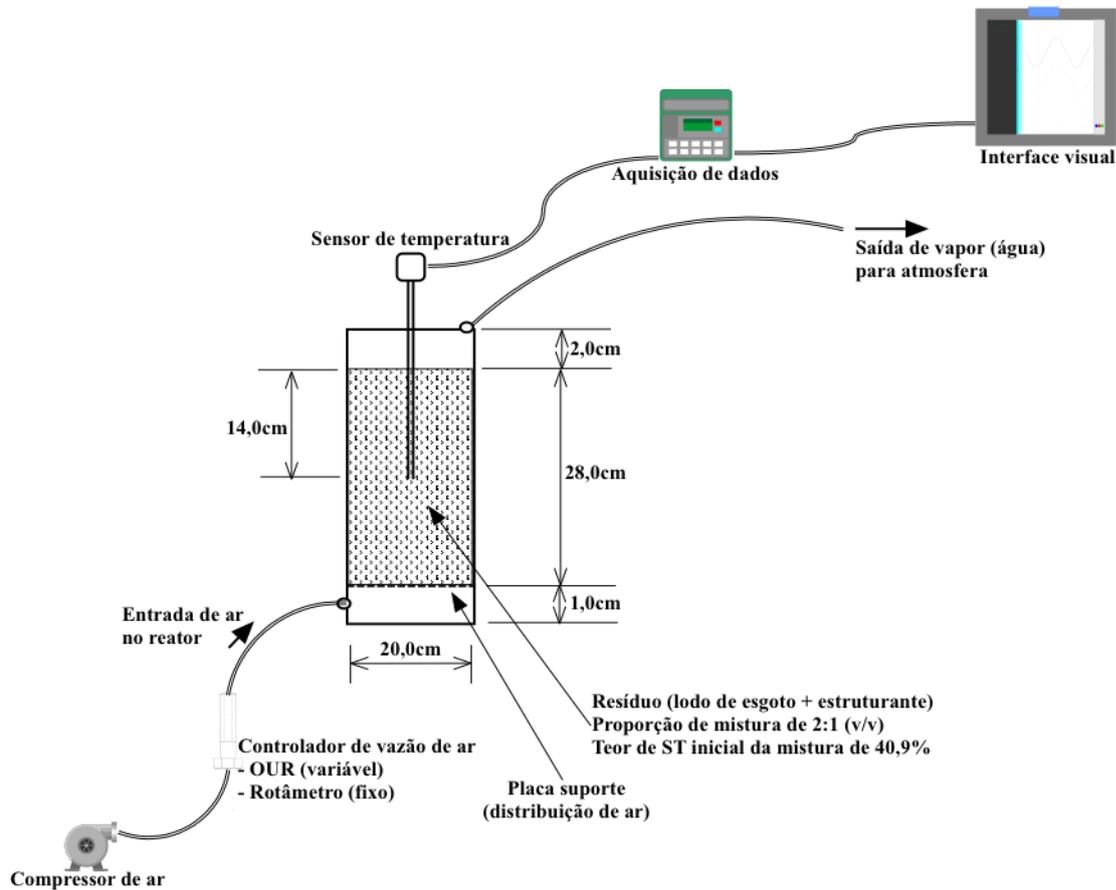


Figura 4.26 – Representação da configuração do experimento conduzido no exterior.

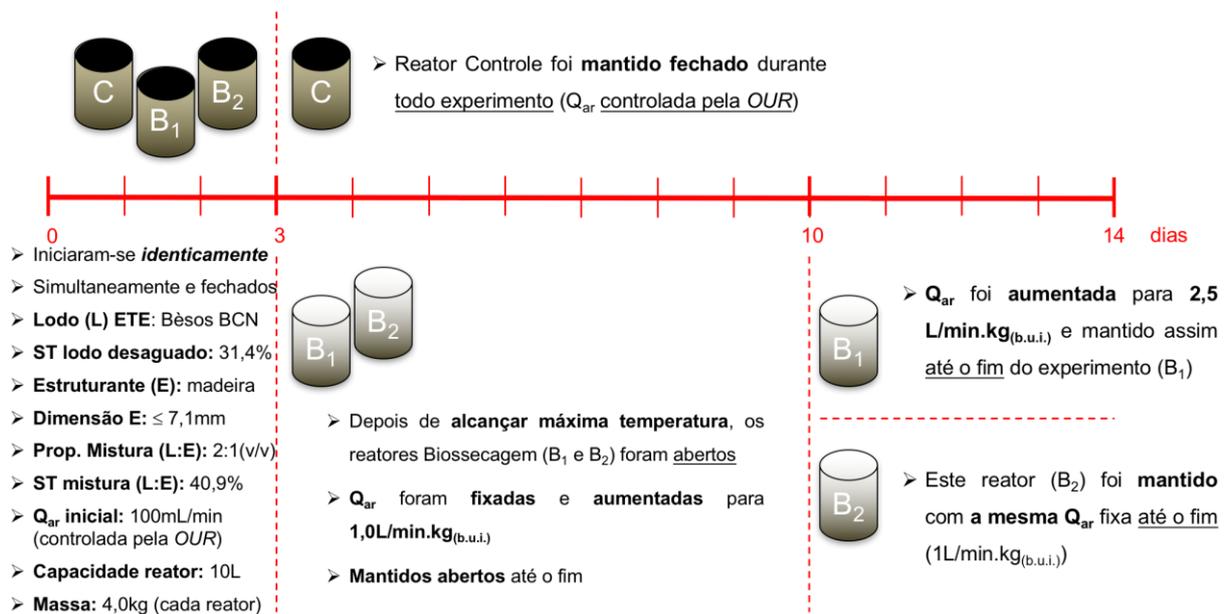


Figura 4.27 – Representação esquemática do experimento de biossecagem conduzido no exterior.

Notas de informação: C: Controle;  $B_1$ : Biossecagem I;  $B_2$ : Biossecagem II;  $Q_{ar}$ : vazão de ar; *OUR*: Oxygen Uptake Rate (Taxa de Consumo de Oxigênio); v/v: volume por volume; b.u.i.: base úmida inicial (*wet basis*)

Nos reatores de biossecagem foram monitorados sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e perda de massa acumulada ao longo do experimento, permitindo-se obter curva

representativa destes parâmetros. Antes e ao final dos experimentos, além destas duas análises (ST e SV), nos três reatores, foram realizadas também análises de Poder Calorífico Superior (PCS). A vazão de entrada de ar e a temperatura foram monitoradas a cada minuto, permitindo-se relacionar estas duas variáveis com as demais e controlar o experimento.

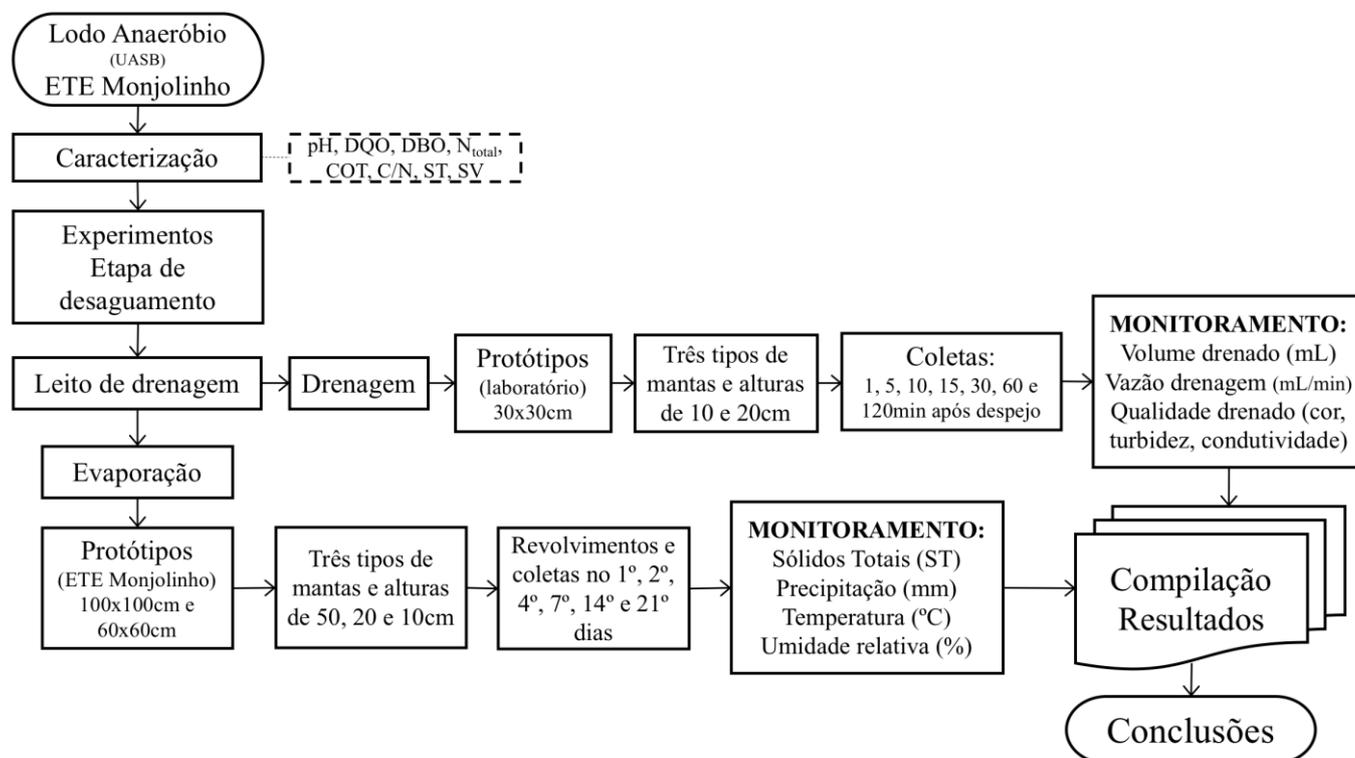
#### **4.2.2. Brasil**

Os métodos desenvolvidos no Brasil, como identificado na Figura 4.24, consistiram em estudos de desaguamento de lodo anaeróbico em leito de drenagem, e estudos de secagem de lodo anaeróbico em processo de biossecagem. É importante ressaltar que o lodo utilizado nos estudos referentes à etapa de secagem derivou do lodo desaguado em etapa de desaguamento em LD (anterior). Dessa forma, os métodos serão descritos separadamente (desaguamento e secagem) em itens subsequentes.

##### ***Desaguamento (leito de drenagem)***

Os métodos referentes à etapa de desaguamento utilizando Leito de Drenagem (LD) foram divididos em duas partes: drenagem e evaporação. Para estudo da drenagem foram utilizados três protótipos idênticos em escala laboratorial (Figura 4.13), com 30x30cm de área de topo. Para estudo da evaporação foram utilizados três protótipos em escala piloto (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12), alocados na ETE ao lado do reator UASB, sendo um com 100x100cm e dois com 60x60cm de área de topo. Tanto nos estudos de drenagem como de evaporação, variou-se a utilização de três tipos de mantas (HaTe<sup>®</sup> 55/55 UV, 80/80 UV, 105/105 DW), conforme ilustrado nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, bem como as alturas da camada de lodo aplicadas nos protótipos. Optou-se por realizar os estudos de drenagem e evaporação separadamente para obter maior controle da fase de drenagem em laboratório, permitindo alcançar valor mais acreditado para a vazão de drenagem de água de acordo com a manta e a altura da camada de lodo estudadas.

Para facilitar o entendimento dos estudos de drenagem e evaporação realizados em protótipos de LD, segue Figura 4.28 que representa resumidamente em diagrama os ensaios conduzidos.



**Figura 4.28** – Fluxograma representando os métodos adotados para ensaios da etapa de desaguamento.

Os estudos relativos à drenagem conduzidos em laboratório foram divididos de acordo com a manta geotêxtil utilizada, sendo ensaios “A” referentes às alturas de 10cm (equivalente a 9,61L de lodo bruto) e de 20cm (equivalente a 19,22L de lodo bruto) utilizando a manta HaTe® 55/55 UV, ensaios “B” nas mesmas alturas utilizando a manta HaTe® 80/80 UV, e “C” utilizando a manta HaTe® 105/105 DW. Assim, os ensaios para estudos de drenagem foram denominados A1, A2, B1, B2, C1 e C2, conforme resumidamente informado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** – Denominação e definição dos ensaios de desaguamento para os estudos de drenagem (escala laboratorial) em LD.

Parâmetros	Ensaio					
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Altura da camada de lodo (cm)	10	20	10	20	10	20
Volume de lodo aplicado (L)	9,61	19,22	9,61	19,22	9,61	19,22
Manta geotêxtil utilizada	HaTe® 55/55 UV		HaTe® 80/80 UV		HaTe® 105/105 DW	

Conforme Figura 4.28, durante a realização dos ensaios foi medido o volume acumulado do líquido drenado e coletadas amostras do líquido drenado em intervalos de 1min, 10min, 30min, 60min e 120min (finalização da drenagem). Foram analisadas cor aparente, turbidez e condutividade das amostras do líquido drenado coletadas na primeira hora (1min, 10min, 30min, 60min) com o objetivo de verificar a qualidade do drenado. Por fim, as amostras coletadas para análise dos parâmetros de qualidade foram utilizadas para o cálculo da vazão de drenagem (mL/min) ao longo do tempo através da Equação 4.1. O volume coletado das amostras foi cronometrado a fim de determinar a vazão em todos os instantes de coleta, ou seja, após 1min, 10min, 30min e 60min do início do ensaio.

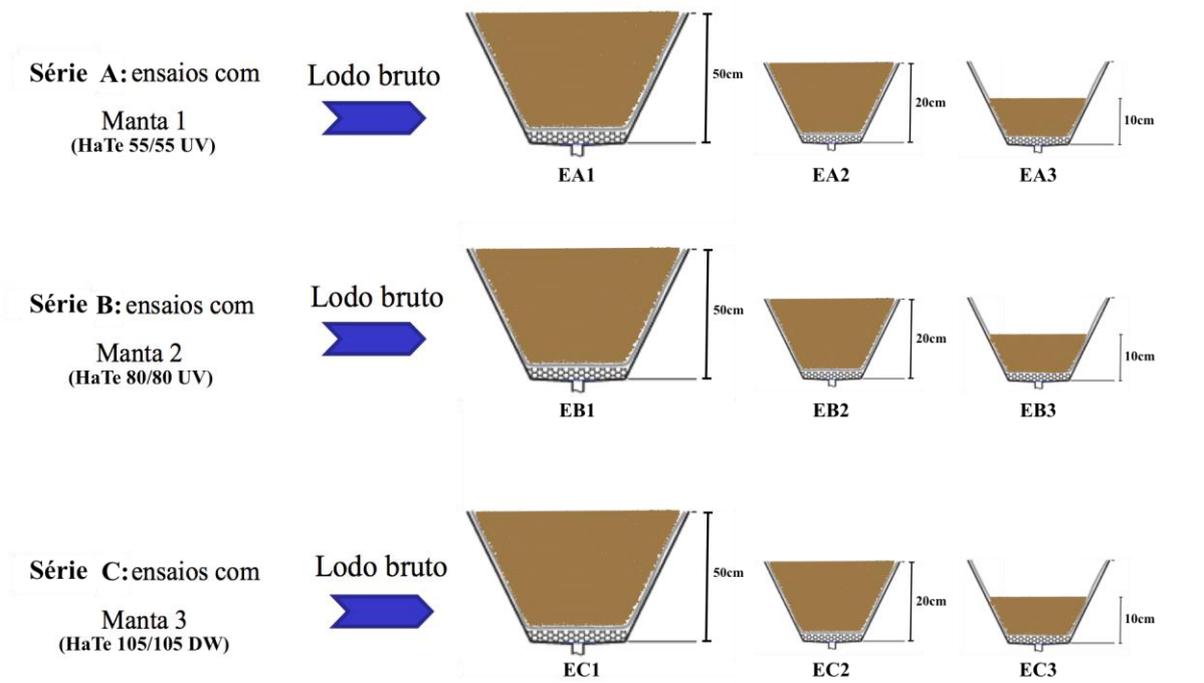
$$Q = V_d / t \text{ ..... Eq. 4.1}$$

sendo,  $Q$  a vazão representada em mL/min,  $V_d$  o volume de amostra drenado (mL), e  $t$  o tempo correspondente (min).

Em relação aos estudos de evaporação conduzidos nos protótipos em escala piloto alocados na ETE, conforme Figura 4.28, foram utilizados os três tipos de manta geotêxtil anteriormente mencionados e, portanto, os ensaios também foram divididos de acordo com a manta aplicada, sendo denominados EA1 (50cm de camada de lodo com volume de 260L), EA2 (20cm de camada de lodo com volume de 46L) e EA3 (10cm de camada de lodo com volume de 23L) quando se utilizou a manta HaTe<sup>®</sup> 55/55 UV, e, na mesma lógica, EB1, EB2 e EB3 quando se utilizou a manta HaTe<sup>®</sup> 80/80 UV, e EC1, EC2 e EC3 para a manta HaTe<sup>®</sup> 105/105 DW. A Tabela 4.2 e a Figura 4.29 sintetizam tais informações para facilitar o entendimento dos ensaios conduzidos.

**Tabela 4.2** – Denominação e definição dos ensaios de desaguamento para os estudos de evaporação (escala piloto) em LD.

Parâmetros	Ensaio								
	EA1	EA2	EA3	EB1	EB2	EB3	EC1	EC2	EC3
Altura da camada de lodo (cm)	50	20	10	50	20	10	50	20	10
Volume de lodo aplicado (L)	260	46	23	260	46	23	260	46	23
Manta geotêxtil utilizada	HaTe <sup>®</sup> 55/55 UV			HaTe <sup>®</sup> 80/80 UV			HaTe <sup>®</sup> 105/105 DW		



**Figura 4.29** – Representação dos ensaios conduzidos nos estudos de evaporação em leito de drenagem.

Cada série de ensaio teve um tempo de duração de 21 dias e, sempre que se iniciava uma série, os três protótipos (1, 2 e 3) eram ensaiados simultaneamente a fim de comparar a influência das variáveis climáticas (precipitação, temperatura e umidade relativa do ar). Estes dados climáticos foram obtidos por meio de acesso *online* a uma estação meteorológica de observação de superfície automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Antes do início de cada série, foram recolhidas amostras do lodo bruto para determinação do teor de sólidos totais (ST), fixos (SF) e voláteis (SV). Ao longo do ensaio de secagem foram recolhidas mais cinco amostras do lodo, no segundo (2º), quarto (4º), sétimo (7º), décimo quarto (14º) e vigésimo primeiro (21º) dias após o início de cada série de ensaio. Além disso, nestes mesmos dias foi realizado o revolvimento manual da camada de lodo, com o auxílio de um rastelo.

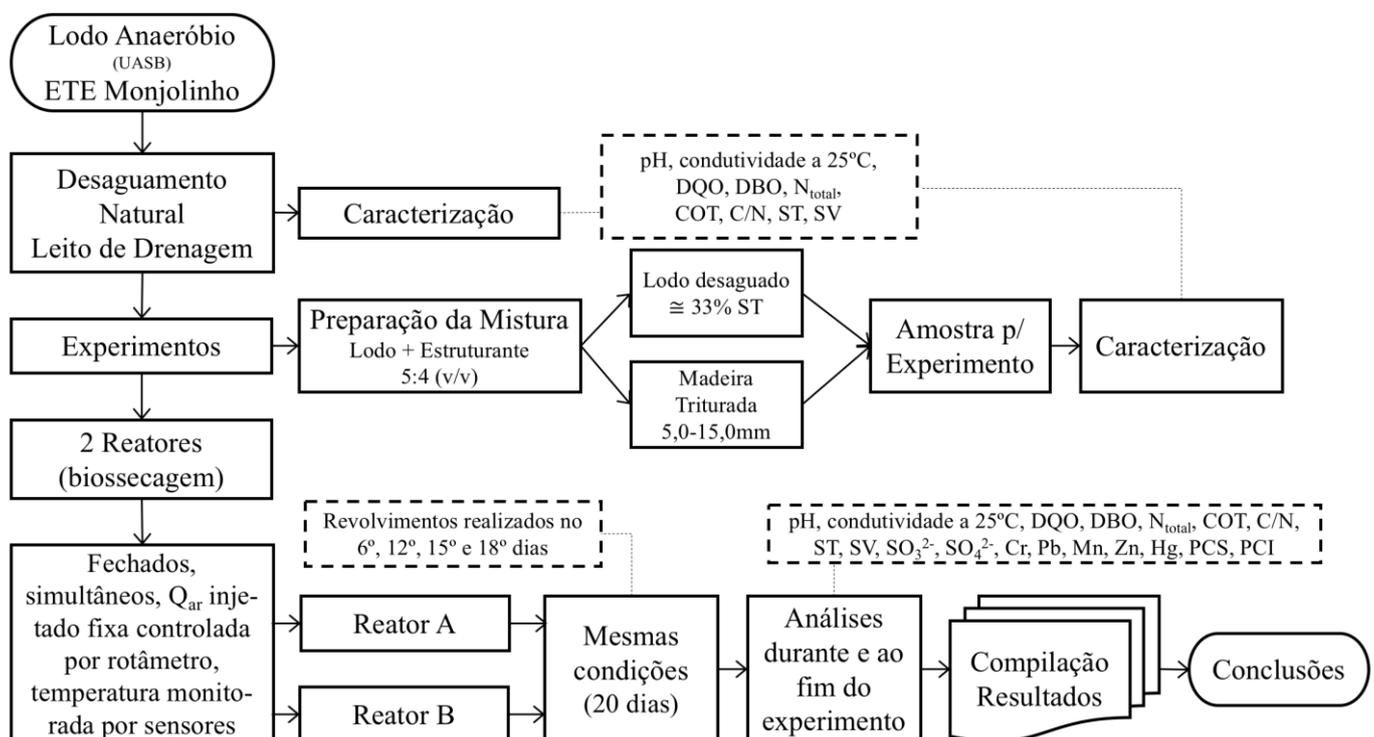
Após obtenção dos resultados do teor de ST do lodo bruto foi determinada a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) dos ensaios (estudos de drenagem e de evaporação), calculada conforme a Equação 4.2.

$$TAS = (V \times ST \times \rho) / A_f \dots\dots\dots \text{Eq. 4.2}$$

sendo,  $TAS$  a taxa de aplicação de sólidos em  $kg_{ST}/m^2$ ,  $V$  o volume de lodo aplicado (L),  $ST$  a concentração de sólidos totais do lodo (%),  $\rho$  a densidade do lodo bruto ( $1030kg/m^3$ , segundo Von Sperling (2005)), e  $A_f$  a área de fundo do protótipo de LD ( $m^2$ ).

### *Secagem (biossecagem)*

Uma vez realizado o desaguamento do lodo anaeróbio proveniente de reator UASB (em operação na ETE Monjolinho, na cidade de São Carlos-SP) em leito de drenagem, coletou-se este resíduo (com característica de torta de lodo) para utilização em procedimentos de biossecagem, realizados no laboratório de saneamento do Departamento de Engenharia Civil (DECiv), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A Figura 4.30 traz um fluxograma resumido dos métodos referentes à biossecagem do lodo.



**Figura 4.30** – Fluxograma representando os métodos adotados para os experimentos da etapa de secagem conduzidos no Brasil.

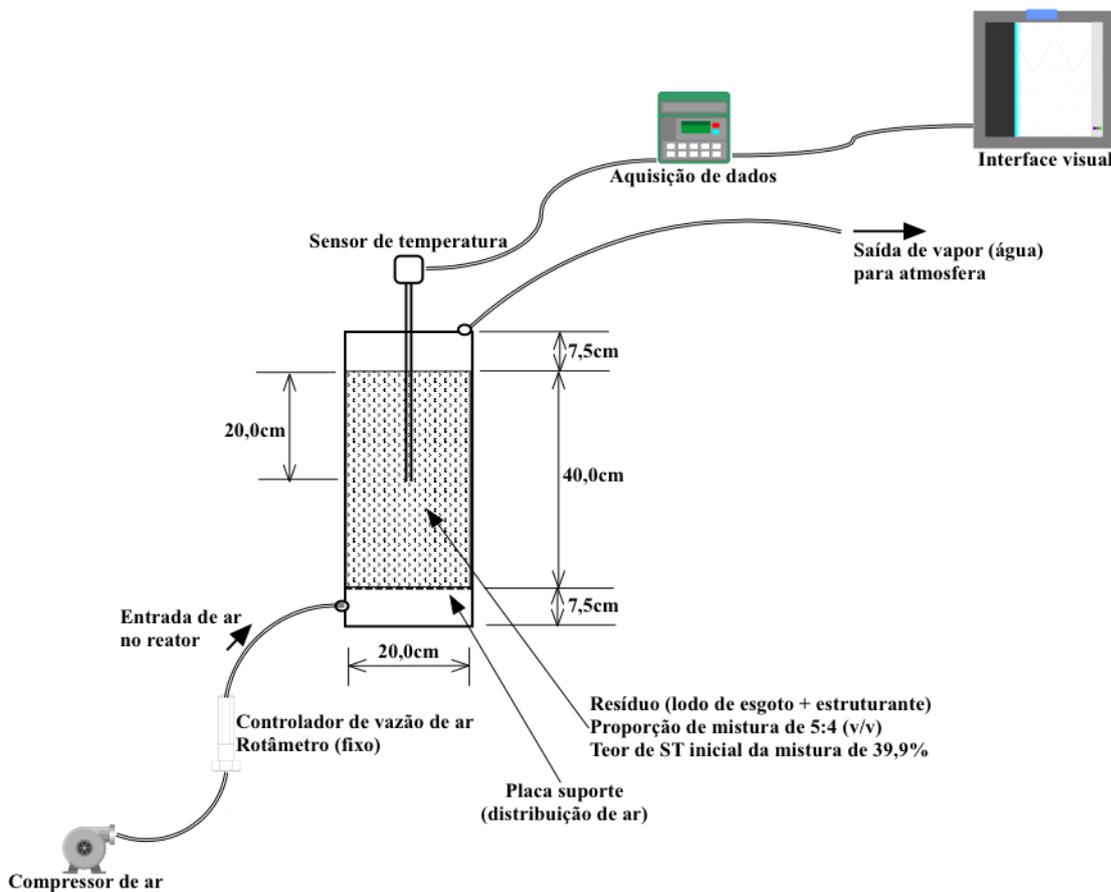
Os experimentos realizados para a etapa de secagem (biossecagem) duraram quase 20 dias (19,73 dias) e foram conduzidos em dois reatores com capacidade volumétrica de aproximadamente 17L (Figura 4.18). Como mencionado, o lodo foi previamente desaguado

em sistema natural de leito de drenagem, estando com teor de ST de 33% após um período de exposição total de 33 dias, com realização de revolvimentos na massa dentro do leito no 2º, 4º, 7º, 14º e 21º dias após o despejo de lodo anaeróbico bruto no leito (lodo desaguado no ensaio EC1 dos estudos de evaporação no leito de drenagem). Em um primeiro momento foi realizada caracterização do lodo desaguado por meio de obtenção de amostras. Na caracterização foram levantados dados de potencial hidrogeniônico (pH), condutividade a 25°C, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), nitrogênio total ( $N_{total}$ ), Carbono Orgânico Total (COT), sólidos totais (ST), e sólidos voláteis (SV).

