



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

SABRINA MARIEL CORRÊA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO LEITO DE SECAGEM COM PISO DE BLOCOS
DRENANTES PARA LODOS GERADOS EM ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO.**



Bauru
2017

SABRINA MARIEL CORRÊA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO LEITO DE SECAGEM COM PISO DE BLOCOS
DRENANTES PARA LODOS GERADOS EM ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO.**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ribeiro

Bauru
2017



Silva, Sabrina Mariel Corrêa da.

Avaliação do leito de secagem com piso de blocos drenantes para lodos gerados em Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário / Sabrina Mariel Corrêa da Silva, 2017

161 f. : il.

Orientador: Gustavo Henrique Ribeiro da Silva.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

1. Leito de secagem. 2. Lodo de esgoto. 3. Desaguamento. 4. Bloco drenante I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE SABRINA MARIEL CORREA DA SILVA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 31 dias do mês de julho do ano de 2017, às 14:00 horas, no(a) Universidade Federal de São Carlos - UFSCar / Departamento de Engenharia Civil, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Profª Drª CALI LAGUNA ACHON do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Prof. Dr. JOÃO SÉRGIO CORDEIRO do(a) Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de SABRINA MARIEL CORREA DA SILVA, intitulada **AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LEITO DE SECAGEM COM PISO DE BLOCOS DRENANTES (WEDGE WIRE) PARA DRENAGEM E SECAGEM NATURAL DE LODO DE ETE**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA

Profª Drª CALI LAGUNA ACHON

Prof. Dr. JOÃO SÉRGIO CORDEIRO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru



PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA:
SABRINA MARIEL CORREA DA SILVA

DE: "AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LEITO DE SECAGEM COM PISO DE BLOCOS DRENANTES
(WEDGE WIRE) PARA DRENAGEM E SECAGEM NATURAL DE LODO"

PARA:

*Avaliação do leito de secagem com piso de blocos drenantes
de lodo gerado em Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário*

Bauru, 31 de julho de 2017.


Prof. Dr. Gustavo Henrique Ribeiro da Silva
Orientador

Agradecimentos

Meus agradecimentos vão primeiramente para Deus, por sempre abrir portas de oportunidades e colocar pessoas maravilhosas no meu caminho, além de me dar saúde para ir em busca dos meus sonhos. À minha mãe Sara, minha grande amiga que sempre me apoiou, me ensinou a ser forte e fez de tudo ao seu alcance para me ajudar. Ao meu grande amigo, companheiro, parceiro e noivo Christian, que me apoia, me ajudou muito em casa para que eu pudesse ter tempo para estudar, além de ter ido comigo para São Carlos duas vezes e ajudado nas coletas de lodo (nem ligou para os respingos de “cocô”). Ao Marcelo Pohlmann por todo apoio, suporte e estrutura na pesquisa com os blocos drenantes. Ao Leandro Marin, por diversas vezes ter pego leitura de dados para que não perdesse as informações. Ao SAAE São Carlos por permitir utilizar a ETE. À UFSCAR por ter cedido o laboratório. Ao Paulo por ter me ajudado em algumas coletas e leitura de dados. Sou muito grata à professora Cali Achon, por ter me direcionado da melhor maneira possível no assunto quando me encontrei perdida, e também por toda contribuição técnica e prática na pesquisa. E, por fim, ao meu orientador Gustavo Ribeiro por ter aceito meu projeto e entrado na pesquisa comigo, à UNESP pelo suporte do curso e ao CAPES pela oportunidade de bolsa de estudos.