Antes de se iniciar o experimento, foi realizada a preparação da mistura lodo:estruturante (L:E). O estruturante utilizado foi cavaco de madeira peneirado, com dimensão variável entre 5 e 15mm. A proporção de mistura L:E foi de 5:4 (v/v) (80% de estruturante em relação ao volume total de lodo), que correspondeu a 5,85:1 (m/m) (17% de estruturante em relação à massa total de lodo). Foram realizadas análises de caracterização da mistura (L:E) para os mesmos parâmetros da caracterização do lodo desaguado. O experimento se iniciou de maneira idêntica e simultânea nos dois reatores, um com massa total de 8,462kg (Reator A) e outro com 8,914kg (Reator B), sendo mantidos fechados durante todo experimento, com vazão de entrada de ar controlada por rotâmetros, e alterações mínimas da vazão de ar quando da realização dos revolvimentos, baseando-se em experiências relatadas na literatura consultada para proceder de maneira condizente. Os revolvimentos foram realizados no 6º, 12º, 15º e 18º dias, conforme proposto e sugerido por Cai, Gao e Hong (2015). Nos momentos de realização dos revolvimentos coletava-se amostras para análise do teor de ST, com objetivo de se obter curva de remoção de água da massa em processo de biossecagem. Ao final do experimento, além dos parâmetros analisados na caracterização do lodo desaguado e da mistura antes do processo, realizou-se também análises dos seguintes parâmetros para o produto biosseco: sulfito ( $SO_3^{2-}$ ), sulfato ( $SO_4^{2-}$ ),

chromo (Cr), chumbo (Pb), manganês (Mn), zinco (Zn), mercúrio (Hg), Poder Calorífico Superior (PCS), e análises elementares (Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio) para possibilitar o cálculo do valor do Poder Calorífico Inferior (PCI).

A Figura 4.31 traz representação da configuração do experimento de biossecagem (considerando-se apenas um reator) conduzido no laboratório de saneamento da UFSCar. Nota-se muita semelhança neste experimento e no representado na Figura 4.26, tendo como principais diferenças o controle da vazão de ar injetado, a capacidade volumétrica dos reatores, a proporção de mistura L:E, e a massa da amostra adicionada nos reatores.



**Figura 4.31** – Representação da configuração do experimento de biossecagem conduzido na UFSCar.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. EXTERIOR

Os resultados obtidos no período no exterior foram relativos às visitas realizadas e aos experimentos conduzidos na *UAB*, no laboratório do *GICOM*, conforme apresentados nos itens subsequentes.

#### 5.1.1. Relatórios de visitas

Como mencionado nos métodos desta pesquisa, foram realizadas duas visitas técnicas abordando três temáticas distintas referentes ao tratamento do lodo de ETE. As visitas ocorreram na ETE de Manresa, em Manresa, na Espanha (abordando digestão anaeróbia e compostagem), e na *GMB BioEnergie*, em Zutphen, na Holanda (abordando biossecagem). Seguem relatórios de visitas em tópicos subsequentes, iniciando-se pela ETE de Manresa.

#### *ETE de Manresa*

A visita à ETE de Manresa ocorreu no dia 5 de dezembro de 2014, sendo guiada por responsável pelo sistema de tratamento, e abordando o tratamento da fase líquida e da fase sólida. A Figura 5.1 traz um esquema representativo numerado, dividido em três linhas de tratamento (esgoto, lodo e biogás) de acordo com as cores azul, marrom e amarelo, que permite melhor entendimento inicial do sistema geral, conforme detalhado a seguir.



**Figura 5.1** – Esquema geral da estação de tratamento de esgotos de Manresa, Espanha.

Fonte: Aigües de Manresa S.A. (2014).

As três linhas de tratamento dos esgotos na ETE de Manresa são:

- Linha de tratamento de esgoto com pré-tratamento, decantação primária, processo biológico e decantador secundário;
- Linha de tratamento de lodos com adensamento, digestão, desaguamento e compostagem;
- Linha de tratamento do biogás gerado no biodigestor e no tratamento biológico, e cogeração.

Em sequência encontram-se descrições correspondentes a cada número que consta na Figura 5.1, apresentados de acordo com a linha de tratamento.

### **Linha de Tratamento do esgoto**

#### 1. Coletor e câmara de entrada de esgoto

O esgoto de Manresa chega à ETE *St. Joan de Vilatorrada, Callús i Canet de Fals*, quando se inicia o tratamento, cuja tipologia é conhecida como lodos ativados.

#### 2. Gradeamento

O esgoto passa pelas grelhas, onde são retidos objetos de maior dimensão. Estas grelhas possuem um mecanismo automático de limpeza que destinam os objetos retidos para uma esteira, direcionando para um contêiner. O destino do resíduo deste contêiner, depois de cheio, é um aterro sanitário.

#### 3. Separação de areias e gorduras

Existem dois canais de ar injetado sob pressão. As bolhas transportam a gordura para a camada superficial e são posteriormente removidas e destinadas a um contêiner. No mesmo local, a areia é sedimentada para o fundo, é aspirada e destinada também para um contêiner.

#### 4. Decantação primária

Em dois grandes tanques circulares ocorre a separação de materiais em suspensão por meios físicos. O esgoto adentra os tanques pelo centro e move-se lentamente em direção às extremidades. O lodo em suspensão vai para o fundo dos tanques, de onde é removido. Este é

o chamado lodo primário. O esgoto após a decantação primária já se encontra visualmente mais limpo, porém ainda carrega matéria orgânica dissolvida.

### 5. Tratamento biológico

Ocorre em dois tipos de tanques: (i) reatores anóxicos, onde as bactérias removem os compostos nitrogenados (azotos) convertendo-os em nitrogênio gasoso, que é liberado no ar; (ii) reatores aeróbios para degradação da matéria orgânica dissolvida por meio de microrganismos que necessitam de oxigênio, que é injetado por difusores de ar. Quando ocorre a saída do esgoto dos tanques, ao invés de matéria orgânica dissolvida, existem microrganismos agrupados.

### 6. Decantação secundária

No decantador secundário é realizada nova decantação, os grupos de microrganismos vão para o fundo do decantador e são removidos. Este é o chamado lodo secundário. O esgoto tratado segue pelas extremidades/bordas do tanque.

### 7. Lançamento de esgoto tratado no rio

O esgoto tratado é lançado ao rio.

## **Linha de Tratamento do lodo**

### 8. Lodo biológico

O lodo retirado dos decantadores é muito fluido. Parte do lodo dos decantadores secundários retorna para o início do tratamento biológico para permitir a manutenção de determinada concentração de microrganismos (lodos ativados).

### 9. Adensamento

A parte do lodo biológico que não é reaproveitada no tratamento é direcionada aos adensadores para remoção de parte da água presente, deixando-o mais denso. O sistema de adensamento de lodo primário é composto pelos decantadores primários, e o lodo mais adensado é recolhido da parte inferior. Já o sistema de adensamento do lodo secundário ocorre

com o auxílio de microbolhas de ar, flotando-o até a superfície. Os dois tipos de lodo são misturados no misturador.

### 10. Digestores

Em grandes reatores em condições anaeróbias, as bactérias presentes produzem a digestão anaeróbia do lodo, e neste processo é gerado biogás (Figura 5.2).



**Figura 5.2** – Digestor anaeróbio da ETE de Manresa.

### 13. Desaguamento do lodo

O desaguamento do lodo digerido ocorre por meio de filtro prensa de correia (compressão entre duas camadas de tecido que permite a saída de água, mas retém os sólidos/lodo), deixando-o com consistência mais pastosa, com característica de torta de lodo (Figuras 5.3, 5.4 e 5.5).

### 14. Galpão de armazenamento

O lodo desaguado é armazenado em um galpão, de onde é enviado para a unidade de compostagem situada na própria área em que se localiza a ETE.

### 15. Compostagem

O lodo desaguado é compostado (fase de decomposição) por cerca de 15 dias para a obtenção de fertilizantes para agricultura e jardinagem.



**Figura 5.3** – Vista lateral de um dos filtros prensa de correia da ETE de Manresa.



**Figura 5.4** – Lodo afluyente ao filtro prensa de correia.



**Figura 5.5** – Lodo efluente ao filtro prensa de correia.

## 16. Tratamento do ar da unidade de compostagem

O ar da unidade de compostagem é submetido a um biofiltro para evitar odores.

### **Linha de Tratamento do biogás**

#### 11. Biogás

O biogás produzido é armazenado em tanques e é utilizado na própria estação (Figura 5.6). Através de um processo de cogeração se obtém energia elétrica que se utiliza na própria estação e energia térmica para aquecer os reatores de digestão anaeróbia.



**Figura 5.6** – Dois dos três tanques de armazenamento de biogás, ao lado do digestor anaeróbio.

#### 12. Tratamento biológico do biogás

O biogás produzido nos biodigestores, antes de ser direcionado para os motores de cogeração, é submetido a tratamento biológico que remove sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), presente em pequenas proporções.

Além destas informações gerais para compreensão do sistema de tratamento da ETE Manresa, outras informações mais específicas foram obtidas, principalmente no que se refere ao tratamento do lodo.

A ETE em questão foi implantada em 1985 e tem capacidade para tratar até  $53.000m^3$  de esgoto por ano, mas desde 2009 tem trabalhado com um pouco mais da metade da sua capacidade, devido a redirecionamento de parte da contribuição de esgotos a outra unidade.

Sua produção total anual de lodo atualmente é de aproximadamente 8.000 toneladas por ano, e até 2009 era de aproximadamente 10.000ton/ano.

Em relação à digestão anaeróbia do lodo, o interesse por estes dados se deu por se tratar de etapa de tratamento da fase sólida e devido ao fato de ser produzido biogás passível de ser aproveitado para geração de energia elétrica e térmica. O processo de digestão anaeróbia na ETE em questão não possui um pré-tratamento, ocorrendo apenas o adensamento prévio do lodo antes de ser adicionado aos digestores. Trata-se de um processo convencional de uma única fase, com utilização de digestores cobertos fixos. O tempo de detenção hidráulica nos digestores é de aproximadamente 40 dias e é utilizado sistema de mistura natural (do tipo lanças ou *lanzas*). Após a digestão, o material efluente é direcionado ao sistema de desaguamento (filtros prensa de correia), conforme mencionado anteriormente. Em relação à quantidade de biogás produzida no processo, estima-se que seja produzido 2.300m<sup>3</sup>/dia. O biogás produzido possui cerca de 60 a 62% de metano (CH<sub>4</sub>) em sua composição, é submetido a sistema de tratamento biológico para eliminação de H<sub>2</sub>S (presente em pequenas proporções), e é armazenado em três tanques existentes (Figura 5.6).

Como síntese dos dados referentes à digestão anaeróbia, considerou-se a Tabela 5.1 a seguir, compilada a partir de dados fornecidos por responsável pela estação, que relaciona a quantidade de biomassa/lodo adicionado aos digestores com a quantidade de biogás gerado, no ano de 2014.

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 5.1, é possível afirmar que a cada 1m<sup>3</sup> de lodo adicionado ao processo de digestão anaeróbia, gera-se aproximadamente 16,74kW.h de energia elétrica, o que, segundo a engenheira responsável pela estação, corresponde a aproximadamente 30% do consumo total de todos os processos envolvidos na ETE de Manresa. De acordo com ela, o montante energético produzido na ETE é introduzido controladamente na rede elétrica e a quantidade introduzida é descontada nas contas de energia da estação, correspondendo ao valor percentual supramencionado.

**Tabela 5.1** – Dados de digestão anaeróbia e geração de energia do ano de 2014, da ETE Manresa, na Espanha.

Mês	Volume total de lodo adicionado aos reatores (m <sup>3</sup> )	Gás			Motor		
		Produção total (Nm <sup>3</sup> )	Para motor (Nm <sup>3</sup> )	Para queima (Nm <sup>3</sup> )	Energia gerada (kW.h)	Tempo de funcionamento (h)	Metano na composição (% CH <sub>4</sub> )
Jan	6152	68.653	46.172	20.225	60.890	601	-
Fev	6482	54.014	41.844	11.963	57.340	523	-
Mar	7341	85.474	69.491	17.269	104.780	730	-
Abr	6808	69.623	59.768	11.131	84.960	695	-
Mai	5912	81.890	89.710	3	138.100	742	58,9
Jun	4211	69.254	71.464	496	104.500	699	57,6
Jul	4701	71.297	77.623	13	109.850	734	59
Ago	3253	56.129	60.985	12	75.970	737	58
Set	3195	50.035	52.421	693	65.380	660	59,8
Out	4367	71.904	58.906	8.134	83.740	1.514	60,5
Nov	4323	62.024	49.502	9.869	64.270	598	60,6

Em relação ao processo de compostagem realizado na ETE em referência, observou-se que se trata de um sistema de compostagem com leiras aeradas utilizando revolvimento periódico da massa. O material estruturante adotado é madeira triturada, que segundo informações de responsável da ETE, se trata de madeira de reciclagem, o que permitiu diminuição nos custos de aquisição da madeira, viabilizando ainda mais o sistema. A proporção de mistura aproximada aplicada, no que se refere a lodo:estruturante, é de 2:1 (v/v), correspondendo a 5:3 (m/m). O processo de compostagem é dividido em período de decomposição e de maturação. Para a ETE de Manresa, o tempo de decomposição é de aproximadamente 15 dias e o de maturação varia de 45 a 60 dias. O processo de compostagem ocorre em canais aerados com revolvimento, cujas dimensões são de 2x60x2m (largura/comprimento/profundidade). A Figura 5.7 ilustra os canais, bem como o sistema automatizado de revolvimento. A aeração é realizada em quatro zonas (15m cada) com distintas vazões de aeração, iniciando-se com vazão maior (zona 1) e finalizando com menor vazão (zona 4). As vazões de aeração médias utilizadas no ano de 2014 foram de 1.041, 389, 76, e 57m<sup>3</sup>/h (ou seja, 17.350, 6.483, 1.267, e 950L/min), para as zonas 1, 2, 3, e 4,

respectivamente. No ano de 2014 foram compostados 1.029 toneladas de lodo desaguado, o que correspondeu a média de 85,8 toneladas de lodo compostado por mês. Para tanto, consumiu-se 81.311kW.h de energia elétrica no ano, correspondendo a 6.783kW.h por mês. Segundo responsável pelo sistema, o processo de compostagem tem operado com apenas 10% da capacidade desde 2011, devido à diminuição da procura pelo composto. Quando operando em 100% da capacidade (por exemplo, no ano de 2011), compostou-se 7.264,78 toneladas de lodo desaguado (605,4 toneladas por mês), com consumo energético de 510.037kW.h no ano ou 42.503,1kW.h por mês.



**Figura 5.7** – Canais de aeração e revolvimento das leiras de compostagem.

No início do processo de compostagem, o teor de ST da mistura (lodo + estruturante) varia entre 35 e 40% e, ao final do período de decomposição (15 dias), este teor de ST alcança até 60%, correspondendo a uma redução volumétrica da massa de aproximadamente 25% e, se considerada a redução apenas do lodo (desconsiderando o material estruturante), chega a até 60%. Ao final do processo o composto é mantido em um galpão de armazenamento (Figuras 5.8 e 5.9) e seu custo médio de venda é de aproximadamente 12 euros por tonelada.



**Figura 5.8** – Galpão de armazenamento do composto produzido.



**Figura 5.9** – Vista aproximada do composto produzido na ETE de Manresa.

Como síntese dos dados referentes ao processo de compostagem no que se refere às características do composto, considerou-se a Tabela 5.2 a seguir, compilada a partir de dados fornecidos por responsável pelo sistema, a qual apresenta vários parâmetros de interesse, com referência ao ano de 2014.

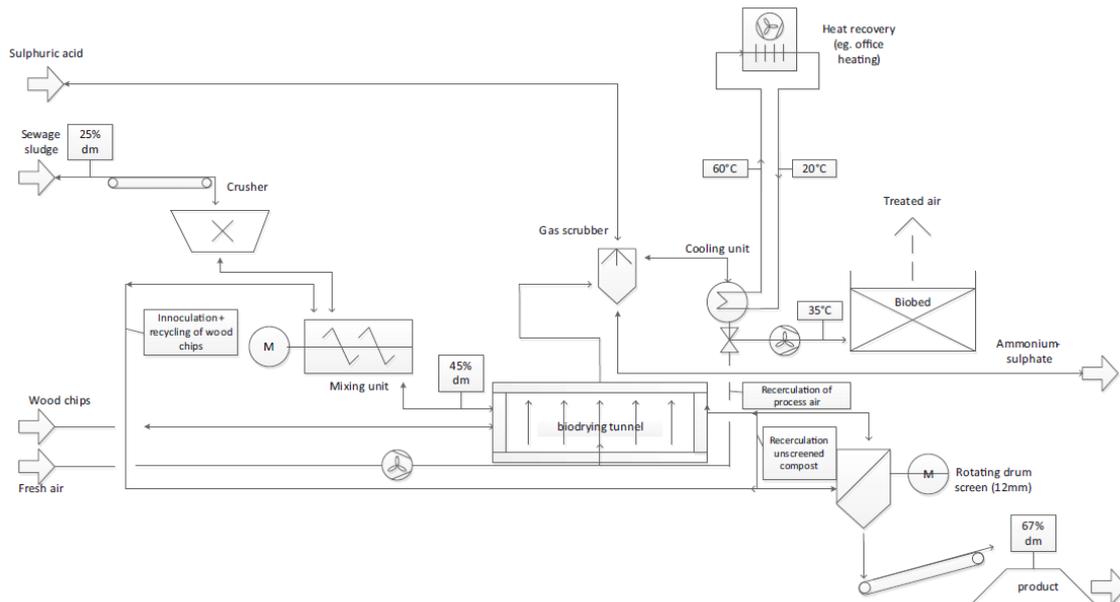
**Tabela 5.2** – Característica do composto gerado no processo de compostagem no ano de 2014, na ETE Manresa, na Espanha.

Parâmetro (unidade)	Ano de 2014												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Média	
%	ST	56,7	54,8	53,3	62,0	64,7	73,0	63,4	82,7	58,5	75,2	63,5	64,3
	SV	50,7	54,7	54,6	52,6	56,0	50,8	54,5	44,4	54,9	51,2	45,8	51,8
	N kjeldhal	-	-	-	-	-	2,6	-	-	-	-	-	2,6
	N amoniacal	-	-	-	-	-	1,0	-	-	-	-	-	1,0
mg/kg <sub>ST</sub>	<b>P total</b>	-	-	-	-	-	20774,0	-	-	-	-	-	20774,0
	<b>Ca</b>	-	-	-	-	-	55815,0	-	-	-	-	-	55815,0
	<b>Mg</b>	-	-	-	-	-	28358,0	-	-	-	-	-	28358,0
	<b>Cd</b>	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	<b>Cr</b>	29,0	26,0	26,0	23,0	20,0	18,0	21,0	17,0	21,0	23,0	16,0	21,8
	<b>Cu</b>	282,0	196,0	240,0	230,0	280,0	281,0	310,0	315,0	365,0	215,0	265,0	270,8
	<b>Fe</b>	-	-	-	-	-	5903,0	-	-	-	-	-	5903,0
	<b>Ni</b>	75,0	68,0	73,0	82,0	71,0	95,0	68,0	66,0	75,0	77,0	49,0	72,6
	<b>Pb</b>	52,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	46,0	35,0	35,0	38,0	35,0	37,8
	<b>Zn</b>	674,0	554,0	593,0	716,0	555,0	638,0	678,0	492,0	768,0	787,0	571,0	638,7
	<b>K</b>	-	-	-	-	-	3417,0	-	-	-	-	-	3417,0
	<b>Hg</b>	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1

### *GMB BioEnergie*

A visita à estação de tratamento de lodo por processo de biossecagem, localizada na cidade de Zutphen, na Holanda, ocorreu no dia 21 de janeiro de 2015, sendo guiada pelo gerente de projeto da empresa (*GMB BioEnergie*), Eng. Marc Bennenbroek, abordando todas as etapas do tratamento. A Figura 5.10 traz um esquema representativo do processo de biossecagem do lodo realizado na estação.

A estação de tratamento em referência consiste em uma estação com capacidade anual de tratamento de 150 ktoneladas de lodo (peso úmido), que após processo de biossecagem de 24 dias, dividido em dois estágios (em série) com características muito semelhantes, converte o lodo desaguado (aproximadamente 20% de ST) em material com teor de ST aproximado de 67%, sendo este destinado a estações de incineração para geração de energia.



**Figura 5.10** – Esquema representativo do processo de biossecagem da estação de Zutphen (Holanda) incluindo: tratamento mecânico do lodo, reatores de biossecagem, troca de calor para recuperação/reaproveitamento de calor e lavador de gases para recuperação de nitrogênio, bem como filtro/leito biológico para controle de odor.

**Notas de tradução:** *Sulphuric acid*: ácido sulfúrico; *Sewage sludge*: lodo de esgoto; *Wood chips*: madeira triturada; *Fresh air*: ar fresco; *Innoculation + recycling of wood chips*: inoculação + reciclagem de madeira triturada; *Crusher*: triturador; *Mixing unit*: unidade de mistura; *Biodyring tunnel*: reator de biossecagem; *Gas scrubber*: exaustor de gás; *Cooling unit*: unidade de resfriamento; *Recerculation of process air*: recirculação de ar processado; *Recerculation unscreened compost*: recirculação de material que não ultrapassou a peneira; *Heat recovery (eg. office heating)*: aproveitamento de calor (ex. aquecimento de escritórios); *Biobed*: leito biológico; *Treated air*: ar tratado; *Ammonium sulphate*: sulfato de amônia; *Rotating drum screen (12mm)*: peneira rotativa de tambor (12mm); *Product*: produto; *dm (dry matter)*: matéria seca ou sólidos totais; *M (mixing)*: representa unidade de mistura.

Fonte: Winkler *et al.* (2013).

A estação de tratamento recebe lodo de diversas origens e estações de tratamento de esgotos e, antes de ser submetido ao processo de biossecagem, o lodo é desaguado em centrífuga, alcançando até 25% de ST (Figuras 5.11 e 5.12). Antes de ser direcionado aos reatores, é adicionado material estruturante (madeira triturada) ao lodo desaguado, correspondendo aproximadamente a 5% da massa total de lodo, ou seja, em proporção de 20:1 (m/m), no que se refere a lodo:estruturante (Figura 5.13). Além da madeira triturada, acrescenta-se também à mistura lodo biosseco (submetido a processo de biossecagem anterior) que não ultrapassou a peneira rotativa de 12mm de abertura (Figura 5.14). Uma vez obtida a mistura, esta é direcionada aos reatores semi-herméticos (total de 25 reatores existentes na estação de tratamento, com dimensões aproximadas de 5x25x5m, sendo largura/comprimento/altura). As Figuras 5.15 e 5.16 ilustram o interior de um dos reatores em

processo de enchimento e de remoção da massa, respectivamente. Quando adicionada aos reatores a mistura se encontra com teor de ST aproximado de 45%, e é processada em dois estágios em série, sendo uma de 10 e outra de 14 dias de duração, totalizando 24 dias de processo. Dentro dos reatores a massa (lodo + estruturantes) recebe vazão de ar específica com entrada na parte inferior e saída na parte superior do reator. Segundo Marc Bennenbroek, a vazão de ar injetado é monitorada e controlada em função da temperatura do ar de saída do reator. Em linhas gerais, e baseando-se em dados de outra estação da *GMB BioEnergie* instalada em Tiel, também na Holanda, utiliza-se 48.000m<sup>3</sup>/h de ar fresco, tratando 80.000ton de lodo úmido por ano, ou seja, 9,13ton/h. Assim, em média, no que se refere à vazão de ar injetado, utiliza-se aproximadamente 5.300m<sup>3</sup>/h.ton<sub>(b.u.)</sub>, que corresponde a 87,62L/min.kg<sub>(b.u.)</sub>. No entanto, por se tratar de números baseados em dados em escala real, e calculados por estimativa, tais valores não são passíveis de serem aplicados em experimentos de escala laboratorial. O ar quente derivado da atividade biológica no interior do reator é recirculado/reaproveitado em outro(s) reator(es), o que favorece a remoção de água do lodo, uma vez que o ar de entrada já se encontra aquecido. Parte deste ar quente também é aproveitado para aquecimento dos escritórios da empresa em sistemas específicos para tal finalidade.



**Figura 5.11** – Centrífuga utilizada para desaguar o lodo afluyente ao processo de biossecagem.



**Figura 5.12** – Aspecto do lodo desaguado em centrífuga.



**Figura 5.13** – Material estruturante (madeira triturada) utilizado na mistura.



**Figura 5.14** – Material (lodo "biosseco") retido na peneira de 12mm utilizado em nova mistura, retornando ao início do processo.



**Figura 5.15** – Interior de um reator de biossecagem com preenchimento parcial de mistura lodo:estruturantes.



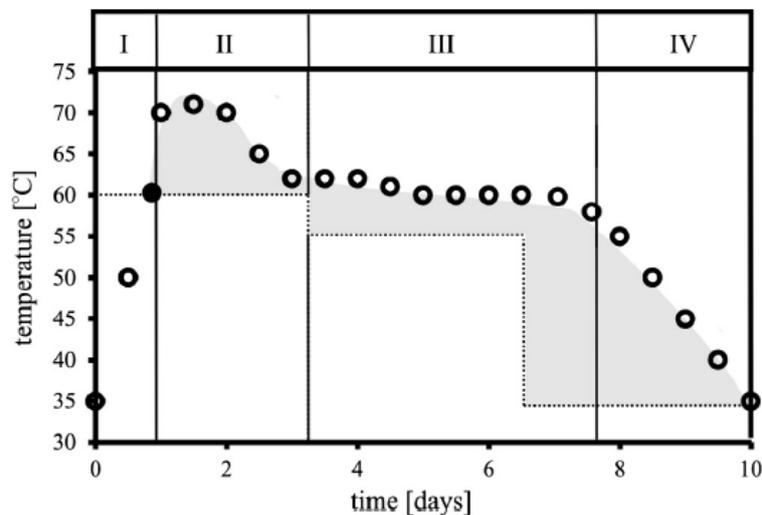
**Figura 5.16** – Interior de um reator após aberto, em processo de remoção da massa para submeter à peneira rotativa.

O ar de saída dos reatores é também submetido a tratamento em leito biológico, com o objetivo principal de tratamento dos compostos nitrogenados e de odor (Figura 5.17).



**Figura 5.17** – Leito biológico utilizado para tratamento do ar de saída dos reatores.

Os dois estágios do processo mencionados (primeiro de 10 e, segundo, de 14 dias) possuem basicamente 4 (quatro) zonas de temperatura, como ilustrado no gráfico a seguir (Figura 5.18).



**Figura 5.18** – Curva de temperatura ao longo do processo de biossecagem, destacando as quatro zonas ao longo da variação deste parâmetro.

Notas de tradução: *temperature*: temperatura; *time*: tempo; *days*: dias.

*Fonte:* Winkler *et al.* (2013).

A Figura 5.18 ilustra as quatro zonas de temperatura do processo de biossecagem: **(I)** aquecimento do lodo por 10 a 15h até 70°C; **(II)** sanitização do lodo por 2 dias a 65-70°C; **(III)** secagem do lodo por 5 dias; e **(IV)** resfriamento do ar processado até 35°C. A linha com

circulos (o) representa a temperatura do ar de saída do reator. A linha pontilhada representa a temperatura do ar injetado, que pode ser resumida em 3 fases: (1) aquecimento do reator com ar processado já aquecido (60°C) de um reator já ativo; (2) controle de ar injetado a 55°C proveniente de um reator vizinho (em zona II ou III); e (3) resfriamento com ar fresco/natural. Depois de 1 dia o  $\Delta T$  entre o ar injetado aquecido e o biologicamente produzido se torna positivo e a água pode se evaporar (área cinza do gráfico), o que permite ser removida do sistema, tendo como resultado um lodo com maior teor de ST.

Como etapa final do processo, o material que ultrapassa a peneira rotativa de tambor de 12mm após os 24 dias de processo, é considerado como lodo biosseco, e apresenta o aspecto ilustrado nas Figuras 5.19 e 5.20.



**Figura 5.19** – Lodo biosseco, chamado biogranulado, após o processo completo de biossecagem.



**Figura 5.20** – Apecto do lodo afluyente (lodo “bruto”, à esquerda) e efluente (lodo biosseco ou biogranulado, à direita) ao processo de biossecagem.

Segundo Marc Bennenbroek, devido aos aspectos extremamente restritivos no que se refere ao aproveitamento do lodo biosseco em aplicações no solo, esta alternativa não é adotada pela empresa, nem mesmo nas estações existentes na Bélgica e na Alemanha. Logo, todo lodo biosseco produzido pela *GMB BioEnergie*, nomeado pela empresa como biogranulado, é incinerado em estações de geração de energia ou em estações de incineração de resíduos. Por receber tal destinação, a estabilidade final do lodo biosseco não é mensurada, uma vez que, para que seja incinerado, segundo Marc, não se necessita da análise deste parâmetro.

### **5.1.2. Experimentos conduzidos**

Em resumo, os resultados obtidos se trataram de resultados da caracterização do lodo da ETE Bèsos (lodo misturado/aeróbio) desaguado em centrífuga e resultados referentes ao experimento de biossecagem, no que se refere aos parâmetros de entrada da massa/mistura (lodo + estruturante), monitoramento de parâmetros ao longo do experimento e parâmetros de saída (lodo biosseco).

Os resultados da caracterização do lodo desaguado em centrífuga encontram-se apresentados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** – Resultados das análises de caracterização do lodo desaguado em centrífuga, proveniente de tratamento anaeróbio/anóxico/aeróbio, da ETE Bèsos, Barcelona, Espanha.

Parâmetro	Unidades	Resultado	Método
pH	unid. pH	6,1	PNT LAB 04*
Condutividade a 25°C	µs/cm	3160	PNT LAB 5*
N amoniacal	%	0,65	PNT LAB 30*
N total kjeldahl	%	4,2	PNT LAB 77*
Relação C/N	adimensional	9,6	PNT LAB 35*
P	mg/kg	7210	PNT LAB 07*
K	mg/kg	1180	PNT LAB 07*
Fe	mg/kg	5750	PNT LAB 07*
Ca	mg/kg	14000	PNT LAB 07*
Mg	mg/kg	2240	PNT LAB 07*
Hg	mg/kg	1,4	PNT LAB 07*
Cd	mg/kg	0,56	PNT LAB RES 09*
Cu	mg/kg	167	PNT LAB RES 09*
Cr	mg/kg	28	PNT LAB RES 09*
Ni	mg/kg	14	PNT LAB RES 09*
Pb	mg/kg	34	PNT LAB RES 09*
Zn	mg/kg	459	PNT LAB RES 09*
ST	%	31,4	2540 G**
SV	%	85,2	2540 E**

\*Procedimento interno do laboratório (Tecno Ambiente, S.L.). Norma de referência: UNE-EN ISO/IEC 17025: 2005, UNE-CEN/TS 15675 EX:2009.

\*\*APHA, AWWA, WEF (2012).

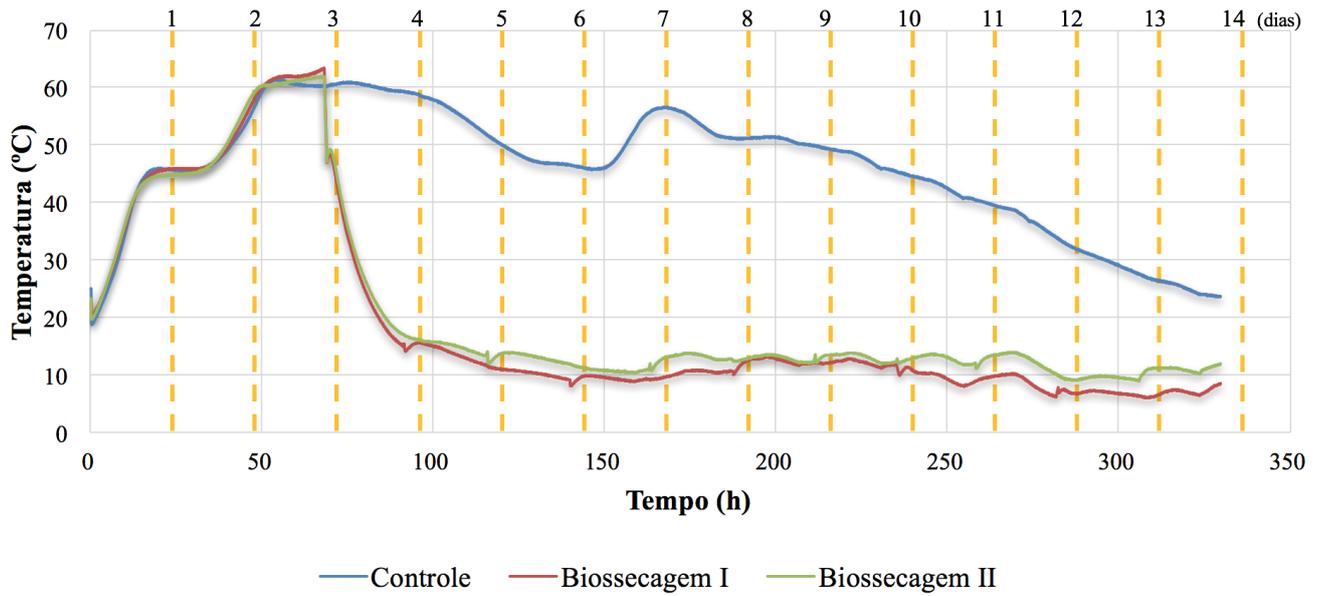
Os resultados referentes aos parâmetros iniciais (antes do início do experimento) da mistura 2:1(v/v), sendo lodo:estruturante, estão apresentados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4** – Resultados das análises de ST e SV da mistura 2:1(v/v), sendo lodo:estruturante, antes de iniciar os experimentos simultaneamente nos três reatores.

Parâmetro	Unidades	Resultados	Método
ST	%	40,9	2540 B*
SV	%	88,8	2540 E*

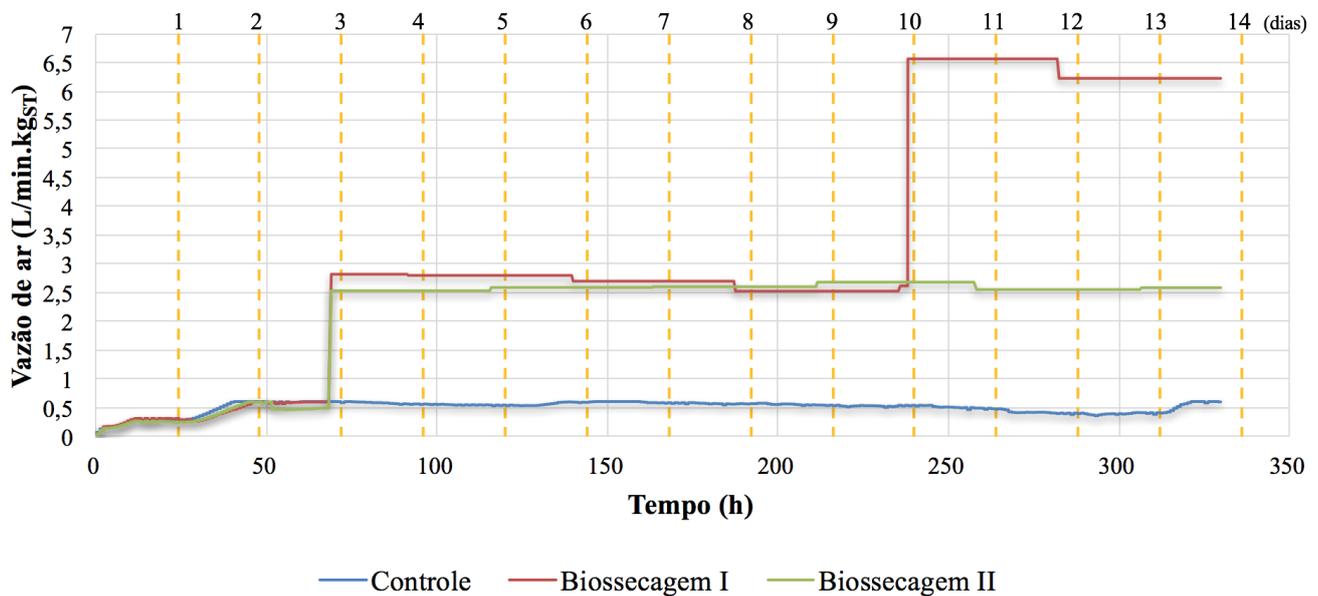
\*APHA, AWWA, WEF (2012).

Os resultados obtidos ao longo do experimento estão apresentados em forma de gráficos nas figuras a seguir para facilitar o entendimento. As Figuras 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 relacionam o tempo do experimento com o monitoramento dos seguintes parâmetros, respectivamente: temperatura, vazão de ar injetado, perda de massa acumulada, teor de ST, e teor de SV.



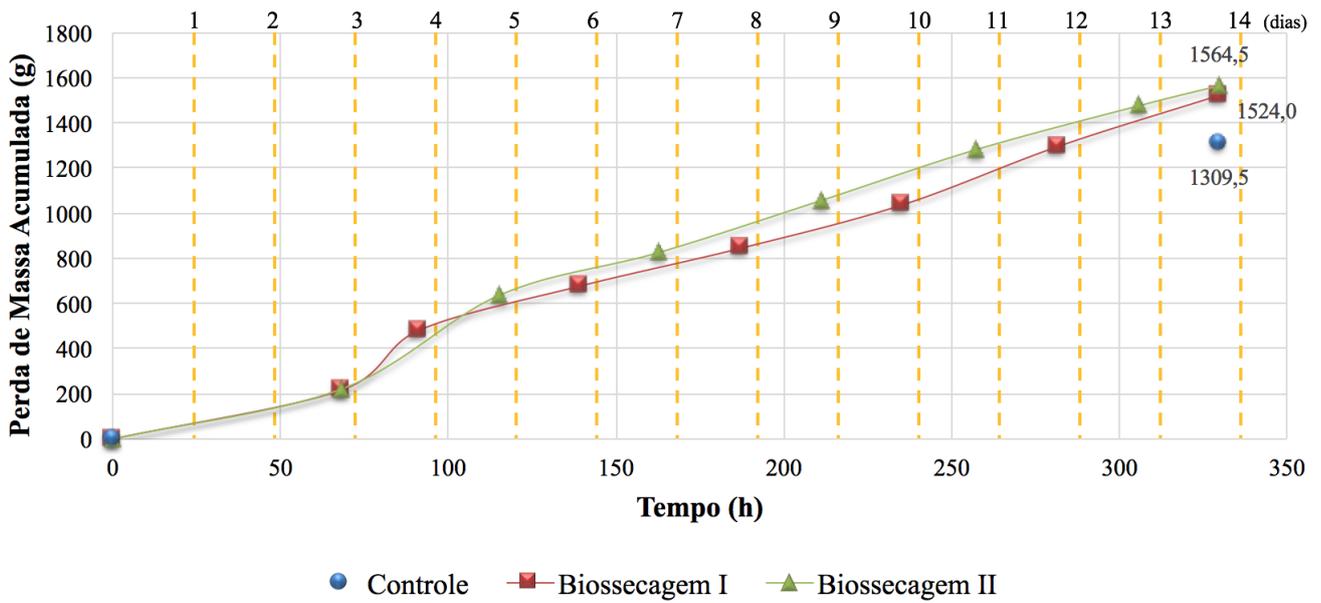
**Figura 5.21** – Temperatura (°C) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II.

Notas de explicação: Linhas secundárias do eixo horizontal (amarelo) representando o final de cada dia do experimento, totalizando 14 dias.



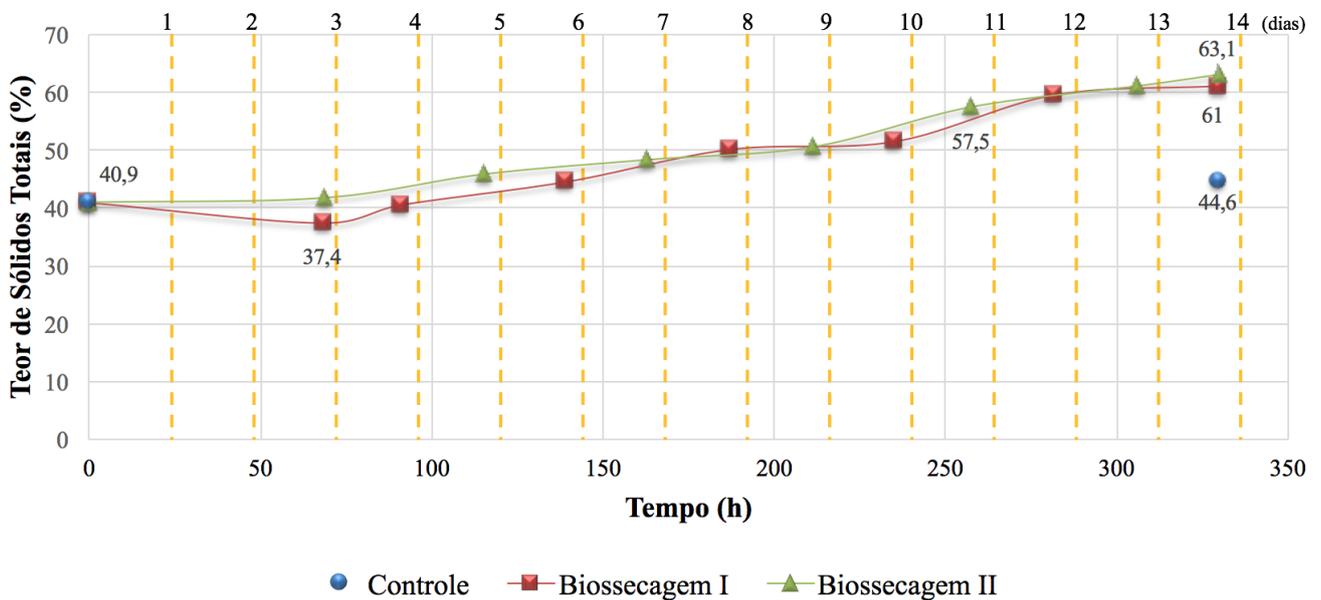
**Figura 5.22** – Vazão de ar injetada (L/min.kg<sub>ST</sub>) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II.

Notas de explicação: Linhas secundárias do eixo horizontal (amarelo) representando o final de cada dia do experimento, totalizando 14 dias. Recordar-se que foi trabalhado com massa inicial dentro de cada reator de 4kg.



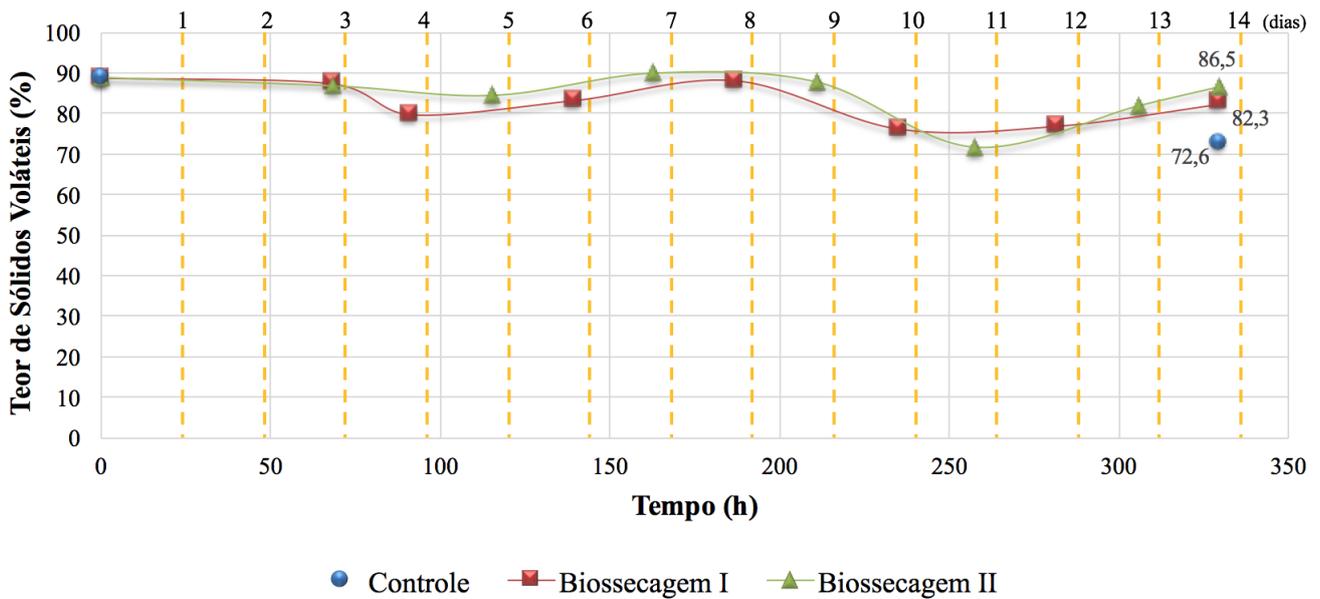
**Figura 5.23** – Perda de massa acumulada (g) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II.

Notas de explicação: Linhas secundárias do eixo horizontal (amarelo) representando o final de cada dia do experimento, totalizando 14 dias. As linhas foram mantidas apenas com o objetivo de facilitar orientação visual.



**Figura 5.24** – Teor de ST (%) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II.

Notas de explicação: Linhas secundárias do eixo horizontal (amarelo) representando o final de cada dia do experimento, totalizando 14 dias. As linhas foram mantidas apenas com o objetivo de facilitar orientação visual.



**Figura 5.25** – Teor de SV (%) x tempo (horas) ao longo do experimento para os reatores que representaram Controle, Biossecagem I e Biossecagem II.

Notas de explicação: Linhas secundárias do eixo horizontal (amarelo) representando o final de cada dia do experimento, totalizando 14 dias. As linhas foram mantidas apenas com o objetivo de facilitar orientação visual.

Os três reatores, até as proximidades do fim do 3º dia de experimento, apresentaram comportamento muito semelhantes, obviamente por serem submetidos a condições idênticas até a 69ª hora. Analisando-se a Figura 5.21, nas primeiras 24 horas do início do experimento ocorreu o aumento mais significativo da temperatura, ultrapassando condições mesofílicas (15 a 43°, segundo Fernandes e Silva (1999)), e tendo comportamento semelhante ao relatado por Cai *et al.* (2016b) no que se refere à fase mesofílica da biossecagem, que configura a primeira fase do processo. Nestas primeiras 24 horas os reatores alcançaram aproximadamente 46°C de temperatura, ficando esta temperatura estagnada neste valor até a 35ª hora, quando retomou o aumento, superando a fase de transição entre a faixa mesofílica e termofílica, e registrando comportamento do que foi denominado por Cai *et al.* (2016b) de primeira fase termofílica (segunda fase do processo). O valor máximo de temperatura registrado foi de 63,41°C no reator Biossecagem I, seguido de 62,07°C e 60,48°C nos reatores Biossecagem II e Controle, respectivamente. A partir deste momento (69ª hora) foi realizado revolvimento da massa e aumento e fixação da vazão de ar para 1L/min.kg<sub>(b.u.)</sub> ou aproximadamente 2,6L/min.kg<sub>ST</sub> (Figura 5.22) nos reatores Biossecagem I e Biossecagem II, o que resultou em queda brusca

de temperatura. Assim, por ser adotada a estratégia de manter os reatores denominados Biossecagem abertos até o fim do experimento, a temperatura sofreu pouca variação a partir de então, mantendo-se abaixo de 18°C após o 4º dia de experimento. Por esta razão, considera-se que, uma vez abertos os dois reatores (Biossecagem I e Biossecagem II), a perda de água ocorreu por convecção da fração de água já “liberada” quando do aumento da temperatura em momento anterior, ou apenas devido à passagem de ar através da massa. Em contrapartida, o reator que não foi aberto e sua massa não foi revolvida até o fim do experimento (reator Controle), iniciou uma queda na temperatura a partir do 3º dia, chegando a 45,73°C no início do 6º dia de experimento (146ª hora), quando retomou novo aumento de temperatura e, mesmo sem a realização do revolvimento sugerido e adotado por Cai *et al.* (2012, 2013, 2016a e 2016b); Cai, Gao e Hong (2015); Villegas e Huiliñir (2014), Huiliñir e Villegas (2015); Yang, Zhang e Jahng (2014); e Zhao *et al.* (2010), registrou comportamento semelhante ao que foi denominado por Cai *et al.* (2016b) como segunda fase termofílica (terceira fase do processo), com registro máximo de 56,7°C nas proximidades do início do 7º dia (166ª hora). Após este novo pico de temperatura, este parâmetro começou a declinar, perfazendo o que se denominou como fase de resfriamento (Cai *et al.*, 2016b), até chegar à temperatura de 23,65°C no fim do experimento (329ª hora ou proximidades do 14º dia). Em relação aos perfis de temperatura dos reatores Biossecagem I e Biossecagem II, após abertos, estes registraram comportamento muito semelhantes até o 10º dia, quando o reator Biossecagem I recebeu novo aumento na vazão de ar injetado (2,5L/min.kg<sub>(b.u.)</sub> ou aproximadamente 6,4L/min.kg<sub>ST</sub>), conforme ilustrado na Figura 5.22. Este novo aumento na vazão de ar no reator Biossecagem I resultou em diminuição da temperatura deste reator, chegando aos seguintes registros finais de temperatura para os reatores Biossecagem I e Biossecagem II: 8,41°C e 11,95°C, respectivamente.

Quanto à Figura 5.22, é importante recordar que se trabalhou inicialmente com 4kg de amostra, em base úmida (b.u.), em cada reator. Portanto, quando se verifica a Figura 4.27 e a

compara com os dados representados na Figura 5.22, embora aparente divergência, o que ocorre é que, no gráfico (Figura 5.22), os valores de vazão de ar injetada estão em função de quilograma de sólidos totais ( $\text{kg}_{\text{ST}}$ ) e os cálculos para obtenção do gráfico acompanharam também a perda de massa ao longo do experimento. Logo, exemplificando e facilitando o entendimento da Figura 5.22, nas proximidades do 3º dia, os reatores Biossecagem I e Biossecagem II receberam um aumento na vazão de ar ( $1\text{L}/\text{min}.\text{kg}_{(\text{b.u.i.})}$ ), que corresponde a valores próximos de  $2,6\text{L}/\text{min}.\text{kg}_{\text{ST}}$ . E, no 10º dia de experimento, o reator Biossecagem I recebeu novo aumento ( $2,5\text{L}/\text{min}.\text{kg}_{(\text{b.u.i.})}$ ), correspondendo a cerca de  $6,4\text{L}/\text{min}.\text{kg}_{\text{ST}}$ .

Em relação à Figura 5.23, foi possível o monitoramento ao longo do experimento apenas para os reatores Biossecagem I e Biossecagem II, já que eram realizados revolvimentos da massa a cada 2 dias e, portanto, era possível o registro da perda de massa acumulada. Assim, a partir da leitura do gráfico em referência, nota-se maior perda de massa no reator Biossecagem II ( $1564,5\text{g}$ ), seguido do Biossecagem I ( $1524,0\text{g}$ ) e Controle ( $1309,5\text{g}$ ). Os reatores Biossecagem I e Biossecagem II registraram comportamento semelhante no que se refere à perda de massa acumulada. Dessa forma, desta representação gráfica em discussão, conclui-se que o aumento da vazão de ar injetado nos reatores (Biossecagem I e Biossecagem II) foi mais efetivo do que a manutenção de altas temperaturas (Controle) no que se refere à perda de massa ao longo do experimento, supondo-se até que a não realização de revolvimento para este último reator possa ser a explicação deste resultado inferior. Ressalta-se também que, ainda que a diferença de perda de massa seja pequena quando se compara os reatores Biossecagem I e Biossecagem II, o aumento da vazão de ar injetado no reator Biossecagem II após o 10º dia de experimento (Figura 5.22) não significou maior perda de massa neste reator em relação ao Biossecagem I. Logo, ainda que o aumento da vazão possa ter sido mais efetivo quando se compara os reatores Biossecagem com o reator Controle, é provável que exista um valor limitante no que se refere ao aumento da vazão de ar injetado para que ocorra maior perda de massa ao longo do experimento.

No que concerne à Figura 5.24, esta pode ser considerada como principal resultado deste experimento, uma vez que representa o teor de ST ao longo do processo, ou seja, relata a quantidade de matéria seca presente na massa, sendo maior quanto mais água for removida. Semelhantemente ao monitoramento da perda de massa acumulada, o monitoramento do teor de ST ao longo do experimento foi possível de ser analisado apenas para os reatores Biossecagem I e Biossecagem II, quando da realização do revolvimento, permitindo-se obter amostra para tanto. Os três reatores foram submetidos ao experimento com a massa em mesmas condições, com teor de ST de 40,9% (lodo + estruturante, 2:1 v/v). Ao final do experimento, obteve-se os seguintes valores finais de ST: 63,1% para Biossecagem II, 61% para Biossecagem I, e 44,6 para Controle. Estes resultados, assim como aqueles referentes à Figura 5.23, ilustram que o aumento da vazão de ar injetado resultou em amostra mais seca ao final do experimento do que a manutenção de temperatura mais elevada. Contudo, assim como se afirmou para a situação da perda de massa acumulada, supõe-se que a inferioridade dos resultados do reator Controle se deu principalmente devido à não realização de revolvimento, que poderia ter sido feito no 6º dia, antes do início da segunda fase termofílica, e, quando do início da fase de resfriamento, em maior periodicidade. Complementarmente, é sensato ressaltar que, se realizados revolvimentos no reator Controle, este poderia ser denominado como Biossecagem. Por fim, quando se compara condições semelhantes (Biossecagem I e Biossecagem II), com diferença apenas a partir do 10º dia de experimento, quando foi realizado novo aumento na vazão de ar do reator Biossecagem I (Figura 5.22), o resultado foi diminuição da temperatura (Figura 5.21) e também maior dificuldade na perda de água (Figuras 5.23 e 5.24), permitindo-se concluir que para se obter maior taxa de remoção de água em processo de biossecagem, a manutenção de temperaturas mais altas possui maior contribuição que o aumento significativo da vazão de ar. Isto, pois quando se possui temperaturas mais altas facilita-se a quebra da partícula, favorecendo a remoção da água intersticial, superficial e intracelular presente no lodo. Como comprovação, na Figura 5.24

observa-se que no reator Biossecagem II obteve-se maior teor de ST final que no Biossecagem I.

Sobre a Figura 5.25, devido à presença de material estruturante (madeira triturada) na amostra coletada para análise, os resultados podem ter sido disfarçados, uma vez que não foi possível, no momento da análise, eliminar a madeira, que certamente interferiu no monitoramento dos resultados ao longo do experimento, mesmo sendo realizadas análises em triplicata para todos os parâmetros. Assim, o que se infere desta representação (Figura 5.25) é que, ainda que pequena, ocorreu remoção de SV ao longo do experimento, com mais significatividade para os reatores Controle e Biossecagem I. Além disso, é importante destacar que alto teor de SV corresponde a maior quantidade de matéria orgânica presente e, portanto, possivelmente maior poder calorífico do produto.

Em todos os reatores, após período mantido fechado, quando da realização da abertura, observou-se grande quantidade de água na parte interna da tampa, o que denota que ocorreu dificuldade na saída da água evaporada do reator, podendo, inclusive, ser objeto de estudo para melhoria do processo, no que se refere à secagem do lodo por biossecagem.