Resumo

Esta pesquisa sobre leito de secagem modificado com piso de blocos drenantes (*wedge wire*) foi desenvolvida em três etapas, sendo um acompanhamento em escala real com descartes de lodo aeróbio, outra realizada em escala piloto com descartes de lodo anaeróbio, ambos gerados em estação tratamento de esgoto sanitário (ETE), e a terceira etapa foi um levantamento de dados operacionais de alguns leitos com piso de blocos drenantes existentes no Brasil. O leito de secagem convencional de areia ainda é o método mais utilizado no Brasil para desaguamento de lodo em ETE de pequeno e médio porte. No entanto, devido ao aumento de fiscalização por órgãos ambientais, aumento de exigência por qualidade no tratamento de água e esgoto, custos elevados no gerenciamento, além de problemas com a eficiência de secagem final do lodo, odores e manutenção dos leitos, as empresas têm buscado alternativas de novas tecnologias, e/ou até mesmo por otimizações nos próprios leitos. Uma alternativa que tem se mostrado eficiente no desaguamento de lodos é o leito modificado com piso de blocos drenantes. Porém, ainda há pouca experiência com relação ao dimensionamento do leito, à sua operação e à sua eficiência por ser uma tecnologia pouco explorada no exterior e recém-chegada ao Brasil. Portanto esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desaguamento de lodo de esgoto em leito com piso de blocos drenantes nas fases de drenagem e secagem. A drenagem do lodo foi avaliada através da vazão de drenagem após filtração de lodo no bloco drenante, da redução de volume de lodo no leito e da caracterização da qualidade da água drenada. Já a secagem foi avaliada a partir da variação do teor de sólidos totais do lodo durante o período de secagem. Como é um processo natural de secagem, o acompanhamento das condições climáticas local foi realizada. Os resultados foram satisfatórios tanto para o lodo aeróbio quanto para o anaeróbio. Em relação a drenagem, após um dia do descarte de lodo no leito com piso de blocos drenantes houve redução em torno de 90% do volume para lodo aeróbio e 70% para lodo anaeróbio. Já o teor de sólidos totais final obtido na secagem variou de acordo com o tipo de lodo, volume, taxa de aplicação de sólidos e condições climáticas. O melhor resultado de secagem para o lodo aeróbio foi de 95,3% de sólidos totais em 36 dias de secagem, e para o lodo anaeróbio, o máximo atingido foi de 63,5% em 24 dias, em condições de secagem diferentes.

Palavras - chave: leito de secagem, lodo de esgoto, desaguamento, drenagem e secagem natural de lodo, bloco drenante.

Title: Evaluation of wedge wire sludge beds for sludges generated in Wastewater Treatment Plants.

Abstract

This research about wedge wire floor sludge bed was developed in three stages, first one was a monitoring in real scale with aerobic sludge discards, another one performed in a pilot scale with anaerobic sludge discard, both generated in wastewater treatment plant (WWTP), and the third stage was a survey of operational information of some wedge wire floor sludge bed in operation in Brazil. The conventional sand drying bed is still the most used system in Brazil for dewatering and drying of sludge generated during sewage treatment in small and medium size WWTP. However, due to the increase in inspection by environmental agencies, increased demands for quality in treatment, high costs in management, as well as problems with final sludge drying efficiency, odors and bed maintenance, the companies have been looking for alternatives to new technologies, and even optimizations in existing beds. An alternative that has proven efficient in the dewatering of sludge is the modified sludge bed with wedge wire floor. However, there is still little experience with the dimensioning of the bed, its operation and efficiency because it is a technology that has not been used abroad and recently arrived in Brazil. Therefore, this research had as objective to evaluate the dewatering of sewage sludge in wedge wire bed in the drainage and drying phases. The drainage of the sludge was evaluated through the drainage flow after filtration in the wedge wire floor, the reduction of sludge volume in the bed and the characterization of the quality of the drained water. Drying was evaluated by increasing the total solid content of the sludge during the entire drying period. As it is a natural drying process, monitoring of the local climatic conditions was performed. The results were satisfactory for both aerobic and anaerobic sludge. In relation to the drainage, after one day from discharge in the bed, there was a reduction of around 90% of the volume for aerobic sludge and 70% for anaerobic sludge. However, the final solid content obtained in the drying varied according to the type of sludge, volume, solids application rate and climatic conditions. The best drying result for aerobic sludge was 95.3% of total solid in 36 days of drying, and for anaerobic sludge the maximum reached was 63.5% in 24 days, in different climate conditions.