A seguir apresentam-se algumas fotos que ilustram aspectos de aparência visual referentes ao experimento conduzido em laboratório, na UAB, em Barcelona (Figuras 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, e 5.32).



**Figura 5.26** – Mistura do lodo com estruturante (proporção volumétrica 2:1).



**Figura 5.27** – Realização de revolvimento nos reatores denominados Biossecagem.



**Figura 5.28** – Reatores após 14 dias de experimento (final do experimento) – Biossecagem I, Biossecagem II e Controle (da esquerda para direita).



**Figura 5.29** – Aspecto do resíduo processado no reator Biossecagem I.



**Figura 5.30** – Aspecto do resíduo processado no reator Biossecagem II.



**Figura 5.31** – Aspecto do resíduo processado no reator Controle.



**Figura 5.32** – Estratificação de secagem no reator Controle (fundo do reator acima e topo abaixo).

Por meio da visualização das fotos anteriores torna-se mais facilitada a compreensão de alguns aspectos dos procedimentos realizados no experimento conduzido. No reator Controle foram realizadas análises de ST e SV apenas antes de iniciar o experimento e após finalizado. Neste reator, a estratificação da secagem foi muito aparente (Figura 5.32), obtendo-se os respectivos teores de ST em amostras coletadas do fundo, do meio e da parte superior do reator: 94,5%, 80,4%, e 26,3%. Portanto, obtendo-se massa mais seca no fundo (entrada de ar no reator) e mais úmida na parte superior (saída de ar do reator). É possível mencionar também que o teor de ST neste reator aumentou ao se homogeneizar a massa e coletar amostra para análise (de 40,9% para 44,6%) e comparar os valores antes e após o experimento (Figura 5.24). No entanto, é possível afirmar que parte da umidade foi

transferida da camada inferior para a superior, uma vez que a mistura (lodo + estruturante) no início do experimento possuía teor de ST homogêneo de 40,9%, passando, ao final do experimento, a ter 26,3% de ST na camada superior, permitindo esta conclusão a respeito da transferência de umidade do fundo para a camada superior da massa no reator, que pode ser decorrente da ineficiência do sistema de saída de água evaporada do reator. De maneira complementar, ressalta-se a importância da realização de revolvimentos na condução deste tipo de processo, com o objetivo principal de homogeneizar a massa e permitir que ocorra atividade biológica também de maneira mais homogênea e integral possível, evitando-se estratificações.

Em síntese, segue Tabela 5.5, que traz sumarizadamente os resultados dos principais parâmetros monitorados no experimento, incluindo resultados de análises de Poder Calorífico Superior (PCS) de amostras antes e após o processo, para os três reatores.

**Tabela 5.5** – Resumo dos resultados dos principais parâmetros analisados, antes e após o processo.

Parâmetro	Controle, Biossecagem I, Biossecagem II		Controle	Biossecagem I	Biossecagem II
	antes	após	após	após	após
ST (%)	40,9	44,6	61	63,1	63,1
SV (%)	88,8	72,6	82,3	86,5	86,5
PCS (kJ/kg <sub>ST</sub> )*	18245,17	10861,24	14775,59	17551,88	17551,88

\*Método: ASTM (*American Society for Testing Materials*), D 407-44, D 271-58, D 240-57 T.

Analisando-se a Tabela 5.5, verifica-se que o melhor resultado obtido em termos de secagem do lodo de esgoto foi referente ao reator Biossecagem II, seguido do Biossecagem I e Controle. Assim, pensando-se na utilização deste resíduo biosseco para geração de energia por meio de processo de combustão, os teores de ST dos reatores Biossecagem I (61%) e Biossecagem II (63,1%) superaram o parâmetro mínimo recomendado por Gyllenhammer (1998) e Zhao *et al.* (1999), que é 57% de ST. O teor final de ST dos reatores Biossecagem I e II superaram, inclusive, o teor mais elevado (60% de ST) do intervalo sugerido por Göttsching *et al.* (1996) para combustão autógena de lodo. Em relação ao reator Controle,

este ficou muito próximo de atender ao teor mínimo de 45% de ST recomendado por Kudra *et al.* (2002), para que seja incinerado produzindo ganho de energia.

No que se refere ao teor de SV, que representa quantidade de matéria orgânica presente na massa processada, observa-se que houve redução em todos os casos. No entanto, esta redução foi mais significativa no reator Controle, uma vez que devido à manutenção de maior temperatura da massa ao longo do experimento e passagem pelas quatro fases do processo (mesofílica, primeira termofílica, segunda termofílica e resfriamento, conforme Cai *et al.* (2016b)), o que se pode atribuir à maior ocorrência de atividade biológica, certamente este resultado de menor teor de SV em relação aos outros dois reatores era esperado.

Por fim, quanto ao PCS, uma vez que este tende a ser maior quanto maior o teor de ST e SV, obteve-se o melhor resultado (17551,88kJ/kg<sub>ST</sub>) para o reator Biossecagem II, com 61,3% e 86,5% de ST e SV, respectivamente. Vale ressaltar que, como o valor do PCS é diretamente proporcional ao teor de SV, e é analisado em amostra seca (após ser submetida à estufa por 24h, a 105°C), este parâmetro é maior na massa antes de ser processada do que após, já que ao longo do processo, devido à atividade biológica (matéria orgânica) e consequente aumento da temperatura, o teor de SV é reduzido, ou seja, consome-se parte dos sólidos voláteis presentes. Logo, como conclusão final, na condição em que se deu este experimento conduzido no exterior, o melhor resultado em termos de secagem e aproveitamento de potencial energético do produto final pode ser atribuído ao reator Biossecagem II, mesmo passando apenas por duas (mesofílica e primeira termofílica) das quatro fases do processo identificadas e descritas por Cai *et al.* (2016b), devido à abertura do reator e consequente desfavorecimento de aumento da temperatura.

Como limitações deste experimento menciona-se a possibilidade de estimar e comparar os custos de energia elétrica devido ao aumento na vazão de ar (realizada nos reatores Biossecagem I e Biossecagem II), bem como possibilidade de ter sido conduzido simultaneamente um reator extra em mesmas condições do reator Controle, mas com pelo

menos um ou dois revolvimentos sendo realizados, com o primeiro no quinto ou sexto dia. Além destas duas limitações, mais uma vez destaca-se a questão da deficiência do sistema em direcionar e facilitar a saída de água evaporada de dentro do reator.

## 5.2. BRASIL

### 5.2.1. Etapa de Desaguamento: Leito de Drenagem

Conforme identificado na Figura 4.28, antes de se iniciarem os experimentos referentes à etapa de desaguamento do lodo em protótipos de Leito de Drenagem (LD), foi coletada amostra do lodo anaeróbico bruto proveniente de reator UASB para realizar análises de caracterização, as quais se encontram apresentadas na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6** – Resultados das análises de caracterização do lodo anaeróbico (UASB) bruto, da ETE Monjolinho, São Carlos-SP.

Parâmetro	Unidades	Resultado	Método*
pH	unid. pH	6,7	4500 H <sup>+</sup> B <sup>a</sup>
Condutividade a 25°C	µs/cm	980	2510 B <sup>a</sup>
DQO	mg/L	88665	5220 D <sup>a</sup>
DBO	mg/L	22500	5210 B <sup>a</sup>
N total	mg/L	1648	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>a</sup>
DQO	mg/g	2062	5220 D <sup>b</sup>
DBO	mg/g	523	5210 B <sup>b</sup>
N total	mg/g	39,2	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>b</sup>
COT	mg/g	343,1	5310-B <sup>b</sup>
C/N	adimensional	8,75	- <sup>b</sup>
ST	%	4,339	2540 G
ST	mg/L	43,636	2540 B
SV	%	63,242	2540 E

\*APHA, AWWA, WEF (2012).

<sup>a</sup>Base úmida (amostras brutas).

<sup>b</sup>Base seca (100°C).

Assim como detalhado nos métodos da etapa de desaguamento, os ensaios em protótipos de LD foram divididos em duas partes, sendo estudos de drenagem e estudos de evaporação, apresentados a seguir obedecendo esta mesma ordem.

Os resultados referentes aos estudos de drenagem foram conduzidos em protótipos de LD em escala laboratorial, no laboratório de saneamento da UFSCar, totalizando seis ensaios

(A1, A2, B1, B2, C1, C2), conforme descrito nos métodos. Estes consistiram basicamente de resultados referentes à vazão de drenagem (mL/min), ao volume drenado acumulado (mL), e à qualidade do drenado (cor, turbidez e condutividade). Antes de apresentar e discutir estes parâmetros, segue Tabela 5.7, que traz resultados de análises de ST (%), SF (%), SV (%), cálculo da TAS ( $\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$ ), e recorda características de cada um dos seis ensaios, bem como os métodos de análise utilizados.

**Tabela 5.7** – Resultados de análises de Sólidos Totais, Sólidos Fixos, Sólidos Voláteis, cálculo da Taxa de Aplicação de Sólidos e características de cada ensaio.

Parâmetro	Ensaio						Método*
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	
ST (%)	1,77	2,92	4,07	4,89	3,02	4,74	J
SF (%)	39,99	37,18	36,42	40,75	37,06	36,49	L
SV (%)	60,01	62,82	63,58	59,25	62,94	63,51	M
TAS ( $\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$ )	1,82	6,01	4,19	10,07	3,11	9,76	Eq. 4.2
Volume despejado (L)	9,61	19,22	9,61	19,22	9,61	19,22	-
Altura camada lodo (cm)	10	20	10	20	10	20	-
Manta utilizada (HaTe®)	55/55 UV		80/80 UV		105/105 DW		-

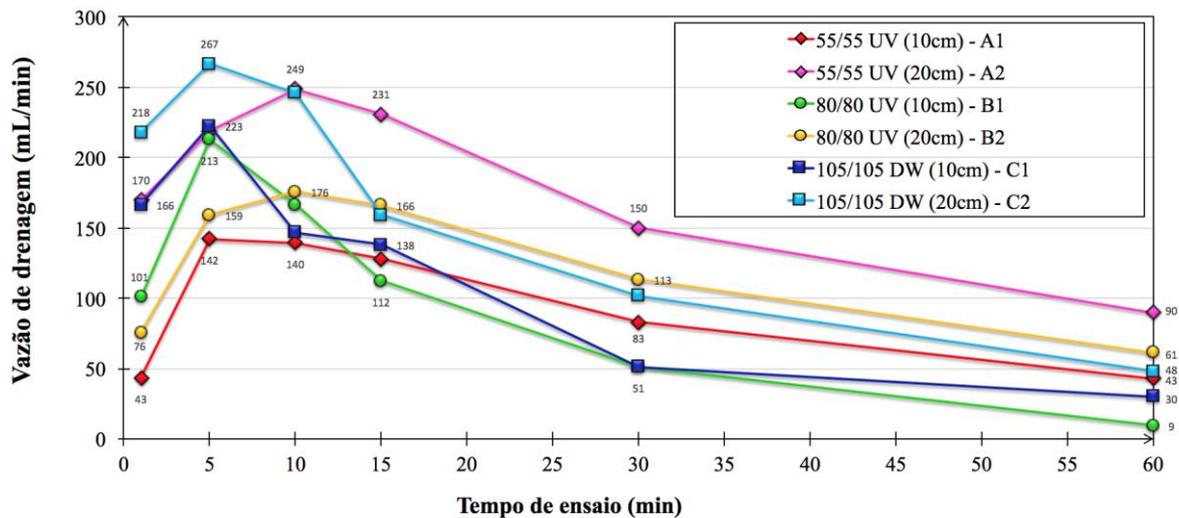
\*ABNT NBR 10664 (também preconizados pela APHA, 2012).

A partir da Tabela 5.7 é possível notar que os teores de ST variaram de 1,77 a 4,89%, e os percentuais de SF e SV se mantiveram muito próximos, em torno de 40 e 60% respectivamente. A TAS aplicada em cada ensaio também foi variável, entre 1,82 e  $10,07\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$ , o que é comum ocorrer em estudos com lodo bruto, dada a variabilidade de sua característica fluida.

Em relação ao monitoramento da vazão de drenagem, a Tabela 5.8 traz os resultados calculados a partir da Equação 4.1, e a Figura 5.33 ilustra tais resultados em forma de gráfico.

**Tabela 5.8** – Resultados de vazão de drenagem (mL/min) calculada a partir da Equação 4.1 para os seis ensaios (A1, A2, B1, B2, C1, C2).

Tempo de drenagem (min)	Ensaio (vazão de drenagem, em mL/min)					
	A1 (10cm) 55/55 UV	A2 (20cm) 55/55 UV	B1 (10cm) 80/80 UV	B2 (20cm) 80/80 UV	C1 (10cm) 105/105 DW	C2 (20cm) 105/105 DW
1	43	170	101	76	166	218
5	142,16	218,87	212,72	159,38	222,63	266,67
10	139,57	248,76	166,36	175,80	146,94	246,00
15	128,07	230,89	112,19	166,30	137,87	159,07
30	83,03	150,23	51,44	113,06	51,48	101,87
60	42,99	89,78	9,42	61,46	29,93	48,10
120	4,24	-	-	25,99	-	-



**Figura 5.33** – Gráfico da vazão de drenagem (mL/min) nos primeiros 60 minutos dos seis ensaios (A1, A2, B1, B2, C1, C2).

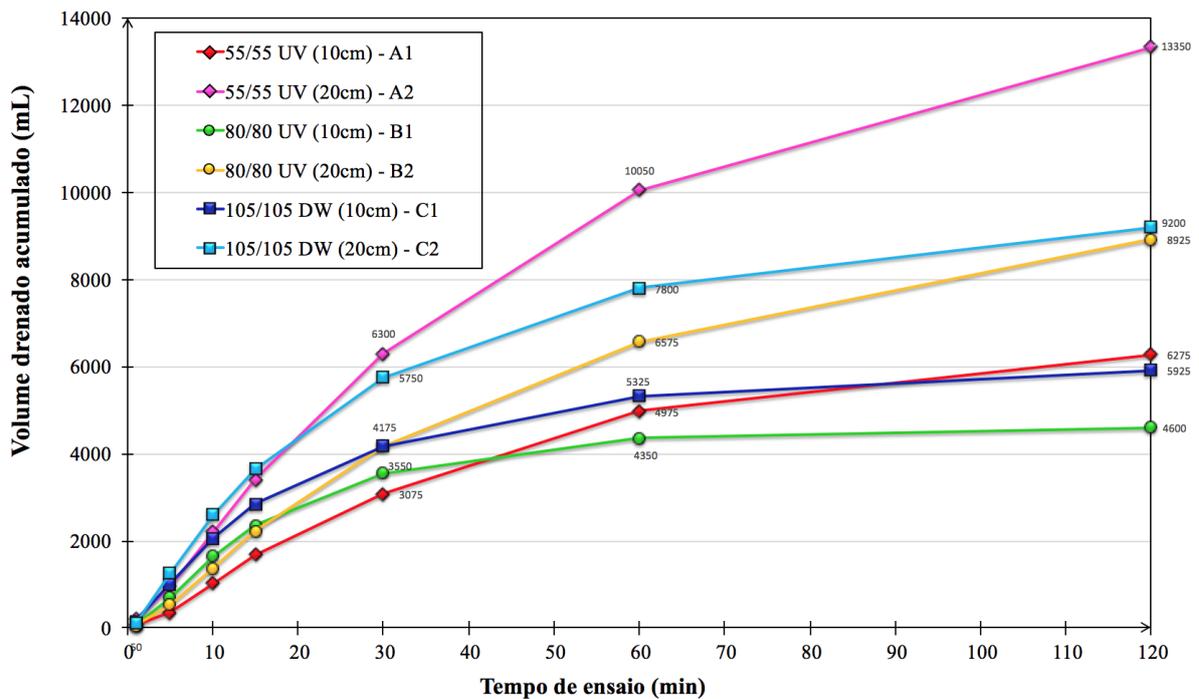
A análise da Figura 5.33 nos permite afirmar que em todos os ensaios de drenagem realizados o pico vazão calculada obtido ocorreu após 5 minutos de experimento (A1, B1, C1 e C2) e após 10 minutos de experimento (A2 e B2), com todas as curvas diminuindo a vazão de drenagem gradativamente após atingir seu pico. A maior vazão de drenagem obtida foi no ensaio C2 após 5 minutos do início, alcançando o valor de 267mL/min. Este resultado permite afirmar que a TAS mais baixa não significa necessariamente maior vazão de drenagem obtida, uma vez que a TAS do ensaio C2 foi a segunda maior (9,76kg<sub>ST</sub>/m<sup>2</sup>). Os ensaios A1 e A2, e C1 e C2 ilustram que em se tratando da mesma manta, a altura da camada de lodo utilizada influencia o resultado da vazão de drenagem obtida, uma vez que, comparando-se os picos de vazão de drenagem para estes quatro ensaios separadamente por tipo de manta, nota-se que quanto maior a altura da camada de lodo aplicada maior será o pico de vazão obtido. Em contrapartida, fazendo a mesma comparação para os ensaios B1 e B2, mesmo tendo sido aplicada maior altura da camada de lodo em B2 (20cm, 176mL/min, 10min), seu pico de vazão foi inferior ao pico de B1 (10cm, 213mL/min, 5min). Contudo, para esta situação dos ensaios B, quando se analisa a TAS aplicada, em B2 ela foi de 10,07kg<sub>ST</sub>/m<sup>2</sup> e em B1 de 4,19kg<sub>ST</sub>/m<sup>2</sup>, permitindo sugerir que quando se realiza ensaios em mesmas condições e característica de manta, a TAS influencia e retarda os resultados de pico de vazão de

drenagem obtida, sendo menor o pico de vazão e mais demorado, quanto maior a TAS. Outro ponto importante a se destacar é que a vazão de drenagem calculada após 10, 15, 30 e 60 minutos de experimento foi superior para os ensaios com altura de camada de lodo de 20cm (A2, B2 e C2), o que pode ser atribuído ao maior volume de água livre (drenante), dada a maior quantidade de lodo aplicada.

Quanto ao monitoramento do volume drenado acumulado, a Tabela 5.9 traz os resultados deste parâmetro e a Figura 5.34 ilustra tais resultados em forma de gráfico.

**Tabela 5.9** – Resultados de volume drenado acumulado (mL) para os seis ensaios (A1, A2, B1, B2, C1, C2).

Tempo de drenagem (min)	Ensaio (volume drenado acumulado, em mL)					
	A1		A2		C1	
	55/55 UV (10cm)	55/55 UV (20cm)	80/80 UV (10cm)	80/80 UV (20cm)	105/105 DW (10cm)	105/105 DW (20cm)
1	75	200	50	50	150	100
5	350	950	700	525	1000	1250
10	1025	2200	1650	1375	2050	2600
15	1675	3400	2350	2225	2850	3650
30	3075	6300	3550	4175	4175	5750
60	4975	10050	4350	6575	5325	7800
120	6275	13350	4600	8925	5925	9200



**Figura 5.34** – Gráfico do volume drenado acumulado (mL) ao longo dos 120 minutos dos seis ensaios (A1, A2, B1, B2, C1, C2).

Sobre a Figura 5.34, é possível afirmar que, como esperado, os ensaios com maior altura de camada de lodo aplicada (A2, B2 e C2) foram os que resultaram em maior volume drenado acumulado ao final de 120 minutos de ensaio. Assim, comparando-se o volume drenado acumulado separadamente para os ensaios com 10 e 20cm de altura de camada de lodo, após 120min de ensaio notou-se que tanto para 10 como para 20cm de altura de lodo aplicado, a manta que permitiu obter maior volume drenado acumulado e, portanto, maior remoção de água livre presente, foi a HaTe<sup>®</sup> 55/55 UV (A1 com 6275mL e A2 com 13350mL), seguida da HaTe<sup>®</sup> 105/105 DW (C1 com 5925mL e C2 com 9200mL) e da HaTe<sup>®</sup> 80/80 UV (B1 com 4600mL e B2 com 8925mL).

Comparando-se este resultado de volume drenado acumulado com o de vazão de drenagem, é possível sugerir que a manta que apresentou maior capacidade de drenagem para o lodo aplicado (anaeróbio proveniente de reator UASB) foi a HaTe<sup>®</sup> 55/55 UV. Complementarmente, comparando os resultados das Tabelas 5.8 e 5.9 e das Figuras 5.33 e 5.34 com as TAS, identifica-se que a TAS não influencia na capacidade de drenagem da manta, uma vez que os melhores e piores resultados de drenagem não estão relacionados a maior ou menor TAS.

Por fim, com relação à qualidade do drenado no que se refere à cor aparente, turbidez e condutividade, as Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 trazem os resultados separadamente por tipo de manta utilizada.

**Tabela 5.10** – Resultados referentes à qualidade do drenado ao longo do tempo, para os ensaios de drenagem A1 e A2, utilizando manta HaTe<sup>®</sup> 55/55 UV.

Tempo de ensaio	A1 - 10cm - 55/55 UV			A2 - 20cm - 55/55 UV		
	Cor (PtCo)	Turbidez (NTU)	Condutividade (μS/cm)	Cor (PtCo)	Turbidez (NTU)	Condutividade (μS/cm)
1 min	6600	1308	1174	2550,00	511	1194
5 min	3220	639	1393	1185,00	263	1205
10 min	3790	803	1225	900,00	156	1211
15 min	2930	614	1124	910,00	110	1215
30 min	1625	266	1484	530,00	102	1227
60 min	1190	149	1500	453,00	101	1206
Método*	2120 B	2130 B	2510 B	2120 B	2130 B	2510 B

\*APHA, AWWA, WEF (2012).

**Tabela 5.11** – Resultados referentes à qualidade do drenado ao longo do tempo, para os ensaios de drenagem B1 e B2, utilizando manta HaTe® 80/80 UV.

Tempo de ensaio	B1 - 10cm - 80/80 UV			B2 - 20cm - 80/80 UV		
	Cor (PtCo)	Turbidez (NTU)	Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )	Cor (PtCo)	Turbidez (NTU)	Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )
1 min	1320	249	843	3730	698	1946
5 min	865	159	834	2830	540	1855
10 min	450	83	831	1870	285	1821
15 min	365	68	833	1370	225	1867
30 min	155	39	836	1185	182	1886
60 min	85	24	845	1050	150	1687
Método*	2120 B	2130 B	2510 B	2120 B	2130 B	2510 B

\*APHA, AWWA, WEF (2012).

**Tabela 5.12** – Resultados referentes à qualidade do drenado ao longo do tempo, para os ensaios de drenagem C1 e C2, utilizando manta HaTe® 105/105 DW.

Tempo de ensaio	C1 - 10cm - 105/105 DW			C2 - 20cm - 105/105 DW		
	Cor (PtCo)	Turbidez (NTU)	Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )	Cor (PtCo)	Turbidez (NTU)	Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ )
1 min	1690	318	886	2690	458	947
5 min	750	130	875	1595	280	950
10 min	455	77	879	745	136	955
15 min	370	78	884	540	112	950
30 min	230	45	880	410	82	956
60 min	130	33	893	155	42	959
Método*	2120 B	2130 B	2510 B	2120 B	2130 B	2510 B

\*APHA, AWWA, WEF (2012).

No que se refere à qualidade do drenado, percebe-se que, de modo geral, em todos os ensaios os valores tenderam a melhorar ao longo do experimento. Esta característica é mais facilmente observada para os resultados de cor aparente e turbidez, a partir da visualização das barras amarelas nas Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12. Destas tabelas observa-se também que os resultados referentes aos ensaios B1, B2, C1 e C2 foram próximos, sendo, portanto, distintos e com pior qualidade quando se utilizou a manta geotêxtil HaTe® 55/55 UV (principalmente A1), o que pode justificar a superioridade na capacidade de drenagem desta manta em relação às demais utilizadas.

Dessa forma, pontua-se que, embora a manta HaTe® 55/55 UV tenha apresentado maior drenabilidade em relação às outras duas utilizadas, as características qualitativas do drenado no que se refere à cor aparente, turbidez e condutividade foram inferiores às outras mantas. Contudo, pensando-se na possibilidade de aplicação do LD em escala real, dentre

estas três mantas, sugere-se a opção pela manta HaTe<sup>®</sup> 55/55 UV, uma vez que se o drenado retornar para o início do tratamento de esgotos da ETE, sua qualidade não teria tanta influência pelo fato de ser submetido a todas as etapas de tratamento de esgoto existentes.

Em relação aos estudos de evaporação conduzidos na própria ETE, antes de serem iniciadas cada série de ensaio (A, B e C), uma vez que as séries de ensaio foram realizadas em momentos distintos, coletou-se amostra de lodo para determinação de ST, SF e SV (Tabela 5.13).

**Tabela 5.13** – Resultados de análises de ST, SF e SV a cada série de ensaios.

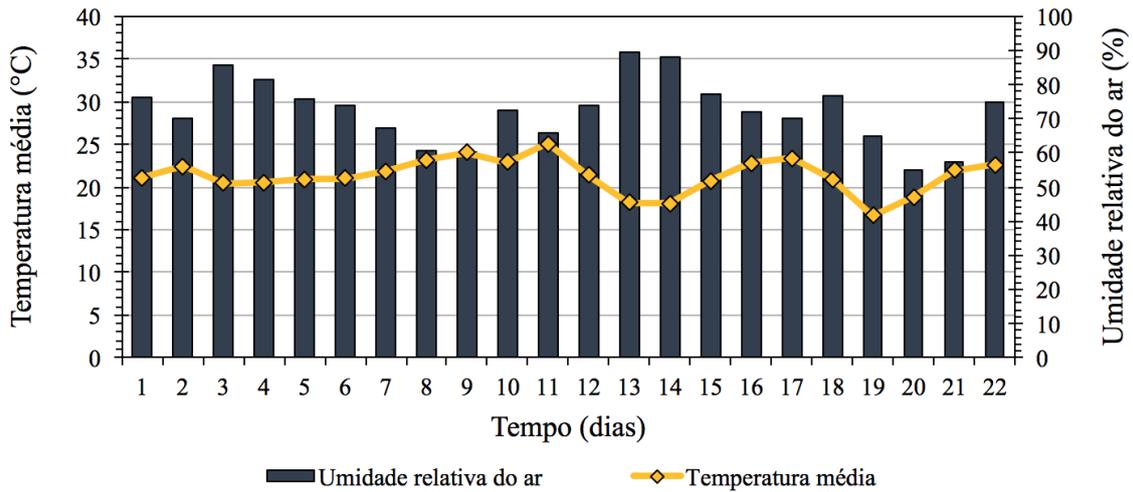
Ensaio	Parâmetros	Valor Médio (%)	Método*
Série A (EA1, EA2, EA3)	Sólidos Totais (ST)	3,55	J
	Sólidos Fixos (SF)	38,35	L
	Sólidos Voláteis (SV)	61,65	M
Série B (EB1, EB2, EB3)	Sólidos Totais (ST)	0,56	J
	Sólidos Fixos (SF)	28,05	L
	Sólidos Voláteis (SV)	71,95	M
Série C (EC1, EC2, EC3)	Sólidos Totais (ST)	3,26	J
	Sólidos Fixos (SF)	37,06	L
	Sólidos Voláteis (SV)	62,94	M

\*ABNT NBR 10664 (também preconizados pela APHA, 2012).

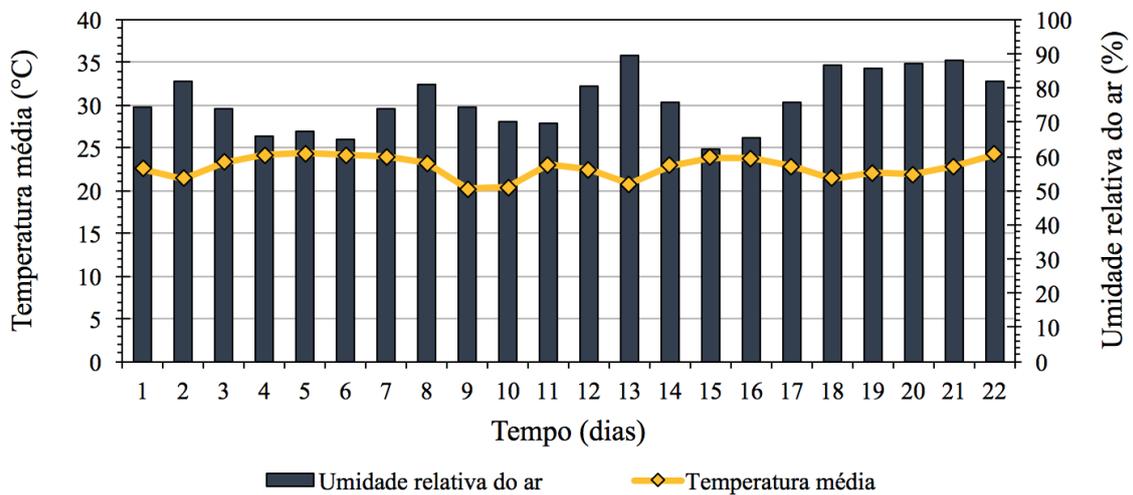
Com esses resultados, aplicando-se a Equação 4.2, obteve-se a TAS dos nove ensaios realizados para os estudos de evaporação, que é apresentada na Tabela 5.14. As condições climáticas, monitoradas conforme descrito na metodologia, estão apresentadas nas Figuras 5.35, 5.36, 5.37 e 5.38.

**Tabela 5.14** – Resultados da Taxa de Aplicação de Sólidos para os ensaios das séries A, B e C dos estudos de evaporação.

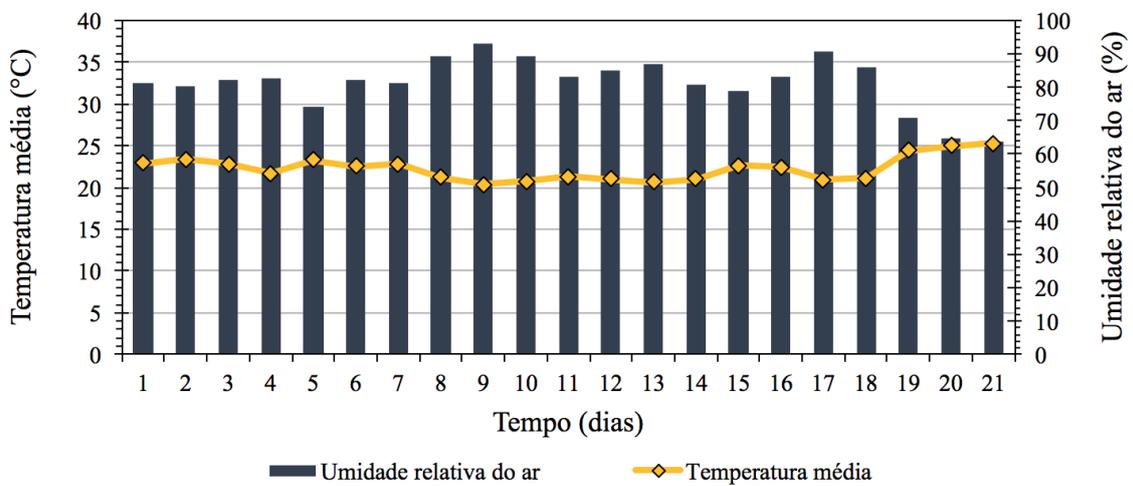
TAS - Taxa de Aplicação de Sólidos (kg <sub>ST</sub> /m <sup>2</sup> )								
EA1	EA2	EA3	EB1	EB2	EB3	EC1	EC2	EC3
55,75	13,77	6,89	8,85	2,19	1,09	51,15	12,64	6,32



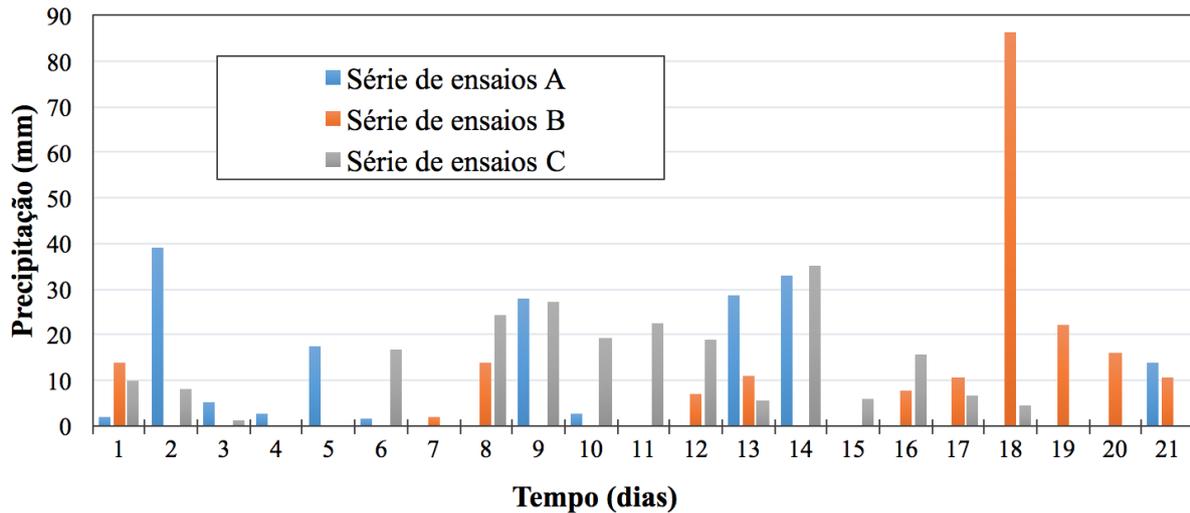
**Figura 5.35** – Condições climáticas monitoradas para os ensaios da série A.  
 Fonte: Compilado a partir de dados do INMET (2017).



**Figura 5.36** – Condições climáticas monitoradas para os ensaios da série B.  
 Fonte: Compilado a partir de dados do INMET (2017).



**Figura 5.37** – Condições climáticas monitoradas para os ensaios da série C.  
 Fonte: Compilado a partir de dados do INMET (2017).



**Figura 5.38** – Comparação entre a precipitação diária dos ensaios das séries A, B e C.

As análises das condições climáticas apontaram diferenças nos parâmetros monitorados. Durante a série A a temperatura média variou de 15°C a 25°C, para a série B e C a amplitude térmica foi menor, de 20°C a 25°C. Entretanto, a umidade relativa do ar e a precipitação influenciaram de modo mais significativo os valores de ST ao longo dos ensaios.

Durante a série A a precipitação total foi de 175,2mm, para a série B foi de 207,4mm, e para a C foi de 222,6mm. Contudo, o fator determinante para o desempenho da secagem foi a distribuição das chuvas durante os dias. Ao longo do ensaio A não foi registrada ocorrência de precipitação em 10 dias, no B em 8 dias, e no C apenas 5 dias sem chuva. Conforme Figura 5.38, nota-se que durante os ensaios A e C não foram registrados picos de precipitação tão acentuados, como ocorreu no ensaio B. Para esta série (B) a chuva foi mais concentrada nos últimos sete dias, ocorrendo precipitação total de 154mm, ou seja, 76% do volume do período considerado.

A influência da precipitação não se dá de modo direto, mas sim devido à umidade relativa do ar que não permite a troca de calor entre o meio e o lodo, fazendo com que não ocorra evaporação da água presente no resíduo. Por esta razão, os gráficos de ST dos ensaios estão mostrados relacionando este parâmetro com a precipitação, pois acredita-se que dessa forma a visualização é mais facilitada do que se os valores fossem relacionados com a

umidade relativa do ar. A Tabela 5.15 traz os resultados obtidos para os ensaios A, B e C no que se refere ao monitoramento do teor de ST nos nove ensaios.

**Tabela 5.15** – Resultados do teor de Sólidos Totais em %, para os ensaios das séries A, B e C referentes aos estudos de evaporação.

Tempo de ensaio	Teor de ST (%)								
	EA1	EA2	EA3	EB1	EB2	EB3	EC1	EC2	EC3
1°	3,55	3,55	3,55	0,56	0,56	0,56	3,26	3,26	3,26
2°	11,73	15,03	17,20	-	-	-	13,91	12,53	11,92
4°	14,69	14,68	15,00	20,21	19,85	26,13	17,63	20,07	16,35
7°	-	-	-	18,40	23,17	51,64	21,76	25,85	51,72
10°	21,21	24,08	46,80	-	-	-	-	-	-
14°	19,93	24,59	15,11	22,32	28,19	40,84	20,35	20,45	53,87
21°	26,13	68,31	96,80	27,05	40,95	64,48	24,81	38,01	89,93

Cabe ressaltar que não foi possível a realização da coleta no sétimo dia dos ensaios da série A e, portanto, optou-se por realizá-la no décimo dia do ensaio. Para os ensaios da série B, a coleta do segundo dia não foi possível e como outra coleta estava programada para o quarto dia, não houve coleta substitutiva à do segundo dia. Ainda em relação aos problemas na condução do experimento, a partir do 14° dia, devido à pouca quantidade de lodo no leito 3 dos ensaios da série A (EA3) e pequena quantidade de amostra coletada para análises, os resultados das análises em triplicata mostraram grande variabilidade. Assim, devido à não confiabilidade destes resultados, eles foram desconsiderados.

Analisando as séries de ensaios separadamente, as Figuras 5.39, 5.40 e 5.41 trazem os gráficos da evolução do teor de ST relacionando-a com a precipitação diária.

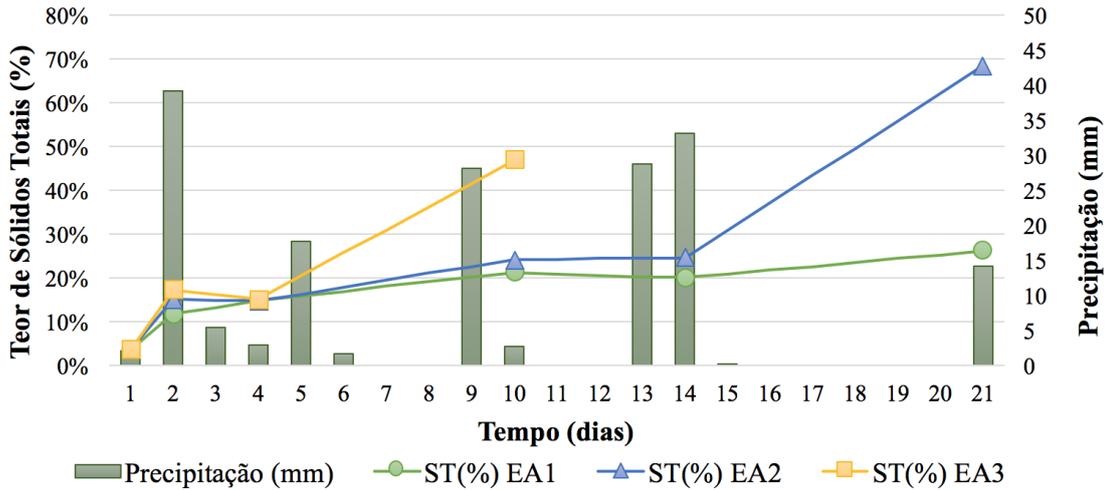


Figura 5.39 – Gráfico do teor de Sólidos Totais em % e da precipitação em mm, em função do tempo para os ensaios da série A.

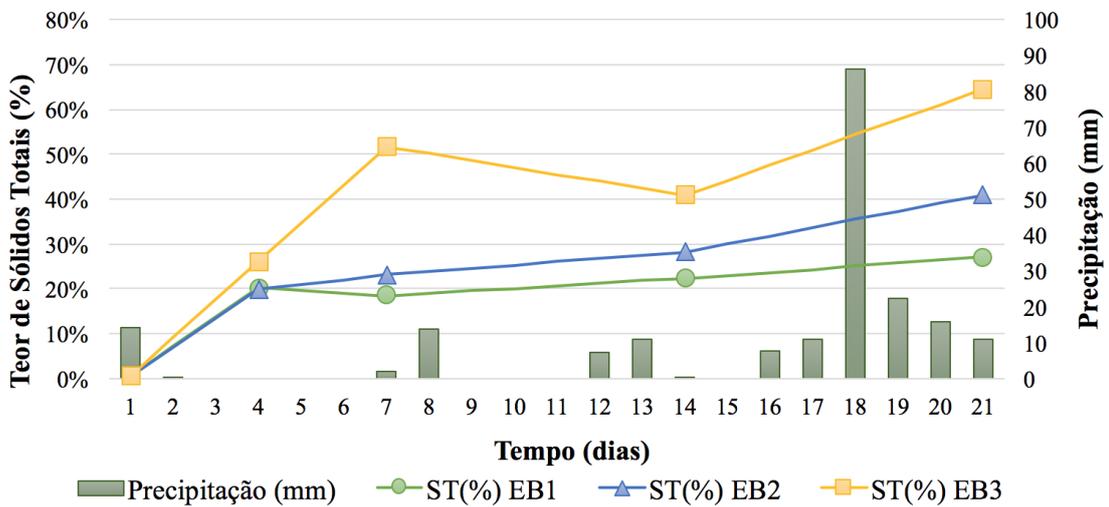


Figura 5.40 – Gráfico do teor de Sólidos Totais em % e da precipitação em mm, em função do tempo para os ensaios da série B.

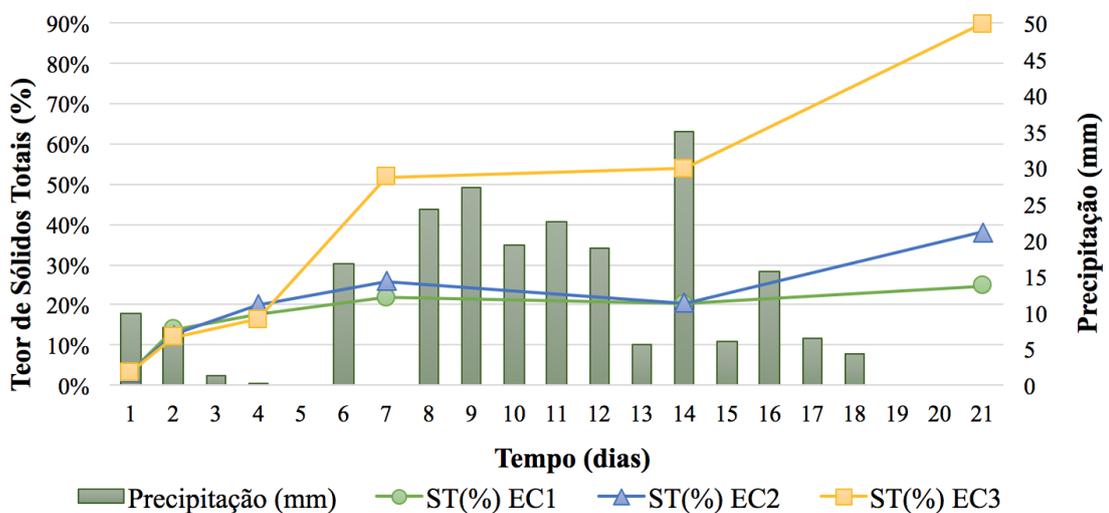


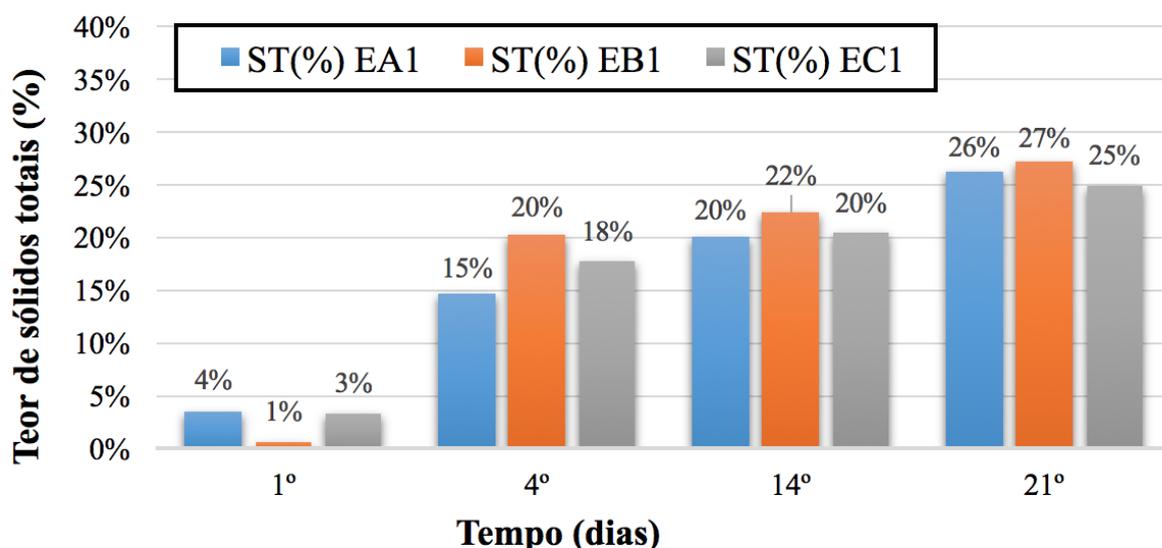
Figura 5.41 – Gráfico do teor de Sólidos Totais em % e da precipitação em mm, em função do tempo para os ensaios da série C.

De maneira geral, a evolução no teor de ST se mostrou bastante acentuada até o quarto dia, alcançando média de 14,79% para a série A, 22,06% para a série B, e 18,02% para a série C. No segundo dia os ensaios da série A alcançaram média de 14,65% e os da série C 12,79%, resultados semelhantes ao encontrado por Mortara (2011), que obteve cerca de 13% de teor de ST após 1 dia de ensaio.

Outra característica notada é que a altura da camada de lodo influencia no teor de ST obtido, de maneira que quanto menor essa altura maior é a tendência de se obter maior teor de ST na massa de lodo após o sétimo dia de experimento. Ou seja, os teores de ST no Leito 3, em todas as séries (A, B e C) se mantiveram mais altos após o sétimo dia.

Em relação à Figura 5.39, vale mencionar que, embora tenha sido registrada precipitação no 21º dia de experimento, esta não influenciou nos resultados, uma vez que ocorreu após o momento da coleta da amostra final para análise de ST.

A seguir avalia-se os nove ensaios, comparando os resultados do 1º, 4º, 14º e 21º dia, por leito. Ou seja, a Figura 5.42 apresenta comparação entre os ensaios do leito 1 das séries A, B e C, a Figura 5.43 compara os ensaios do leito 2 das séries A, B e C, e a Figura 5.44 os ensaios do leito 3 das séries A, B e C.



**Figura 5.42** – Comparação entre resultados do teor de Sólidos Totais em % dos ensaios no Leito 1 (h=50cm), EA1, EB1 e EC1.

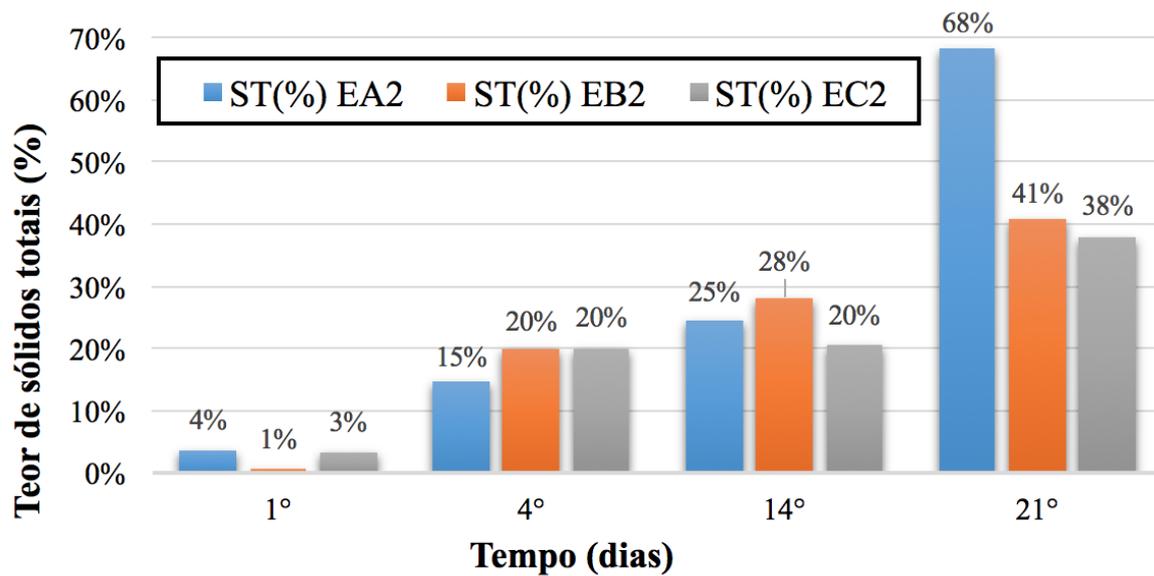


Figura 5.43 – Comparação entre resultados do teor de Sólidos Totais em % dos ensaios no Leito 2 (h=20cm), EA2, EB2 e EC2.

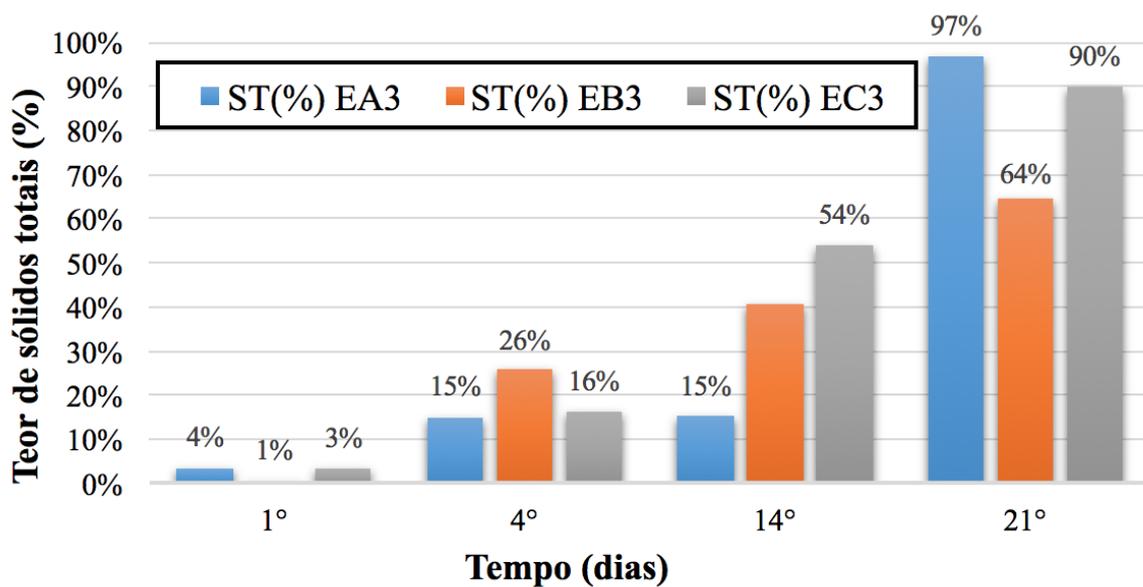


Figura 5.44 – Comparação entre resultados do teor de Sólidos Totais em % dos ensaios no Leito 3 (h=10cm), EA3, EB3 e EC3.

Em relação à Figura 5.42, percebe-se que há um comportamento bastante semelhante entre os resultados obtidos pelos ensaios A, B e C. Baseando-se em resultados de ensaios anteriores conduzidos por Coimbra e Achon (2016), Coimbra *et al.* (2016) e Achon *et al.* (2016), deduz-se que a variação entre as mantas geotêxteis não influencia no desempenho de perda de umidade durante a fase de evaporação, provocando alterações apenas na fase de

drenagem do LD. Analisando-se a evolução do aumento do teor de ST entre o 1º e 4º dia, percebe-se que enquanto para o EA1 essa evolução é de 11,14 pontos percentuais, no EB1 e no EC1 o teor de ST aumenta 19,65 e 14,38 pontos percentuais, respectivamente. Aliado a isso verificou-se precipitação de 49,4mm durante este período (1º ao 4º dia) do EA1, 14,20mm para o EB1, e 19,6mm para o EC1. A partir destes dados, é possível relacionar a precipitação elevada durante estes quatro primeiros dias com a menor evolução do teor de ST do ensaio A. Segundo Barroso (2007), a precipitação isoladamente não é determinante na velocidade de evaporação/secagem, no entanto, a permanência de elevada umidade relativa do ar devido à ocorrência de chuva pode prejudicar o processo de aumento no teor de ST. Isso pode explicar a discrepância dos resultados obtidos entre os ensaios. No que concerne à ação do revolvimento nos ensaios do leito 1, concluiu-se que foi fundamental para o desempenho do sistema. Ao final da fase de drenagem a superfície do lodo começa a sofrer influência das variáveis climáticas, torna-se possível a identificação de fissuras, e na camada superficial do lodo há a formação de uma crosta de lodo “seca”. Esta camada superficial impede que as camadas inferiores recebam insolação direta, o que prejudica a remoção de umidade. O fenômeno é caracterizado pela formação de uma camada “seca” na superfície e lodo visivelmente úmido e de cor escura na camada inferior, como apresentado na Figura 5.45. Logo, o revolvimento tem papel fundamental no combate à ocorrência deste fenômeno descrito, uma vez que traz para a superfície a camada mais úmida do lodo, permitindo insolação direta nas camadas que estavam abaixo, o que promove a perda de umidade da massa de lodo.

Além disso, o fato das TAS do EA1 e do EC1 serem aproximadamente seis vezes superior à do EB1, aparentemente não houve influência no desempenho dos ensaios, mostrando que maiores valores de TAS não representam obrigatoriamente prejuízo no desempenho de sistema de desaguamento natural em LD.