Key words: drying bed, sewage sludge, dewatering, drainage and natural drying of sludge, wedge wire.

Índice de Figuras

Figura 1 - Interação entre a matéria orgânica afluyente e o lodo em sistema anaeróbio.....	10
Figura 2 - Fração de matéria orgânica biodegradável no lodo de excesso e no efluente, em função da idade do lodo.....	11
Figura 3- Interação entre a matéria orgânica do afluyente e o lodo em sistemas de tratamento aeróbio.	12
Figura 4 – Divisão da matéria orgânica afluyente entre as frações do efluente.	13
Figura 5 - Relação temperatura x idade do lodo.....	26
Figura 6 - Formas de associação da água ao lodo.	29
Figura 7 - Curva de secagem do lodo.	42
Figura 8 – Cinética de secagem em função da umidade.....	44
Figura 9 – Esquema do desaguamento do lodo em leitos de secagem.	47
Figura 10 – Corte longitudinal de um típico leito convencional de areia.....	48
Figura 11 - Taxa de aplicação de sólidos x o teor de sólido no lodo.....	52
Figura 12- Concentração de sólidos x Volume de água drenada.	57
Figura 13 - Altura da camada de lodo x tempo de drenagem.....	57
Figura 14 - Corte transversal de leito pavimentado.....	59
Figura 15 - Corte transversal de leito de planta.	61
Figura 16 - Representação de um leito a vácuo assistido.	62
Figura 17 - Corte longitudinal de leito com piso de blocos drenantes (wedge wire).	64
Figura 18 - Bloco drenante em polipropileno.....	65
Figura 19 - Ensaio Jar Test para determinação de polímero.	68
Figura 20 – Plata e Corte longitudinal do leito de secagem da ETE.	69
Figura 21 - Vista do leito de secagem.	69
Figura 22 – Dois leitos de 13,42m ² utilizados no descarte.....	70
Figura 23 - Fluxograma da ETE Monjolinho.	74
Figura 24 – Leito piloto com inclinação para escoamento através do registro.	75
Figura 25 - Separação do lodo durante o descarte no Teste 1: por baixo camada sólida e água livre por cima.	80
Figura 26 – Lodo no Teste 1 após 1h do descarte e a marca da altura de lodo atingida.	80
Figura 27 - Lodo desaguado mal floculado no Teste 3, pouca liberação de água livre.	81
Figura 28 – Variação de vazão de drenagem no tempo para T1 _{T1} e T1 _{T2}	82
Figura 29 – Variação de vazão de drenagem no tempo para T2 _{T1} e T2 _{T2}	82