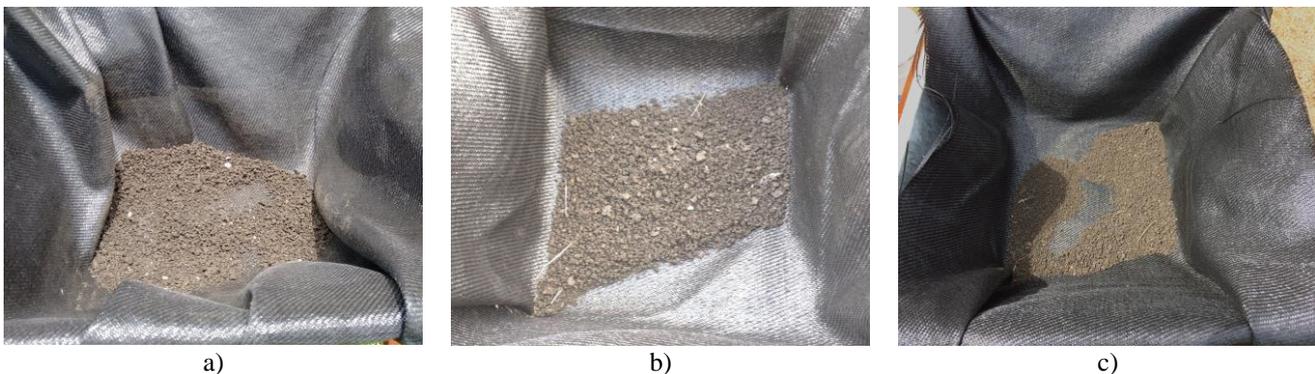


**Figura 5.45** – Camada superficial de lodo ressecada (a) e camada úmida logo abaixo (b).

Em relação ao gráfico da Figura 5.43 – comparação dos ensaios no leito 2 – também foi possível perceber que há certa semelhança na evolução do teor de ST, exceto para os resultados do 21º dia, que demonstra teor de ST bastante superior em EA2 (68,31% de ST). Quanto à tendência observada para os primeiros quatro dias dos ensaios no leito 1, esta se repetiu no leito 2, sendo que o EA2 aumentou teor de ST em 11,13 pontos percentuais, e o EB2 e EC2 apresentaram aumento de 19,29 e 16,82 pontos percentuais, neste período. Novamente, pode-se deduzir que o alto índice de precipitação e manutenção da umidade relativa do ar elevada podem ter prejudicado o desempenho da perda de umidade. Quanto à diferença notada nos resultados do 21º dia, acredita-se que algo semelhante no que se refere à manutenção da umidade relativa do ar pode ter ocorrido entre o 14º e o 21º dia durante os ensaios da série B e C. Enquanto o EA2 aumentou o teor de sólidos em 2,5 vezes do 14º ao 21º dia, o EB2 e o EC2 tiveram aumento de 12,76 e 17,57 pontos percentuais, respectivamente. Durante o ensaio A, a precipitação total nos últimos sete dias de ensaio foi de 14,2mm, com evento de precipitação apenas no último dia, o qual não teve influência no resultado por ocorrer após a realização da coleta. Durante os ensaios B e C o índice pluviométrico no período foi, respectivamente, de 159 e 32,8mm, além do fato de, em B, ter ocorrido eventos de precipitação nos sete últimos dias e, em C, em quatro dos sete últimos dias, o que pode ter favorecido a manutenção de umidade relativa do ar elevada, prejudicando

a perda de umidade da massa de lodo. Adversativamente a estas observações, supõe-se que a elevada precipitação não afetou consideravelmente a perda de umidade dos últimos sete dias do EA1, EB1 e EC1, o que pode indicar que a precipitação e a umidade podem ter relação também com a TAS. Os ensaios EA1, EB1 e EC1 tiveram TAS mais elevadas do que EA2, EB2 e EC2, sugerindo que quanto maior a TAS, menor é a influência da precipitação na perda de umidade. Todavia, esta tendência necessita ser verificada com a realização de mais ensaios e observação de mais resultados.

Por fim, quanto ao gráfico da Figura 5.44 – comparação dos ensaios no leito 3 – os resultados apresentaram discrepância maior do que a observada nos demais ensaios. Isso pode estar relacionado aos valores mais baixos de TAS, que foi o menor de cada série, sendo o EA3 com  $6,89\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$ , o EB3  $1,09\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$ , e o EC3  $6,32\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$ . Com menores TAS o volume de lodo desaguado gerado é menor, e com isso a confiabilidade das amostras diminui, pois há grande variação no resultado do teor de ST. A Figura 5.46 apresenta o aspecto do leito após 21 dias dos ensaios EA3, EB3 e EC3.



**Figura 5.46** – Aspecto do lodo no LD 3 após 21 dias nos ensaios EA3 (a), EB3 (b) e EC3 (c).

Além da pouca quantidade de amostra, o fato das amostras do 7º e 14º dia terem sido perdidas também prejudicou a comparação entre os ensaios. Analisando todos os ensaios pode-se perceber que quanto maior a TAS, mais lenta foi a evolução no teor de ST da torta de lodo no que se refere à fase de evaporação. Nas três séries de ensaio, o valor de ST obtido após 21 dias foi superior para os ensaios com a menor TAS da série (EA3, EB3 e EC3),

seguido pelos ensaios intermediários (EA2, EB2 e EC2) e, por último, os ensaios com a maior TAS, que foram EA1, EB1 e EC1.

Embora a TAS possa influenciar no desempenho da perda de umidade, é importante destacar que os valores obtidos para os três leitos foram próximos até o 4º dia em todas as séries. Também é importante notar que, apesar do EA1 possuir TAS quatro vezes maior do que o EA2, o desempenho de ambos foi semelhante até o 10º dia, diferenciando-se a partir de então. Algo similar pode ser observado com os ensaios EB1 e EB2, que se mantiveram próximos até o 7º dia de ensaio. Isso indica que, embora a TAS possua relação inversamente proporcional com o desempenho de perda de umidade, até certo ponto, pode ser melhor aplicar TAS mais elevadas devido aos valores próximos de ST obtidos.

Outro aspecto relevante é que a ETE cujo lodo foi coletado realiza desaguamento mecânico por meio do uso de centrífugas e alcança valores de ST da ordem de 20%. Nesse sentido, observou-se que após 14 dias todos os ensaios alcançaram valores próximos ou superiores ao obtido pela ETE, ressaltando que o desaguamento por LD não utiliza energia elétrica ou insumos químicos como forma de condicionamento.

Vale mencionar que Mortara (2011) alcançou entre 25 e 30% de teor de ST após 30 dias de exposição de lodo anaeróbio (proveniente de reator UASB), sem realização de revolvimento em protótipo de LD, utilizando TAS máxima de  $19,8\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$  e altura da camada de lodo de 50cm. Comparando estes resultados de Mortara (2011) com os ensaios EA1, EB1 e EC1 conduzidos nas mesmas condições, mas com realização de revolvimentos (2º, 4º, 7º 14º e 21º dias), em 21 dias (prazo menor que o utilizado por Mortara (2011)), obteve-se a mesma faixa de valores. O EA1, com TAS bastante superior ( $55,7\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$ ), alcançou ST de 26,13%, o EB1, com TAS de  $8,85\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$  alcançou 27,05% de ST, e o EC1, com TAS de  $51,15\text{kg}_{\text{ST}}/\text{m}^2$  alcançou 24,81% de ST. Logo, a partir deste comparativo, desconsiderando-se a influência climática, é possível confirmar e levantar como consideração final que a realização

de revolvimento na massa de lodo favorece a perda de umidade, obtendo-se um resíduo com maior teor de ST em período menor do que quando não se realiza o revolvimento.

### 5.2.2. Etapa de Secagem: Biossecagem

Os resultados referentes ao experimento de biossecagem de lodo anaeróbio consistiram basicamente de dados de caracterização do lodo desaguado, da mistura (L:E) e do produto final (lodo biosseco), além do monitoramento de alguns parâmetros ao longo do processo. As Tabelas 5.16 e 5.17 trazem os resultados obtidos na caracterização do lodo desaguado e da mistura (L:E), respectivamente.

**Tabela 5.16** – Resultados das análises de caracterização do lodo anaeróbio (UASB) desaguado em leito de drenagem, da ETE Monjolinho, São Carlos-SP.

Parâmetro	Unidades	Resultado	Método*
pH	unid. pH	7,7	4500 H <sup>+</sup> B <sup>a</sup>
Condutividade a 25°C	µs/cm	141,5	2510 B <sup>b</sup>
DQO	mg/L	2209	5220 D <sup>b</sup>
DBO	mg/L	624	5210 B <sup>b</sup>
N total	mg/L	110	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>b</sup>
DQO	mg/g	221	5220 D <sup>c</sup>
DBO	mg/g	62	5210 B <sup>c</sup>
N total	mg/g	11	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>c</sup>
COT	mg/g	133,4	5310-B <sup>c</sup>
C/N	adimensional	13,13	- <sup>c</sup>
DQO	mg/g	695	5220 D <sup>d</sup>
DBO	mg/g	195	5210 B <sup>d</sup>
N total	mg/g	34,4	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>d</sup>
COT	mg/g	293,6	5310-B <sup>d</sup>
C/N	adimensional	8,535	- <sup>d</sup>
ST	%	33,698	2540 G
SV	%	52,588	2540 E

\*APHA, AWWA, WEF (2012).

<sup>a</sup>10mL lodo/25mL água desmineralizada (amostras em suspensão lodo:água, 1:2,5).

<sup>b</sup>Amostras em suspensão aquosa 10g/L.

<sup>c</sup>Base úmida (amostras brutas) = teor de umidade 66,3%.

<sup>d</sup>Base seca (100°C).

**Tabela 5.17** – Resultados das análises de caracterização da mistura (L:E) utilizada no experimento de biossecagem.

Parâmetro	Unidades	Resultado	Método*
pH	unid. pH	7,3	4500 H <sup>+</sup> B <sup>a</sup>
Condutividade a 25°C	µs/cm	137,1	2510 B <sup>b</sup>
DQO	mg/L	1994	5220 D <sup>b</sup>
DBO	mg/L	478	5210 B <sup>b</sup>
N total	mg/L	95	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>b</sup>
DQO	mg/g	199	5220 D <sup>c</sup>
DBO	mg/g	48	5210 B <sup>c</sup>
N total	mg/g	9,5	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>c</sup>
COT	mg/g	178,8	5310-B <sup>c</sup>
C/N	adimensional	18,82	- <sup>c</sup>
DQO	mg/g	466	5220 D <sup>d</sup>
DBO	mg/g	102	5210 B <sup>d</sup>
N total	mg/g	22,2	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>d</sup>
COT	mg/g	321,5	5310-B <sup>d</sup>
C/N	adimensional	14,48	- <sup>d</sup>
ST	%	39,963	2540 G
SV	%	61,427	2540 E

\*APHA, AWWA, WEF (2012).

<sup>a</sup>10mL lodo/25mL água desmineralizada (amostras em suspensão lodo:água, 1:2,5).

<sup>b</sup>Amostras em suspensão aquosa 10g/L.

<sup>c</sup>Base úmida (amostras brutas) = teor de umidade 66,3%.

<sup>d</sup>Base seca (100°C).

Comparando-se os resultados das Tabelas 5.16 e 5.17 com os dados levantados e compilados na Tabela 3.9 deste documento, nota-se que o teor de ST do lodo desaguado utilizado no experimento, desconsiderando os valores propositalmente obtidos por Yang, Zhang e Jahng (2014), foi mais elevado (33,698% de ST), uma vez que os da Tabela 3.9 variaram de 11,75 a 20%. Quanto aos SV do lodo desaguado, percebe-se que o lodo anaeróbio desaguado em sistema natural resultou em teor de SV menor (52,588%) que o intervalo de variação levantado na literatura consultada (62,1 a 72,2%), o que significa menor presença de matéria orgânica presente no resíduo utilizado para o procedimento experimental. A respeito da relação C/N, na literatura consultada este parâmetro variou de 5,71 a 7,82, e no lodo utilizado obteve-se 13,13, quando calculada a razão em base úmida, e 8,535, quando em base

seca (ST). Em ambas situações os resultados foram superiores aos levantados nos artigos científicos, demonstrando maior teor de Carbono ou menor teor de Nitrogênio na proporção.

Realizando-se o mesmo comparativo com a literatura consultada para os resultados da mistura (L:E), compilou-se a Tabela 5.18 para facilitar visualização.

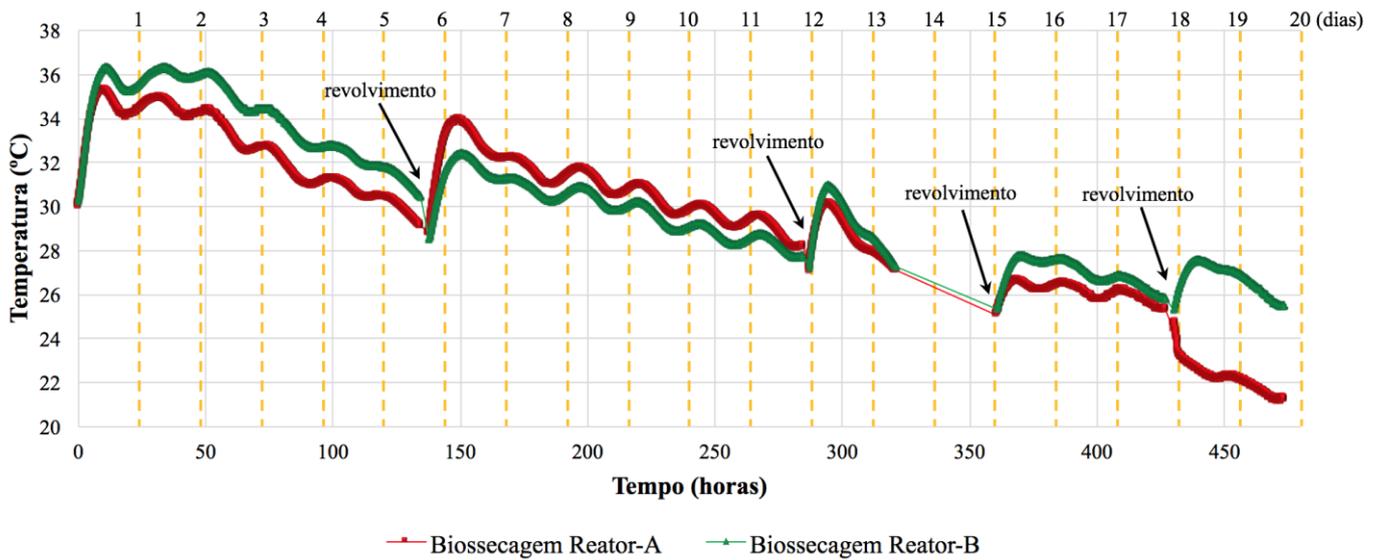
**Tabela 5.18** – Comparação dos dados da mistura (L:E) obtidos para o experimento com os levantados na literatura consultada (Tabela 3.9).

	Teor de ST (%)	Teor de SV (%)	Relação C/N
Mistura (experimento)	39,963	61,427	18,82 <sub>(b.u.)</sub> e 14,48 <sub>(ST)</sub>
Varição literatura consultada	21,8 a 41*	71,2 a 95,52	8,68 a 12,05

\*Desconsiderando-se os obtidos propositalmente por Yang, Zhang e Jahng (2014), em investigação da influência da umidade inicial da mistura (L:E) no processo de biossecagem.

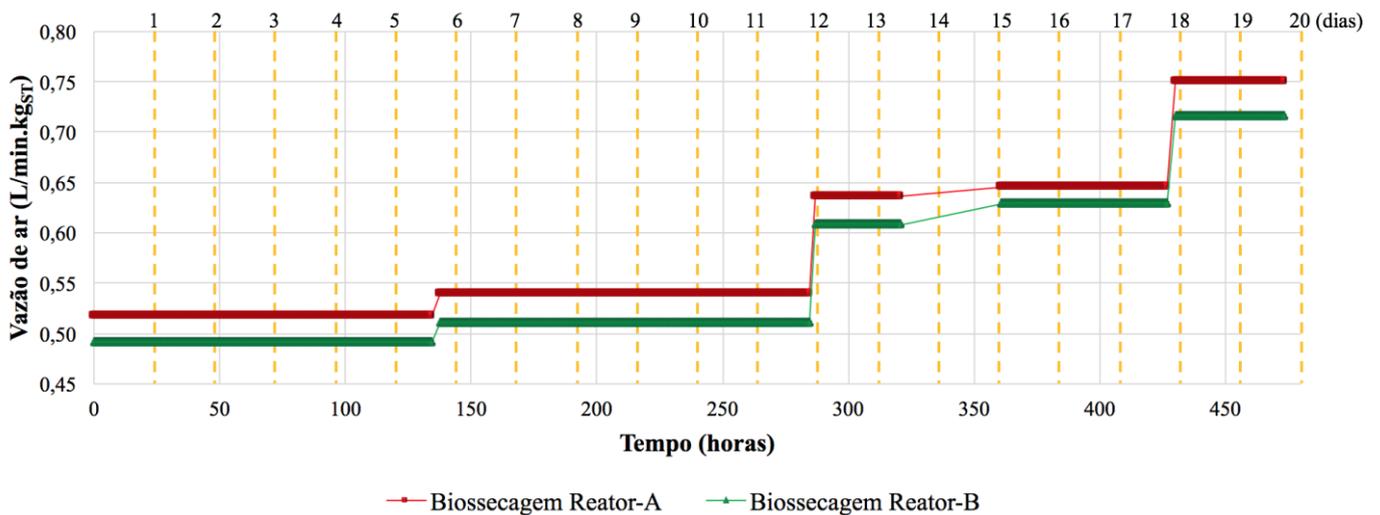
Observa-se que, embora o teor de ST da mistura encontra-se dentro da faixa de variação levantada na literatura, e dentro do intervalo ótimo sugerido por Yang, Zhang e Jahng (2014), o teor de SV e a relação C/N está em desacordo à faixa compilada na Tabela 3.9. Assim, pode-se afirmar que a amostra submetida ao procedimento de biossecagem estava com menor teor de matéria orgânica (menos SV) e maior teor de carbono ou menor teor de nitrogênio em relação aos experimentos já publicados. Isso pode ser atribuído à realização da etapa de desaguamento por processo natural ou ao fato de estar sendo utilizado lodo proveniente de processo anaeróbio de tratamento, diferentemente do encontrado na literatura: desaguamento mecânico e lodo misturado (anaeróbio/anóxico/aeróbio).

No que concerne aos resultados obtidos ao longo do tempo de experimento, estes estão apresentados em forma de gráficos nas Figuras 5.47, 5.48 e 5.49, relacionando temperatura, vazão de ar injetado e teor de ST, respectivamente.



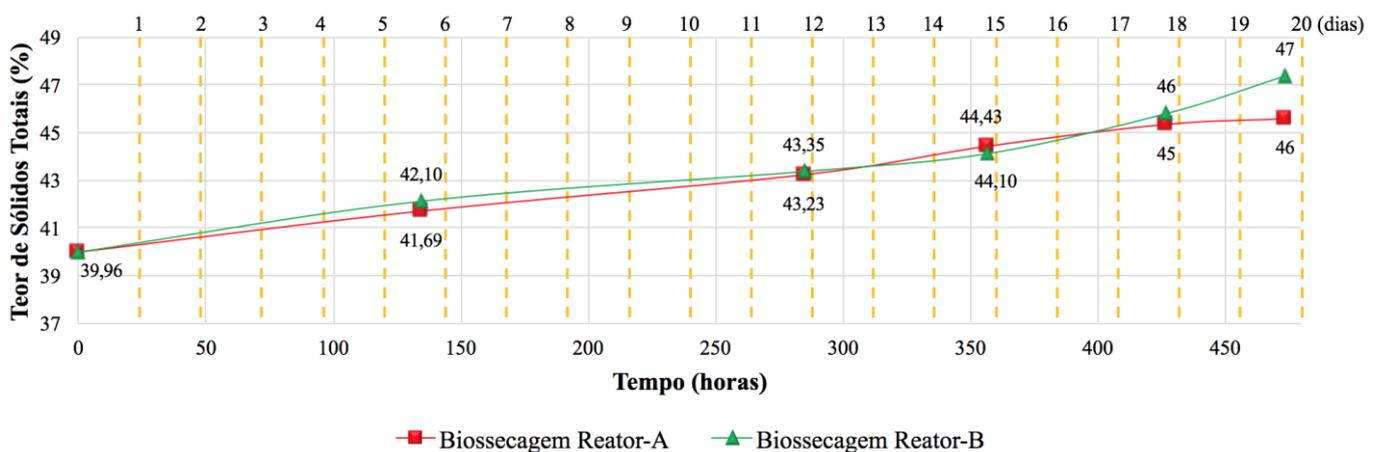
**Figura 5.47** – Temperatura (°C) x tempo (h) ao longo do experimento de biossecagem para o Reator A e Reator B.

Notas de explicação: Linhas secundárias do eixo horizontal (amarelo) representando o final de cada dia do experimento, totalizando 20 dias. As linhas foram mantidas apenas com o objetivo de facilitar orientação visual.



**Figura 5.48** – Vazão de ar (L/min.kg<sub>ST</sub>) x tempo (h) ao longo do experimento de biossecagem para o Reator A e Reator B.

Notas de explicação: Linhas secundárias do eixo horizontal (amarelo) representando o final de cada dia do experimento, totalizando 20 dias. As linhas foram mantidas apenas com o objetivo de facilitar orientação visual.



**Figura 5.49** – Teor de Sólidos Totais (%) x tempo (h) ao longo do experimento de biossecagem para o Reator A e Reator B.

Notas de explicação: Linhas secundárias do eixo horizontal (amarelo) representando o final de cada dia do experimento, totalizando 20 dias. As linhas foram mantidas apenas com o objetivo de facilitar orientação visual.

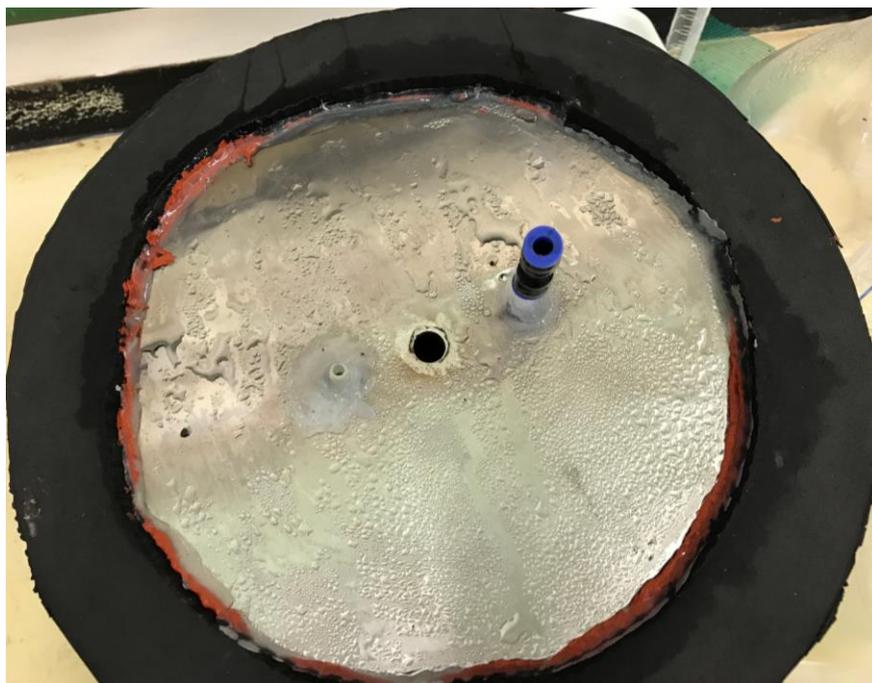
Em relação à Figura 5.47, embora o processo não tenha resultado no perfil de temperatura ilustrando as quatro fases de temperatura do processo de biossecagem, conforme descrito por Cai *et al.* (2016b), é possível afirmar que ocorreu atividade biológica provocando o aquecimento interno nos reatores, e favorecendo evaporação de água presente no lodo. Nota-se que o aumento mais expressivo da temperatura ocorreu ao longo dos dois primeiros dias de experimento e, sempre que realizado um novo revolvimento, retomou-se novo aumento da temperatura da massa interna. Em relação a esta situação de aumento da temperatura após revolvimento, pode-se afirmar que é consequência de homogeneização da massa e aumento do espaço de ar livre (EAL) na massa, pois sempre quando se retornava a massa para o reator após o revolvimento esta ocupava maior espaço interno do que quando se abria o reator para realizar o revolvimento, a qual se encontrava mais compactada. Logo, uma vez que existia maior EAL na massa, mais facilitado era o contato do oxigênio com os micro-organismos presentes e, conseqüentemente, mais eficiente e favorecida era a ocorrência de atividade biológica e liberação de energia em forma de calor. Pela análise da Tabela 5.19, que apresenta a medida entre da parte superficial da massa interna aos reatores e a borda do reator antes e após cada revolvimento, é possível comprovar a questão de maior EAL a cada revolvimento realizado.

**Tabela 5.19** – Medida entre superfície da massa interna ao reator e a borda do reator antes e após os respectivos revolvimentos, para os reatores A e B.

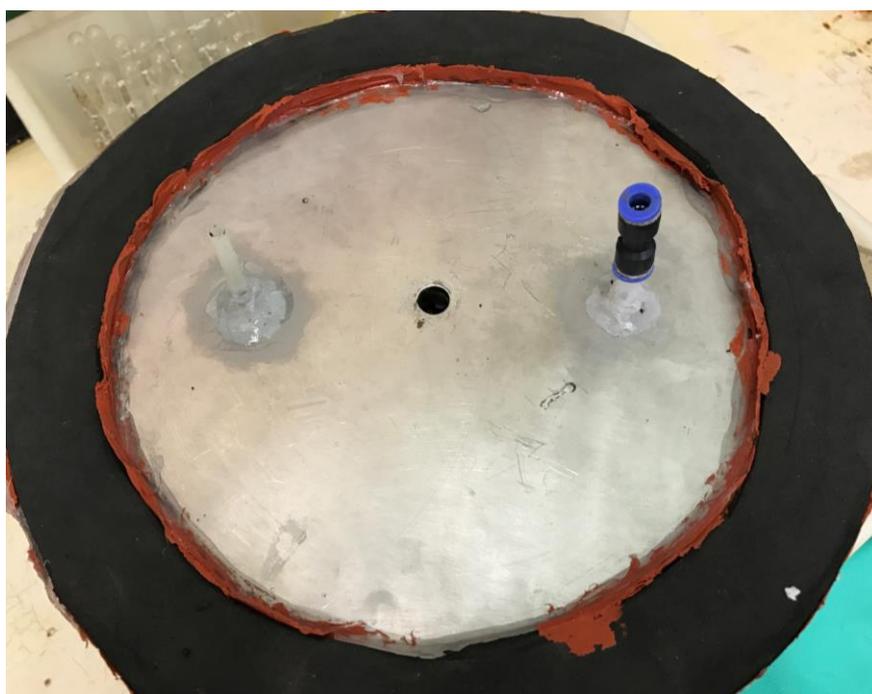
		Revolvimento					Fim
		Início	6º dia	12º dia	15º dia	18º dia	
Reator A	Antes (cm)	-	8,5	9,0	9,5	10,5	12,0
	Após (cm)	6,5	8,0	7,5	8,5	10,0	-
Reator B	Antes (cm)	-	9,0	9,5	9,0	10,0	10,0
	Após (cm)	6,0	7,5	8,0	8,0	9,5	-

Ainda em relação à Figura 5.47, os dois reatores tiveram comportamento de temperatura muito semelhantes, exceto após o revolvimento do 18º dia. A maior temperatura alcançada no Reator A foi 35,32°C e, no Reator B, 36,31°C. Observa-se também que ao longo do tempo de experimento a expressividade do aumento da temperatura a cada revolvimento se

reduziu, o que está de acordo com a literatura consultada, que afirma sobre maiores picos de temperatura no início do experimento de biossecagem, com tendência a menor expressividade de aumento até chegar ao fim do processo. Em relação à falta de dados nas proximidades do 14º dia de experimento até o revolvimento do 15º dia, foi consequência de queda de energia elétrica no laboratório por período maior que o da sustentação da bateria do computador que monitorou os dados. Por fim, acerca do perfil antagônico entre os reatores A e B após o revolvimento do 18º dia, o que se notou após a abertura dos reatores no fim do experimento foi que não havia umidade acumulada na tampa do Reator A, como havia sido notado no momento de abertura dos reatores em todos os revolvimentos anteriores. Inclusive, em relação à esta situação de condensação da água presente no lodo (observada na parte interna da tampa dos reatores), em alguns casos de abertura do reator para realização do revolvimento, a água escorria pela tampa e pingava, dada a quantidade acumulada, podendo-se afirmar sobre deficiência do sistema no direcionamento e favorecimento da saída de água/vapor de dentro do reator. Neste sentido, vale ressaltar que, conforme mencionado na literatura, o ar injetado no reator, por não ser 100% seco, pode contribuir para aumento, ainda que mínimo, da umidade interna. Logo, quanto maior a vazão de ar injetado, maior é a tendência de se adicionar umidade internamente ao reator. As Figuras 5.50 e 5.51 ilustram a umidade observada na parte interna da tampa dos reatores quando da realização da abertura para fazer o revolvimento, e o aspecto “seco” da parte interna da tampa do Reator A, quando foi aberto ao final do experimento, respectivamente.



**Figura 5.50** – Condensação de água evaporada da massa na parte interna da tampa dos reatores A e B durante o experimento.



**Figura 5.51** – Aspecto “seco” da parte interna da tampa do Reator A quando da abertura no fim do experimento.

Em relação à Figura 5.48, observa-se que foram realizadas alterações na vazão de ar injetado, mas que as variações foram menores que  $0,25\text{L}/\text{min.kgST}$  para cada reator e que, ao longo do experimento, se mantiveram dentro do intervalo encontrado na literatura ( $0,244$  a  $3,0\text{L}/\text{min.kgST}$ ). O Reator A foi iniciado com vazão de ar de  $0,52\text{L}/\text{min.kgST}$  e recebeu

alterações a cada revolvimento, passando a 0,54; 0,63; 0,65; e 0,75L/min.kg<sub>ST</sub>, no 6°, 12°, 15° e 18° dias, respectivamente. O Reator B se iniciou com vazão de ar de 0,49L/min.kg<sub>ST</sub> e também recebeu alterações a cada revolvimento, passando a 0,51; 0,61; 0,63; e 0,72L/min.kg<sub>ST</sub>, no 6°, 12°, 15° e 18° dias, respectivamente. Os aumentos na vazão de ar injetado realizados ocorreram com o objetivo de favorecer o contato com o oxigênio pelos micro-organismos presentes e facilitar a ocorrência de reações aeróbias. Tais aumentos se basearam na literatura consultada e em experimento anterior realizado com vazão de ar controlada pela taxa de consumo de oxigênio (*OUR*), que ilustrou aumento na demanda de oxigênio ao longo do experimento para manutenção do processo.

No que se refere à Figura 5.49, nota-se que até o 18° dia o teor de ST nos reatores aumentou de maneira semelhante, com média aproximada de aumento de 0,302% por dia para o Reator A, e 0,324% para o Reator B. Após o revolvimento do 18° dia, dada a situação de temperatura relatada e observada na Figura 5.47, constatou-se que o Reator B se manteve em processo de biossecagem, aumentando seu teor de ST, ao passo que o Reator A registrou aumento praticamente insignificante. A esta resposta se atribui como consequência a provável inexistência de atividade biológica no Reator A e secagem ocorrida apenas por convecção (teor de ST final de 45,6%). Já o Reator B, por se manter em processo de biossecagem e, portanto, com ocorrência de atividade biológica e liberação de calor, alcançou teor de ST ao final do experimento de 47,4%. As Figuras 5.52, 5.53, 5.54 e 5.55 ilustram o aspecto da mistura no início do experimento, os reatores A e B abertos ao final do experimento, e aspecto da massa ao final do experimento para o Reator A e para o Reator B, respectivamente.



**Figura 5.52** – Realização da mistura L:E para início do experimento.



**Figura 5.53** – Abertura dos reatores A (esquerda) e B (direita) ao final do experimento.



**Figura 5.54** – Aspecto do resíduo do Reator A ao final do experimento.



**Figura 5.55** – Aspecto do resíduo do Reator B ao final do experimento.

Analisando-se as figuras apresentadas, é possível perceber que o lodo desaguado (Figura 4.22) e a mistura L:E (Figura 5.52) tiveram seus aspectos alterados e se apresentaram mais “secos” ao final da biossecagem. Em relação às análises realizadas no produto biosseco, as Tabelas 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23 trazem os resultados dos variados parâmetros analisados. Na Tabela 5.20 recorda-se os teores de ST e SV da mistura inicial utilizada para ambos reatores e mensura-se os teores de ST e SV separadamente para o Reator A e Reator B ao final do processo.

**Tabela 5.20** – Resultados das análises de teor de ST e SV para a mistura (L:E) antes do início do experimento e para o produto biosseco dos reatores A e B, separadamente.

Reator	Parâmetro	Unidades	Resultado	Método*
Mistura (início)	ST	%	39,963	2540 G
Mistura (início)	SV	%	61,427	2540 E
A (fim)	ST	%	45,591	2540 G
A (fim)	SV	%	54,683	2540 E
B (fim)	ST	%	47,367	2540 G
B (fim)	SV	%	54,665	2540 E

\*APHA, AWWA, WEF (2012).

Analisando os resultados da Tabela 5.20, verifica-se que, embora tenha sido inferido que não ocorreu biossecagem no Reator A após o revolvimento do 18º dia, sendo mantido o processo apenas no Reator B, os valores finais de teor de SV do produto biosseco foram muito próximos em ambos reatores, ocorrendo maior remoção de SV no Reator B (54,665%

de SV) em relação ao Reator A (54,683% de SV), o que pode ser justificado pelo fato de ser mantido o processo de biossecagem neste reator por dois dias a mais que no Reator B, mesmo ocorrendo mínima diferença de valor. Assim, uma vez que apenas os resultados do Reator B puderam ser considerados como resultados de processo de biossecagem ao longo de 20 dias, os parâmetros analisados e apresentados nas Tabelas 5.21, 5.22 e 5.23 se referiram a amostras coletadas do produto biosseco do Reator B, apenas.

**Tabela 5.21** – Resultados das análises de caracterização do produto biosseco do Reator B após 20 dias de processo de biossecagem.

Parâmetro	Unidades	Resultado	Método*
pH	unid. pH	5,7	4500 H <sup>+</sup> B <sup>a</sup>
Condutividade a 25°C	µs/cm	323	2510 B <sup>b</sup>
DQO	mg/L	3180	5220 D <sup>b</sup>
DBO	mg/L	445	5210 B <sup>b</sup>
N total	mg/L	276	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>b</sup>
DQO	mg/g	318	5220 D <sup>c</sup>
DBO	mg/g	45	5210 B <sup>c</sup>
N total	mg/g	27,6	4500-N <sub>org</sub> , NH <sub>3</sub> C, NO <sub>2</sub> B <sup>c</sup>
COT	mg/g	290,1	5310-B <sup>c</sup>
C/N	adimensional	10,51	- <sup>c</sup>

\*APHA, AWWA, WEF (2012).

<sup>a</sup>10mL lodo/25mL água desmineralizada (amostras em suspensão lodo:água, 1:2,5).

<sup>b</sup>Amostras em suspensão aquosa 10g/L.

<sup>c</sup>Base seca (100°C).

No que se refere à Tabela 5.21, vale destacar que a relação C/N foi reduzida quando se compara o seu valor (em base seca) no início do experimento (14,48) com o produto biosseco (10,51), o que permite inferir que ocorreu consumo de carbono da massa ao longo do processo. Ressalta-se também a redução do valor de pH, que antes de ser processada, a mistura L:E possuía um valor de 7,3 e, após processada, 5,7.

**Tabela 5.22** – Resultados das análises de sulfito, sulfato e metais pesados do produto biosseco do Reator B após 20 dias de processo de biossecagem.

Parâmetro	Unidades	Resultado	Método
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	< L.Q. <sup>1</sup>	4500-SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> B <sup>a</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	61,8	4500-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> E <sup>a</sup>
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg/g	< L.Q. <sup>2</sup>	4500-SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> B <sup>b</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/g	6,2	4500-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> E <sup>b</sup>
Cr	mg/g	0,28	3030 B, G; 3111 B; 3112 B <sup>b</sup>
Pb	mg/g	< L.Q. <sup>3</sup>	3030 B, G; 3111 B; 3112 B <sup>b</sup>
Mn	mg/g	< L.Q. <sup>4</sup>	3500-Mn B <sup>b</sup>
Zn	mg/g	0,98	3030 B, G; 3111 B; 3112 B <sup>b</sup>
Hg	mg/g	0,02	3030 B, G; 3111 B; 3112 B <sup>b</sup>

\*APHA, AWWA, WEF (2012).

<sup>a</sup>10mL lodo/25mL água desmineralizada (amostras em suspensão lodo:água, 1:2,5).

<sup>b</sup>Amostras em suspensão aquosa 10g/L.

<sup>c</sup>Base seca (100°C).

<sup>1</sup>L.Q.: Limite de Quantificação de 2mg SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>/L.

<sup>2</sup>L.Q.: Limite de Quantificação de 2mg SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>/L.

<sup>3</sup>L.Q.: Limite de Quantificação de 0,1mg Pb/g.

<sup>4</sup>L.Q.: Limite de Quantificação de 0,5mg Mn/g.

A respeito da Tabela 5.22, Shao *et al.* (2010) alertam sobre potencial de emissão de alguns elementos e substâncias quando da realização de incineração de lodo de esgoto ou lodo de esgoto misturado a outro material. Dentre os elementos que destacam estão os metais pesados analisados na Tabela 5.22 acrescidos do cobre (Cu) e do ácido clorídrico (HCl). Contudo, em seus estudos, Shao *et al.* (2010) trazem valores referentes a estes parâmetros apenas no que se refere ao gás derivado da incineração, e não da presença destes elementos e substâncias no produto final, realizando inferências acerca do potencial de emissão a partir de sua queima. Dessa forma, a partir dos resultados obtidos na Tabela 5.22, no caso de incineração do produto final biosseco do experimento conduzido, devem receber maior atenção o sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), seguido do zinco (Zn), cromo (Cr) e mercúrio (Hg) presentes no produto biosseco e identificados nas análises laboratoriais realizadas em maior quantidade.

**Tabela 5.23** – Resultados das análises elementares (C, H, N) e de Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) do produto biosseco do Reator B após 20 dias de processo de biossecagem.

Parâmetro	Unidades	Resultado	Método
C	% m/m	30,8 (±0,5)	Analisador Elementar CHN Perkin Elmer 2400 II <sup>a</sup>
H	% m/m	4,8 (±0,1)	Analisador Elementar CHN Perkin Elmer 2400 II <sup>a</sup>
N	% m/m	3,2 (±0,1)	Analisador Elementar CHN Perkin Elmer 2400 II <sup>a</sup>
PCS	kJ/kg <sub>ST</sub>	14661	D 407-44, D271-58, D240-57 T (ASTM) <sup>a</sup>
PCI (calculado)	kJ/kg <sub>ST</sub>	14659,915	Equação de Kollman e Cotê (1968) <sup>1</sup> e Equação de <i>Dulong-Petit Law</i> citado por Bianchini <i>et al.</i> (2015) <sup>2</sup>

ASTM: *American Society for Testing Materials*.

<sup>a</sup>Base seca (100°C).

<sup>1</sup>Eq. (Kollman e Cotê, 1968):  $PCI = PCS - ((600 \times 9 \times H) - 100)$ , onde PCS está em kcal/kg, PCI em kcal/kg, H corresponde ao teor elementar de hidrogênio (% m/m), 600 corresponde ao calor de condensação da água a 0°C, e 9 representa a quantidade de água (em kg) que se formam ao oxidar um quilo de hidrogênio.

<sup>2</sup>Eq. (Dulong-Petit Law citado por Bianchini *et al.*, 2015):  $PCI = PCS - ((H \times 22604)/100)$ , onde PCS está em kJ/kg, PCI em kJ/kg, e o H corresponde ao teor elementar de hidrogênio (% m/m).

Acerca da Tabela 5.23, merecem destaque e discussão os resultados obtidos referentes ao Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI). Segundo Nogueira e Lora (2003), o PCI representa o calor efetivamente possível de ser utilizado nos combustíveis, enquanto o PCS tem seu valor elevado em torno de 10 a 20%. Assim, analisando-se estes valores obtidos e comparando-os com os encontrados na literatura (ZHAO *et al.*, 2010; e WINKLER *et al.*, 2013 – Tabela 3.9), observa-se que o valor do PCS obtido no experimento (14661kJ/kg<sub>ST</sub>) está muito próximo do valor obtido por Zhao *et al.* (2010) e estimado para o final do ensaio conduzido por eles (14100kJ/kg<sub>ST</sub>), está acima do valor obtido por Winkler *et al.* (2013) (10400kJ/kg<sub>ST</sub>), e está abaixo do valor obtido para o experimento conduzido na UAB (14775,59kJ/kg<sub>ST</sub> para o Reator Biossecagem I e 17551,88kJ/kg para o Reator Biossecagem II). Contudo, ainda assim constitui-se um valor atrativo no que se refere ao seu aproveitamento para incineração e geração de energia. No que se refere ao PCI, apenas Winkler *et al.* (2013) apresentaram este parâmetro, sendo inferior (7700kJ/kg<sub>ST</sub>) ao calculado para o experimento (14659,915kJ/kg<sub>ST</sub>). Para confirmar a viabilidade da utilização deste produto como material para geração de energia por meio de incineração, apresenta-se a Tabela 5.24 compilada por Winkler *et al.* (2013), contendo valores de PCS e PCI de alguns materiais comumente utilizados em estações de incineração para geração de energia.

**Tabela 5.24** – Valores de PCS e PCI de alguns materiais comumente utilizados em estções de incineração para geração de energia.

Material	PCI (kJ/kg)	PCS (kJ/kg)	Referência
Aglomerados de biomassa	9500	10450	KEMA (1999)
Lodo de esgoto seco (térmico)	12500	13585	EPON e KEMA (2000)
Resíduo municipal com plástico	12300	14000	Venendaal (1994)
Carvão marrom	10100	11900	Hein (1994)
Carvão antrácito	33200	33900	Van Doorn <i>et al.</i> (1996)

Fonte: Adaptado de Winkler *et al.* (2013).

Por fim, em relação à análise de PCS realizada para a amostra de produto biosseco do reator Biossecagem II, o aspecto final do resíduo após a queima sugere a presença de metais pesados na amostra, o que pôde ser comprovado nas análises de metais realizadas e apresentadas na Tabela 5.22. A Figura 5.56 apresenta foto da amostra na cápsula após a análise de PCS.

**Figura 5.56** – Aspecto final da amostra de lodo biosseco submetida à análise de PCS.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos estudos desenvolvidos, percebe-se que muitas são as possibilidades de gestão e gerenciamento da fase sólida do tratamento em uma ETE, e a premissa mais importante a ser adotada é que o lodo de ETE deve ser sempre considerado como resíduo, para que se possa utilizar suas características em oportunidades de aproveitamento, conforme diretrizes da PNRS (Lei 12.305/2010).

Muitas são as etapas que podem compor o processo de remoção de água de lodo de ETE, sendo necessário adequar os métodos e tecnologias aplicadas a cada etapa para melhor alcançar os objetivos traçados para a gestão do lodo.

Para os estudos da etapa de desaguamento desenvolvidos com utilização de sistema natural de leito de drenagem, no que concerne à fase de drenagem do sistema, embora as características qualitativas do líquido drenado da manta HaTe<sup>®</sup> 55/55 UV tenham sido inferiores às das outras mantas, no caso de aplicação em escala real, acredita-se que, por ter apresentado maior capacidade de drenagem, sugere-se sua adoção, uma vez que o líquido drenado pode retornar para o início do tratamento da ETE. Quanto à fase de evaporação, dada a dependência de condições climáticas, um aspecto importante foi a realização de revolvimento, que acelera o processo de perda de umidade da torta de lodo que não é passível de ser drenada. Complementarmente, destaca-se que o uso do LD permitiu obter resíduo desaguado nas mesmas condições de teor de ST que o uso da centrífuga implantada na ETE após 14 dias de exposição. Logo, mesmo com intervenção de variáveis climáticas que possam ter atrapalhado o processo de perda de umidade nos ensaios conduzidos, o LD pode ser uma alternativa para a ETE, podendo resultar em economia de energia elétrica, já que o consumo energético do revolvimento periódico pode ser inferior ao do funcionamento das centrífugas aliado aos gastos com condicionamento químico, que é necessário para desaguamento em centrífugas.

Vale ressaltar que, por se trabalhar com lodo de reator UASB nos ensaios de desaguamento em LD, ou seja, lodo adensado e digerido (Mortara, 2011), segundo Spellman (1997) os resultados de desaguamento de lodo digerido são melhores que de lodo não digerido. Em contrapartida, Samudio (1993) afirma que, admitindo grau de mineralização equivalente, quando a digestão é pela via aeróbia a eficiência da drenagem de água em sistemas naturais é muito superior quando comparada com lodo digerido anaerobicamente, que foi o lodo estudado nesta pesquisa com LD. Logo, a partir desta afirmação, acredita-se que os resultados de remoção de água poderiam ser ainda melhores se tivesse sido utilizado lodo digerido aerobicamente nos protótipos de LD, principalmente no que se refere aos estudos de drenagem.

A respeito dos experimentos de biossecagem, notou-se que este pode ser e, inclusive, já tem sido um método atrativo e viável para a etapa de secagem de lodo de ETE. Quando se utilizou lodo anaeróbio desaguado em sistema natural (LD), embora o processo não tenha se comportado como relatado na bibliografia consultada no que se refere às fases de temperatura (CAI *et al.*, 2016a), ocorreu atividade biológica na massa (L:E), provocando a evaporação de parte da água presente na amostra, permitindo-se obter um produto final com maior teor de ST, com possibilidade de aproveitamento energético, dados os resultados de PCS e PCI.

Acredita-se que o fato de ter sido utilizado sistema de desaguamento natural, com período de exposição do lodo de 33 dias em LD, possa ter sido a razão de menor teor de SV no lodo e na mistura (L:E), o que resultou em menos atividade biológica e, portanto, menor aumento da temperatura da massa, alcançando apenas o estágio mesofílico. Outra hipótese que pode justificar tal comportamento do processo é o fato de ter sido utilizado lodo anaeróbio. Ambas situações (utilização de lodo desaguado em sistema natural e utilização de lodo anaeróbio) ainda não foram relatadas na literatura referente ao processo de biossecagem, dado o nível de maturidade do processo.

Em relação aos resultados de biossecagem durante o período no exterior, além de se obter um produto biosseco com valor energético agregado (devido ao alto PCS), o processo teve comportamento semelhante ao relatado na literatura e permitiu identificar a importância da realização do revolvimento durante a biossecagem, pois além de conferir maior homogeneidade para a amostra (evitar estratificação), permite que exista mais espaço de ar livre (EAL), o que favorece a retomada do aumento da temperatura e, portanto, maior remoção de umidade.

Por fim, é possível afirmar que os estudos conduzidos para as etapas de desaguamento e secagem do lodo de esgoto se mostraram positivos, podendo ser alternativas a serem adotadas para o tratamento da fase sólida em ETE. Além disso, conforme relatado acerca das visitas técnicas realizadas, o tratamento deste resíduo pode gerar receita, dado o valor agregado existente (Combustível Derivado de Resíduo – CRD), o que o descaracteriza como um problema, sendo promovido a oportunidade de negócio.

## 7. RECOMENDAÇÕES

As recomendações levantadas após o desenvolvimento deste trabalho foram divididas em recomendações para trabalhos futuros com LD e biossecagem e recomendações para construção de experimento de biossecagem, conforme itens a seguir.

### 7.1. PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas recomendações ou sugestões de estudos para trabalhos futuros referentes à etapa de desaguamento utilizando leito de drenagem que podem ser citadas são:

- utilizar outros tipos de mantas geotêxteis com altura da camada de lodo com maior variabilidade;
- realizar ensaios de LD com e sem cobertura simultaneamente para se afirmar com mais propriedade sobre a influência da precipitação e importância da umidade relativa do ar;
- realizar ensaios com maior frequência ou com frequência regular de revolvimento comparando com LD sem revolvimento (sugestão: realizar revolvimentos a cada 2, 3 ou 4 dias);
- realizar ensaios no LD com lodo aeróbio e anaeróbio para comparar os resultados.

Algumas recomendações ou sugestões de estudos para trabalhos futuros referentes à etapa de secagem utilizando o processo de biossecagem que podem ser citadas são:

- aplicar lodo anaeróbio (ex. proveniente de UASB) desaguado em sistema natural (ex. LD) e em sistema mecânico (ex. centrífuga) simultaneamente e comparar os resultados para poder afirmar se o desaguamento natural reduz o teor de matéria orgânica (SV) do lodo;
- aplicar mesmas condições para lodo aeróbio e anaeróbio, comparativamente;
- realizar ensaios com lodo biosseco em proporção na mistura, seja lodo anaeróbio ou aeróbio (ex. a proporção utilizada e sugerida por Cai *et al.* (2012, 2013 e 2016a) e Cai,

Gao e Hong (2015), sendo 3:2:1(v/v) para lodo desaguado:lodo biosseco:madeira triturada);

- variar o(s) estruturante(s) aplicado(s), suas dimensões e proporções, comparativamente;
- variar a vazão de ar aplicada, comparativamente;
- sempre tentar realizar o controle de todas variáveis levantadas na Tabela 3.9 desta tese, quando da realização de experimento de biossecagem.

## **7.2. PARA CONSTRUÇÃO DE EXPERIMENTO DE BIOSSECAGEM**

As Figuras 4.26 e 4.31 deste documento ilustram o que compõe a construção de experimento de biossecagem. Assim, a partir dos relatos detalhados nos métodos dos ensaios de biossecagem, e da experiência de ter conduzido ensaios deste processo em momentos e locais distintos, destaca-se alguns cuidados que devem ser observados:

- vedação da tampa: é importante que não exista vazamento de ar em nenhum local do reator após fechado. O local de saída de ar de dentro do reator deve ser controlado e, após injetar vazão de ar no reator, deve-se comprovar a vedação aplicando a mínima vazão possível no rotâmetro e verificando na mangueira de saída de ar se existe vazão de ar de saída. Para tanto, recomenda-se colocar a ponta da mangueira em um béquer com água e verificar a ocorrência de bolhas de ar. Se não ocorrer a formação de bolhas de ar, significa que o ar está escapando por outro local que não o controlado pelo sistema de saída do reator;
- considerar o diâmetro da haste do sensor de temperatura no dimensionamento do local de inserção e fixação e não permitir vazamento de ar por este local, tanto na parte externa como interna da tampa;
- posicionar a ponta do sensor de temperatura para ter contato com o meio da massa de L:E (mistura), ou seja, fazer com que a temperatura seja a leitura do valor de

temperatura na metade da altura do resíduo interno ao reator;

- a vazão de ar aplicada deve ser controlada. Para isso pode-se utilizar rotâmetros analógicos ou, se possível, digitais ou automáticos com controle e registro da vazão aplicada;
- utilizar um computador com *software* para leitura e registro da temperatura, sem a necessidade de intervalos muito pequenos entre uma e outra leitura registrada, recomendando-se o monitoramento a cada 2 minutos ou intervalos mais espaçados, pois quando se utiliza intervalos menores a compilação dos dados no Excel é dificultada, dada a demanda por maior capacidade de memória do processador do computador. Recomenda-se o uso de laptops (com baterias) para controle dos dados, juntamente com *nobreaks* para evitar perda de dados em longos períodos sem energia elétrica;
- atentar-se para os pontos de distribuição do ar na parte inferior do reator, permitindo a maior distribuição possível através da massa. Como este sistema de mangueiras (Figura 4.4) é sempre reaproveitado, recomenda-se a aplicação de máxima vazão de ar neste sistema de distribuição antes de colocá-lo no reator, com o objetivo de remover toda umidade que pode estar presente na mangueira;
- se possível, tentar trabalhar em novas estratégias para melhoria do sistema de saída de ar/vapor de dentro do reator, o que pode favorecer a obtenção de resíduo com maior teor de ST;
- se possível, realizar ensaios com um termômetro extra monitorando e registrando a temperatura ambiente;
- sempre buscar monitorar e analisar todos os parâmetros constantes na Tabela 3.9 desta tese, o que permitirá comparações e inferências a partir dos resultados disponíveis para consulta na literatura.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004: resíduos sólidos**. São Paulo, 2004.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10644: águas – determinação de resíduos (sólidos) – método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 1989, 7p.
- ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. (2008). **Leito de Drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, Rio de Janeiro. Vol. 13 – No 1 – jan/mar 2008, 54-62 p.
- ACHON, C. L.; COIMBRA, P. R. S.; OLIVEIRA, G. S.; ESCOBAL, A. D.; MAROLA, B. C. **Desaguamento e redução de volume de lodo anaeróbio em leito de drenagem**. In: XVII Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SILUBESA). Florianópolis-SC, 2016.
- ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Gerenciamento de lodo de ETAs: remoção de água livre através de leito de secagem e lagoas**. AIDIS; Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Saneamento Ambiental: Ética e Responsabilidade Social. Joinville, ABES, 2003, 1-10 p.
- ADANI, F.; TAMBONE, F. **Long-term effect of sewage sludge application on soil humic acids**. Elsevier: Chemosphere, n. 60, 2005, 1214-1221p.
- ADAR, E.; KARATOP, B.; INCE, M.; BILGILI, M. S. **Comparison of methods for sustainable energy management with sewage sludge in Turkey based on SWOT-FAHP analysis**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 2016. 429-440 p.
- AGUSTINI, D.; ONOFRE, S. B. **Caracterização físico-química e microbiológica do lodo de esgoto produzido pela estação de tratamento de esgoto (ETE) de Pato Branco – PR**. Revista de Biologia e Saúde da UNISESP: Biology & Health Journal. v.1, n.1, 2. 2007.
- AIGÜES DE MANRESA S.A. **La depuradora d'aigües residuals de Manresa**. Disponível em: <[http://www.aiguesmanresa.cat/lesnostresinstallacions/downloads/PDF\\_Depuradora\\_Manresa.pdf](http://www.aiguesmanresa.cat/lesnostresinstallacions/downloads/PDF_Depuradora_Manresa.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2014.
- ALEM SOBRINHO, P. **Tratamento de esgoto e geração de lodo**. In: Biossólidos na agricultura. SABESP, Escola Politécnica da USP, ESALQ – USP/Nupegel e UNESP – Jaboticabal. São Paulo, 2001.
- ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. (orgs.). **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. 2. ed. Curitiba: SANEPAR, FINEP, 2001. 288 p.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. In: ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. 257 p: il
- ANDREOLI, C.; FERNANDES, F.; VON SPERLING, M. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte/MG: DESA/UFMG, 2007.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 483 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).
- ANDREOLI, C.; FERNANDES, F.; VON SPERLING, M. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte/MG: DESA/UFMG, 2007.

- APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association; WEF – Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed., 2012.
- ARLABOSSE, P.; FERRASSE, J. H.; LECOMPTE, D.; CRINE, M.; DUMONT, Y.; LÉONARD, A. **Efficient sludge thermal processing: from drying to thermal valorisation**. Vol. 4. In: *Modern Drying Technology: Energy Savings*, 2012. 295-329 p.
- BAEZA-BROTONS, F.; GARCÉS, P.; PAYÁ, J.; SAVAL, J. M. **Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks**. *Journal of Cleaner Production*, 82, 2014. 112-124 p.
- BARROSO, Marcelo Melo. **Influência das micro e macropriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- BARROSO, M. M.; ACHON, C. L.; REIS, R. F.; CORDEIRO, J. S. **Drainage bed: a natural system for WTP sludge dewatering and drying with different coagulant chemicals in tropical countries**. *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 06, 2014. 1029-1036 p.
- BAUERFELD, K.; DOCKHORN, T.; DICHTL, N. **Sludge treatment and reuse considering different climates and varying other conditions – export-oriented research for developing and threshold countries**. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43-13, 2008, 1556-1561 p.
- BENAMOUN, L. **Solar drying of wastewater sludge: a review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, 2012. 1061-1073 p.
- BENAMOUN, L.; ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A. **Review on fundamental aspects of application of drying process to wastewater sludge**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 28, 2013. 29-43 p.
- BENAMOUN, L.; CHEN, Z.; SALEMA, A. A.; AFZAL, M. T. **Moisture diffusivity during microwave drying of wastewater sewage sludge**. In: *2014 ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting*. Montreal, Quebec Canada. 2014.
- BIANCHINI, A.; BONFIGLIOLI, L.; PELLEGRINI, M.; SACCANI, C. **Sewage sludge drying process integration with a waste-to-energy power plant**. *Waste Management*, 42, 2015. 159-165p.
- BOINA, W. L. O. **Análise das condições de desaguamento de lodos de ETEs em bags: o caso da ETE Limoeiro – Presidente Prudente/SP**. 98 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos/UFSCar, São Carlos, 2012.
- BRASIL. Constituição. **Constituição**: República Federativa do Brasil. São Paulo: LTr, 1988. 292 p.
- \_\_\_\_\_. Presidência da República Federativa do Brasil. **Legislação Federal Brasileira**. Brasília. Lei 6.938 de 1981. Disponível em: <<http://www.presidencia.gov.br/legislacao/>>. Acesso em: 10 ago. 2014.
- \_\_\_\_\_. Presidência da República Federativa do Brasil. **Legislação Federal Brasileira**. Brasília. Lei 9.605 de 1998. Disponível em: <<http://www.presidencia.gov.br/legislacao/>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

- \_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. CONAMA. Resoluções do CONAMA. Resolução 357 de 2005 do CONAMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 20 ago. 2016.
- \_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. CONAMA. Resoluções do CONAMA. Resolução 375 de 2006 do CONAMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 20 ago. 2015.
- \_\_\_\_\_. Presidência da República Federativa do Brasil. **Legislação Federal Brasileira**. Brasília. Lei 11.445 de 2007. Disponível em: <<http://www.presidencia.gov.br/legislacao/>>. Acesso em: 16 jan. 2017.
- \_\_\_\_\_. Presidência da República Federativa do Brasil. **Legislação Federal Brasileira**. Brasília. Lei 12.305 de 2010. Disponível em: <<http://www.presidencia.gov.br/legislacao/>>. Acesso em: 15 ago. 2015.
- CAI, L.; GAO, D.; CHEN, T-B.; LIU, H-T.; ZHENG, G-D.; YANG, Q-W. **Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying**. Bioresource Resource, 117, 2012. 13-19 p.
- CAI, L.; CHEN, T-B.; GAO, D.; ZHENG, G-D.; LIU, H-T.; PAN, T-H. **Influence of forced air volume on water evaporation during sewage sludge bio-drying**. Water Research, 47, 2013. 4767-4773 p.
- CAI, L.; GAO, D.; HONG, N. **The effects of different mechanical turning regimes on heat changes and evaporation during sewage sludge biodrying**. Drying Technology, 33, 2015. 1151-1158 p.
- CAI, L.; CHEN, T-B.; GAO, D.; YU, J. **Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge**. Water Research, 90, 2016a.44-51 p.
- CAI, L.; KRAFFT, T.; CHEN, T-B.; GAO, D.; WANG, L. **Structure modification and extracellular polymeric substances conversion during sewage sludge biodrying process**. Bioresource Technology, 157, 2016b. 414-421 p.
- CARRINGTON, E. G. **Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction: final report**. Study contract no B4-3040/2001/322179/MAR/A2. European Commission. Set/2001. p.42.
- CHERNICHARO, C. A. de L. **Princípios do tratamento de águas residuárias: reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 1997, v. 5 p.246 il.
- COIMBRA, P. R. S.; ACHON, C. L. **Lodo de reatores UASB: desaguamento através de protótipos de leito de drenagem**. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, v. 4, n. 24, 2016. 28-42 p.
- COIMBRA, P. R. S.; OLIVEIRA, G. S.; MAROLA, B. C.; ESCOBAL, A. D.; ACHON, C. L. **Desaguamento de lodo anaeróbio em sistema natural com uso de manta geotêxtil – leito de drenagem**. In: 27º Encontro Técnico AESABESP. São Paulo, 2016.
- COLOMER-MENDONZA, F. J.; HERRERA-PRATS, L.; ROBLES-MARTÍNEZ, F.; GALLARDO-IZQUIERDO, A.; PINA-GUZMÁN, A. B. **Effect of airflow on biodrying of gardening wastes in reactors**. Journal of Environmental Sciences, 25(5), 2013. 865-872 p.

- CORDEIRO, J. S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs.** In.: REALI, M. A. P. *et al.* (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.* Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.
- CORDEIRO, J. S. **Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs).** In: ANDREOLLI, C. V. (2001) Coord. *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.* Capítulo 9. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 2001.
- CORDEIRO, J. S. **Gestão de resíduos urbanos: resíduos líquidos.** Curso de especialização lato sensu em gestão ambiental. Apostila de disciplina. Universidade Federal de São Carlos/UFSCar, São Carlos, 2010.
- CORDEIRO, J. S. **Precariedades e desafios do saneamento ambiental.** FNE – Federação Nacional dos Engenheiros. Cresce Brasil + Engenharia + Desenvolvimento Cidades, 2016. 73-83 p.
- CORDEIRO, J.S., REIS, R. F.; ACHON, C.L.; BARROSO, M. M. (2014). **Evolução dos Leitos de Drenagem (LD) no Brasil – uma década de avanços.** In: XXXIV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), Anais. Monterrey - México, 2014. Cod. 332-T8-Cordeiro-Brasil-1, 8 p.
- CORNWELL, D. A.; VANDERMEYDEN, C. **Nonmechanical dewatering of water plant residuals.** Denver: AWWA Research Foundation, 1998, 163 p.
- CORREIA, J. E. **Caracterização Físico-química e microbiológica do lodo gerado na estação de tratamento de esgoto contorno.** Feira de Santana, BA. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2009.
- CORTEZ, C. L. **Energy Waste Brasil 2012.** In: Oficina: Avanços Tecnológicos e Estudos de Casos. São Paulo, 2012.
- COSTA, A. N.; COSTA, A. F. S.; MARQUES, M. O.; SANTANA, R. C. **Estudo de caso – utilização de lodo de estações de tratamento de esgoto (ETEs) na cultura do mamoeiro no norte do Estado do Espírito Santo.** In.: ANDREOLI, C. V. *et al.* (2001). Coord. *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.* Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 2001.
- DAHL, O. **Environmental management and control.** Paperi ja Puu Oy, helsinki, 2008.
- DAMASCENO, S.; CAMPOS, J. R. **Caracterização de lodo de estação de tratamento de esgotos sanitários para uso agrícola.** 1998. *Online.* Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/peru/bratar035.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2017.
- DELBONI ENGENHARIA. **Leito de secagem da ETE – estação de tratamento de São Domingos das Dores (MG), 2008.** Disponível em: <[http://delboniengenharia.blogspot.com.br/2008/10/blog-post\\_01.html](http://delboniengenharia.blogspot.com.br/2008/10/blog-post_01.html)>. Acesso em: 20 Fev. 2017.
- DURANTE INGUNZA, M. P.; TINÔCO, J. D.; LIMA A. D.; SANTOS JUNIOR, O. F.; NASCIMENTO, R. M. **Caracterização de lodo de estação de tratamento de esgoto com vistas ao reuso na indústria cerâmica.** In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2006.
- EPA – Environmental Protection Agency. **Emerging technologies for biosolids management.** EPA 832-R-06-005, 2006.

- EPON & KEMA. **Milieu effect rapport afvalvergassing eemscentrale**. EPON, Zwolle, 98560219-KPS/MEC, 2000. 99-3017 p.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. Universidade Estadual de Londrina (UEL). Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.
- FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. **Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods** – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2008. 116-140 p.
- FONTANA, A. O. **Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros – estudo de caso – ETA Cardoso**. 161 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos, 2004.
- FONTANA, A. O.; OLIVEIRA, A. C.; ARVATI NETO, O. A.; GRANELLO, E. C. A.; CORDEIRO, J. S. **Redução de lodo digerido gerado em lagoas de estabilização com utilização de leito de drenagem**. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte/MG, 2007.
- FRANCISQUETO, L. O. S. **Comportamento de reatores UASB frente a variações horárias de vazão de esgoto sanitário**. 178f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- FRATE, S. **Tecnologias disponíveis e emergentes para o tratamento de resíduos sólidos visando a geração de energia**. In: 3º Seminário Bioenergia: Desafios e Oportunidades de Negócios. São Paulo, 2006.
- FREI, K. M.; CAMERON, D.; JASMIN, S.; STUART, P. R. **Novel sludge drying process for cost-effective on-site sludge management**. *Pulp & Paper Canada*, 107:4, 2006. 47-53 p.
- GUEDES, M. C.; ANDRADE, C. A. de; POGGIANI, F.; MATTIAZO, M. E. **Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto**. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. Viçosa, v. 30, n. 2, 2006.
- GOMES, I. H.; BERNARDINO, U. B. **Estudo comparativo da produção de lodo das estações de tratamento de esgoto de Mulembá e Vale Encantado e avaliação dos custos com sua disposição**. Monografia (Conclusão de curso de Engenharia Ambiental). 2013, 73 f. Faculdades Integradas Espírito-santenses. Vitória, ES, 2013.
- GÖTTSCHING, L.; HAMM, U; PLATZER, E.; PUTZ, H.J. **Analysis of waste paper recycling and disposal options in germany**, IIED Report, 1996.
- GYLLENHAMMAR, M. **Combustion of deinking sludge and fiber sludge in bark fired boilers**. Varmeforsk report. S.E.P. Scandinavian Energy Project AB, 1998.
- HAMMER, M. J. **Sistemas de abastecimento de água e esgotos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 563 p.
- HAUG, T.R. **The practical handbook of compost engineering**. Lewis Publisher, CRC Press LCC, ISBN 0-873710373-7, 1993.
- HEIN, K.R.K. **Combined combustion of biomass**. Sewage Sludge and Coals Clean Coal Technology Programme. IVD, Stuttgart, ISBN 3-928123-16, 1994.
- HUILINIR, C.; VILLEGAS, M. **Biodrying of pulp and paper secondary sludge: kinetics of volatile solids biodegradation**. *Bioresource Technology*, 157, 2014. 206-213 p.

- HUILINIR, C.; VILLEGAS, M. **Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge**. *Water Research*, 82, 2015. 118-128 p.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico**. 2010.
- \_\_\_\_\_. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/defaulttabp\\_df\\_esgot\\_san.shtml](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/defaulttabp_df_esgot_san.shtml)>. Acesso em: 15 jan. 2017.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Consulta dados da estação automática**: São Carlos (SP). Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg\\_dspDadosCodigo\\_sim.php?QTcxMQ==](http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTcxMQ==)>. Acesso em: 20 mar. 2017.
- ISO – International Standardization for Organization. ISO 24.511/2007. **Atividades relacionadas aos serviços de água e esgotos**.
- ISO – International Standardization for Organization. ISO 50.001/2011. **Sistemas de gestão de energia**.
- JACOMASSI, F. E. **Estudo das micropropriedades de resíduos sólidos gerados nos decantadores de estações de tratamento de água**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- JINPING, L.; JINHUA, G.; JIEQIONG, H.; NI, W. **Study on new thermal drying methods for sewage sludge using microwave and its mechanism**. In: 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation (ICCET 2015). 2015. Publicado por Atlantis Press.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro, 2005. 932 p.
- KEMA. **Milieu-effectrapport, bijstoken secundaire brandstoffen in de Centrale Maasvlakte**. KEMA, Arnhem, 9856650-KST/MVC, 1999, 98-3049 p.
- KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ, W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer Verlag, 1968. 592p.
- KRISHNAMURTHY S.; VIRARAGHAVAN T. **Chemical conditioning for dewatering municipal wastewater sludges**. *Energy Sources*. 2005.
- KUDRA, T., GAWRZYNSKI, Z., GLASER, R., STANISLAWSKI, J., POIRIER, M. **Drying of pulp and paper sludge in a pulsed fluid bed dryer**. *Drying Technol.* 20, 2002. 917-933 p.
- KURODA, E. K.; SILVEIRA, C.; MACEDO, J. G.; LIMA, M. S. P.; KAWAHIGASHI, F.; BATISTA, A. D.; SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F. **Drenagem/secagem de lodo de decantadores de ETA em manta geotêxtil**. *Revista DAE*, n. 194, 2013. 24-34 p.
- LIRA, A. C. S. de.; GUEDES, M. C.; SCHALCH, V. **Reciclagem de lodo de esgoto em plantação de eucalipto: carbono e nitrogênio**. *Engenharia Sanitária Ambiental*. Rio de Janeiro: ABES. 2008, v. 13, n. 2, p. 207-216, abr./jun. 2008.
- LU, S.; YANG, L.; ZHOU, F.; WANG, F.; YAN, J.; LI, X.; CHI, Y.; CEN, K. **Atmospheric emission characterization of a novel sludge drying and co-combustion system**. *Journal of Environmental Sciences*, v. 25 (10), 2013. 2088-2092 p.
- LYNN, C. J.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S. **Sewage sludge ash characteristics and potential for use in bricks, tiles and glass ceramics**. *Water Science & Technology*, in press, 2016.

- MAGALHÃES, J. M. M. **Caracterização inicial do lodo de esgoto de uma indústria de bebidas**. Monografia (Conclusão de curso de Gestão Ambiental na Agropecuária). 2008, 39 f. Escola Agrotécnica Federal. Inconfidentes, MG, 2008.
- MAMAIS, D.; TZIMAS, A.; EFTHIMIADOU, A.; KISSANDRAKIS, J.; ANDREADAKIS, A. **Evaluation of different sludge mechanical dewatering technologies**. Journal of Residuals Science & Technology, v. 6, n. 1, 2009.
- MARIN, J. D.; LUNELLI, C. A. **Processo ambiental, efetividade e as tutelas de urgência**. Veredas do Direito, Belo Horizonte, v. 7, n. 13/14, 2010. 311-330 p.
- MATHIOUDAKIS, V. L.; KAPAGIANNIDIS, A. G.; ATHANASOULIA, E.; DIAMANTIS, V. I.; MELIDIS, P.; AIVASIDIS, A. **Extended dewatering of sewage sludge in solar drying plants**. Desalination, v. 248, 2009. 733-739 p.
- METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3<sup>rd</sup> ed. Revisão de George Tchobanoglous e Franklin L. Burton. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334 p.
- METCALF & EDDY, INC. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 4<sup>th</sup> ed. Revisão de George Tchobanoglous e Franklin L. Burton. New York: McGraw-Hill, 2003.
- MIKI, Marcelo Kenji. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas**. 405 p., 2 v. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- MOTE, C.R., GRIFFIS, C.L. **Heat production by composting organic matter**. Agric. Waste 4, 1982. 65-73 p.
- MORTARA, F. C. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios**. 241 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.
- MULCHANDANI, A.; WESTERHOFF, P. **Recovery opportunities for metals and energy from sewage sludges**. Bioresource Technology, 215, 2016. 215-226 p.
- MURRAY, K.; DILLON, G. **Waterworks residuals management: a comparison of US and UK practice**. Washington: Management of water and wastewater solids for 21<sup>st</sup> century – A global perspective, jun. 1994.
- NAVAEE-ARDEH, S.; BERTRAND, F.; STUART, P. R. **Key variables analysis of a novel continuous biodrying process for drying mixed sludge**. Bioresource Technology, 101, 2010. 3379-3387 p.
- NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
- NOVAK, J. T. **Dewatering of sewage sludge**. Drying Technology, 24, 2006. 1257-1262 p.
- NOVAK, J. T.; HAUGAN, B. E. **Mechanisms and methods for polymer conditioning of activated sludge**. Journal Water Pollution Control Federation, v. 52, n. 10, p. 2571-80, Oct. 1980.
- OUTWATER, A. B. **Reuse of sludge and minor wastewater**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994.
- PACHECO, F. **O que é biofilme?** Microbiologia Online. Postado em 2009. Disponível em: <<http://microbiologiaonlineblog.blogspot.com.br/2009/10/microbiologia-online-com-foco-em-o-que.html>>. Acesso em: 17 jan. 2017.

PARLAMENTARY OFFICE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. **Energy and sewage.** Postnote, n. 282, 2007.

PECORA, V.; GRISOLI, R.; CORTEZ, C. L.; MORENO, M.; BRAUNE, A.; LIMA, A.; COELHO, S.; NOGUEIRA, A. R.; FERNANDES, L. E. D.; SILVA, G. A.; BERNSTAD SARAIVA SCHOTT, A. K. E. **Comparação do desempenho ambiental de alternativas para a destinação de resíduos sólidos urbanos com aproveitamento energético.** In: III Congresso Brasileiro Em Gestão Do Ciclo De Vida De Produtos E Serviços. Maringá, 2012.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. **Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 11, p. 147-157, 2010.

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

PLANSAB – Plano Nacional de Saneamento Básico. **Plano Nacional de Saneamento Básico – 2014.** Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, 2014. Disponível em: <[http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/PlanSaB/plansab\\_texto\\_editado\\_para\\_download.pdf](http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/PlanSaB/plansab_texto_editado_para_download.pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2017.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. **Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos.** Biomassa & Energia, Brasília, v. 1, n. 2, 2005. 173-182 p.

RANDALL, C. W.; KOCH, C. T. **Dewatering characteristics of aerobically digested sludge.** Journal of the Water Pollution Control Federation, v. 41, p 215, 1969.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; BETTIOL, W.; GUILHERME, L. R. G.; DYNIA, J. F. **Acúmulo de Cu, Mn, Ni, Pb e Zn em latossolo vermelho adubado com fontes de lodo de esgoto e cultivado com milho.** Ciênc. Agrotec., Lavras, v. 28, n. 1, jan./fev. 2004, 15-23 p.

REIS, R. F. **Estudo de influência de cobertura plástica na remoção de água de lodos de Estações de Tratamento de Água em leitos de drenagem.** 131 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos/UFSCar, São Carlos, 2011.

ROMDHANA, M. H.; LECOMTE, D.; LADEVIE, B.; SABLAYROLLES, C. **Monitoring of pathogenic microorganisms contamination during heat drying process of sewage sludge.** Process Safety and Environmental Protection, 87, 2009. 377-386 p.

SALIHOGU, N. K.; PINARLI, V.; SALIHOGU, G. **Solar drying in sludge management in Turkey.** Renewable Energy, v. 32, 2007. 1661-1975 p.

SALLANKO, J. **Water and Wastewater treatment.** University of Oulu, 2011.

SAMUDIO, Edgar Manuel Miranda. **Critério racional para dimensionamento de leitos de secagem de lodo de ETE's convencionais e do reator UASB.** 1993. 233 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná. **Manual técnico para a utilização agrícola do lodo de esgoto do Paraná.** Curitiba: SANEPAR, 1997. 96 p.

SÃO PAULO (Estado). **Legislação Estadual Paulista.** São Paulo. Lei 997 de 1976. Disponível em: <<http://www.legislacao.sp.gov.br>>. Acesso em: 12 set. 2014.

- \_\_\_\_\_. **Legislação Estadual Paulista**. São Paulo. Decreto-Lei 8.468 de 1976. Disponível em: <<http://www.legislacao.sp.gov.br>>. Acesso em: 12 set. 2014.
- \_\_\_\_\_. **Legislação Estadual Paulista**. São Paulo. Lei 12.300 de 2006. Disponível em: <<http://www.legislacao.sp.gov.br>>. Acesso em: 19 set. 2014.
- SILVA, A. G. da; LEITE, V. D.; SILVA, M. M. P da; PRASAD, S.; FEITOSA, W. B. da S. **Compostagem aeróbia conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais**. Engenharia Sanitária Ambiental. Rio de Janeiro: ABES. 2008, v. 13, n. 4, p. 371-379, out./dez. 2008.
- SILVA, C. A.; RANGEL, O. J. P.; DYNIA, J. F.; BETTIOL, W.; MANZATTO, C. V. **Disponibilidade de metais pesados para milho cultivado em latossolo sucessivamente tratado com lodos de esgoto**. Revista Brasileira do Solo. Revista Brasileira de Ciências do Solo. 2006. Viçosa, v. 30, p. 353-364. 2006.
- SILVA, D. P.; RUDOLPH, V.; TARANTO, O. P. **The drying of sewage sludge by immersion frying**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 22, n. 2, 2005. 271-276 p.
- SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem/secagem com manta geotêxtil**. 2012. 137 p. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.
- SHAO, L-M.; MA, Z-H.; ZHANG, H.; ZHANG, D-Q.; HE, P-J. **Bio-drying and size sorting of municipal solid waste with high water content for improving energy recovery**. Waste Management, 30, 2010. 1165-1170 p.
- SHIN, M.; KIM, H.; JANG, D.; OHM, T. **Novel fry-drying method for the treatment of sewage sludge**. Journal of Mater Cycles Waste Management, 13, 2011. 232-239 p.
- SMITH, J. K.; VESILIND, P. A. **Dilatometric measurement of bound water in wastewater sludge**. Water Research, 29(12), 1995, 2621-2626p.
- SMOL, M.; KULCZYCKA, J.; HENCLI, A.; GORAZDA, K.; WZOREK, Z. **The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy**. Journal of Cleaner Production, 95, 2015. 45-54 p.
- SMOLLEN, M.; KAFAAR, A. **Electroosmotically enhanced sludge dewatering: pilot-plant study**. Water Science Technology. v. 30, n. 8, pp. 159-168, 1994.
- SPELLMAN, Frank R. **Dewatering biosolids**. Lancaster, Pa: Technomic Pub., 1997. 276 p.
- SUCHORAB, Z.; BARNAT-HUNEK, D.; FRANUS, M.; LAGOD, G. **Mechanical and physical properties of hydrophobized lightweight aggregate concrete with sewage sludge**. Materials, 9, 317, 2016.
- TAO, J. H.; CHEN, B.; BAO, Y. W.; JIN, C. P. **Research on the indirect thermal drying sludge technology based on spiral equipment**. In: International Conference on Computer Science and Electronic Technology (ICCSET 2014). 2014. Publicado por Atlantis Press.
- TUAN, P-A.; MIKA, S.; PIRJO, I. **Sewage sludge electro-dewatering treatment – a review**. Drying Technology, 30(7), 2012, 691-706p.
- TUOMELA, M., VIKMAN, M., HATAKKA, A., ITÄVAARA, M. **Biodegradation of lignin in a compost environment: a review**. Bioresour. Technol. 72, 2000. 169-183 p.
- USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Environmental regulations and technology: control of pathogens and vector attraction in sewage sludge**. under 40 CFR Part 503. Washington, DC 20460. Jul. 2003. p. 178.

- VAN DOORN, J., BRUYN, P., VERMEIJ, P. **Combined combustion of biomass, municipal sewage sludge and coal in an atmospheric fluidized bed installation.** Proceeding of the 9th European Bioenergy Conference 2, 1996. 1007-1012 p.
- VAN HAADEL, A.; CAVALCANTI, P. F. F. **Geração e composição de lodo em sistemas de tratamento de esgotos sanitários.** In.: ANDREOLI, C. V. *et al.* (2001). Coord. *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.* Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 2001.
- VAYDA, H.; JAUHAINEN, ERKKI, O.; ASTHÖM, L. **Operating experience of an eco-energy bubbling fluidized bed combustion boiler burning paper mill sludges in combination with wood waste and other fuels.** 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion, v. 1, ASME, 1993, 521-538 p.
- VAZ, L. M. S. **Crescimento inicial, fertilidade do solo e nutrição de um povoamento de Eucaliptus grandis fertilizado com biossólido.** Dissertação. (Mestre em Ciências)2000. 41f. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. 2000.
- VENENDAAL, R. VERGASSING VAN AFVAL. **Evaluatie van de installaties van Thermoselect en TPS/Greve.** Energiewinning uit afval en biomassa. Utrecht, BTG, KEMA en VVAV, Novem-EWAB No. 9407, 1994, p. 114.
- VESILIND, P. A. **The role of water in sludge dewatering.** Water Environment Research, 36(1), 1994, 4-11p.
- VESILIND, P. A.; HSU, C. C. **Limits of sludge dewaterability.** Water Science Technology, v. 36, n. 11, 1997, 87-91p.
- VIEIRA, G. E. G.; PEDROZA, M. M.; SOUSA, J. F.; PEDROZA, C. M. **O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, 2011.
- VILLANI JR., W. *et al.* SEMAE – Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto. **Estudo técnico de viabilidade: cogeração de energia a partir de biogás e do lodo proveniente de reatores anaeróbios da ETE Rio Preto.** São José do Rio Preto, 2011.
- VILLEGAS, M; HUILINIR, C. **Biodrying of sewage sludge: kinetics of volatile solids degradation under different initial moisture contents and air-flow rates.** Bioresource Technology, 174, 2014. 33-41 p.
- VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – volume 1: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte, DESA/UFMG, 1996, 243 p.
- WEF – Water Environmental Foundation. **Design of municipal wastewater treatment plants: Manual of Practice (Mop) 8 and ASCE Manual and Report on Engineering Practice Series, No 76.** 4<sup>th</sup> edition, 1998.
- WPCF – Water Pollution Control Federation. **Sludge dewatering.** Washington D.C., 1983. 164 p. (Manual of practice n° 20).
- WINKLER, M. -K. H.; BENNEMBROEK, M. H.; HORSTINK, F. H.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; VAN DE POL, G.-J. **The biodrying concept: an innovative technology creating energy from sewage sludge.** Bioresource Technology, 147, 2013. 124-129 p.
- YANG, B.; ZHANG, L.; JAHNG, D. **Importance of initial moisture content and bulking agent for biodrying sewage sludge.** Drying Technology, 32, 2014. 135-144 p.

ZHAO, C.; CHEN, X.; HUANG, C.; LAN, J.; DUAN, Y.; CUI, G.; WANG, W. **Fluidization and incineration of pulp and paper mill sludge in BFB**. 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Savannah, GA (US), 1999.

ZHAO, L.; GU, W.-M.; HE, P.-J.; SHAO, L.-M. **Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge**. Water Research, 44, 2010. 6144-6152 p.

**BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR CONSULTADA**

- CHIANG, K.-Y.; CHOU, P.-H.; HUA, C.-R.; CHIEN, K.-L.; CHEESEMAN, C. **Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks**. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 2009, 76-82 p.
- CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos**. In: 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto. Porto Alegre, RS, 2011.
- CORDEIRO, J. S. **Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de estações de tratamento de águas**. 166 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.
- CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas**. 342 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- CORDEIRO, J. S. **Remoção natural de água de lodos de ETAs utilizando leitos de secagem e lagoas de lodo**. In: REALI, M. A. P. (1999). Coord. *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB, 1999.
- DOSHI, V. A.; VUTHALURU, H. B.; BASTOW, T. **Investigations into the control of odour and viscosity of biomass oil delivered from pyrolysis of sewage sludge**. *Fuel Processing Technology*, v. 86, p. 885-897, 2003.
- MORTARA, F. C.; ALEM SOBRINHO, P. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios**. In: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre-RS, set. 2011.
- MOUNTOURIS, A.; VOUTSAS, E.; TASSIOS, D. **Plasma gasification of sewage sludge: process development and energy optimization**. *Energy Conservation and Management* 49, p. 2264-2271, 2008.
- ROSS, D.; SHRIVE, C.; CHAUVIN, D.; HARNUM, J.; CONSTANTINE, T. **The power of sludge maximizing energy recovery at the Woodward Avenue WWTP in Hamilton, Ontario**. *Residuals and Biosolids*, p. 1144-1152, 2010.
- RULKENS, W. **Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: overview and assessment of a various options**. *Energy & Fuels*, 22, p. 9-15, 2008.
- SAMANYA, J.; HORNUNG, A.; JONES, M.; VALE, P. **Thermal stability of sewage sludge pyrolysis oil**. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, v. 1, n. 3, p. 66-74, 2011.
- SCHONORR, S. **Floc characterisation and dewatering of industrial and municipal waste components**. University of Oulu, 2012.