Figura 30 - Curva de secagem de lodo Teste 1.....	86
Figura 31 - Curva de secagem de lodo Teste 2.....	87
Figura 32 - Curva de secagem de lodo Teste 3.....	88
Figura 33 - Curva de secagem de lodo Teste 4.....	89
Figura 34 - Comparação da secagem de lodo para 6cm de camada de lodo.	90
Figura 35 - Curva de velocidade de secagem T1 _{T1}	93
Figura 36 - Curva de velocidade de secagem T1 _{T2}	94
Figura 37 - Aspecto do lodo do T1 _{T1} com 9 dias de secagem: fenômeno rachadura.	95
Figura 38 - Lodo do T4 _{T1} com 10 dias de secagem: fenômeno encolhimento.....	95
Figura 39 - Temperatura diária durante o Teste 1.	96
Figura 40 - Temperatura média diária durante Teste 2.	97
Figura 41 - Temperatura média diária durante Teste 3.	97
Figura 42 - Temperatura média diária durante o Teste 4.	98
Figura 43 - Umidade média diária durante o Teste 1.	99
Figura 44 - Umidade média diária durante o Teste 2.	99
Figura 45 - Umidade média diária durante o Teste 3.	100
Figura 46 - Umidade média diária durante o Teste 4.	100
Figura 47 – Radiação diária durante o Teste 1.	102
Figura 48 - Radiação diária durante o Teste 2.....	102
Figura 49 - Radiação diária durante o Teste 3.....	103
Figura 50 - Radiação diária durante o Teste 4.....	103
Figura 51 - Variação de vazão de drenagem no tempo para TP 1, TP 2 e TP 3.....	106
Figura 52 - Redução de volume durante o desaguamento do TP 1.	107
Figura 53 - Redução de volume durante o desaguamento do TP 2.	107
Figura 54 - Redução de volume durante o desaguamento do TP 3.	108
Figura 55 - Altura de camada de lodo após alimentação no leito piloto e após 24h do descarte do TP 1.	109
Figura 56 - Turbidez do drenado durante o desaguamento do TP 1, TP 2 e TP 3.	111
Figura 57 - Sólidos em suspensão na água drenada do TP 1, TP 2 e TP 3.	112
Figura 58 - Cor aparente na água drenada do TP 1, TP 2 e TP 3.	113
Figura 59 - Amostras da água do lodo drenada do TP 1 e TP 3 conforme o tempo de drenagem.	114
Figura 60 – Diferença entre o lodo retido e a água do lodo drenada.....	114
Figura 61 - Curva de secagem do TP 1, TP 2 e TP 3.	115

Figura 62 - Detalhe da cobertura transparente improvisada durante o TP 1.	116
Figura 63 – Evolução da secagem e a influência da temperatura e umidade do ar.	117
Figura 64 - Cinética de secagem para TP 1, TP 2 e TP 3.	119
Figura 65 – Aspecto pastoso do lodo com 1 dia de secagem durante o TP 1.	120
Figura 66 - Aspecto do lodo com rachaduras com 14 dias de secagem durante o TP 1. ..	120
Figura 67 - Aspecto granular do lodo com 22 dias de secagem durante o TP 1.	121
Figura 68 - Descarte de lodo aeróbio e amostra da água drenada nos blocos drenantes..	123
Figura 69 - Leito de secagem adaptado com piso de blocos drenantes na ETE Ipiranguinha.	124
Figura 70 - Leito piloto com piso de blocos drenantes na ETE Cetrel em Camaçari.	124

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Características de lodos gerados no processo de tratamento de esgoto.....	14
Tabela 2 - Concentração de sólidos em lodo gerado durante o tratamento de esgoto.....	15
Tabela 3 - Composição química de lodo de esgoto.	18
Tabela 4 - Teor de sólidos (%) no adensamento do lodo.	20
Tabela 5 - Características médias observadas em lodos bruto e digerido.	24
Tabela 6 - Redução de alguns microrganismos após digestão do lodo em número/100ml.	24
Tabela 7 - Médias dos percentuais de eficiência na remoção entre os tratamentos com cal a 30%, 40% e 50% em relação ao peso de lodo seco.	28
Tabela 8 – Princípios Básicos nas operações de desaguamento.....	33
Tabela 9 - Tipos de desaguamentos: vantagens e desvantagens.	35
Tabela 10 - Critério de carga para lodo não digerido e não-condicionado em Leitos de areia descobertos.	49
Tabela 11 - Desempenho de leito com piso de bloco drenante (wedge wire) para lodos condicionados.	66
Tabela 12 - Resultados analíticos esgoto bruto na alimentação da ETE.	68
Tabela 13 – Variáveis obtidas durante Etapa 1.	71
Tabela 14 - Característica do esgoto bruto e tratado da ETE.	72
Tabela 15 - Parâmetros de controle durante o desaguamento.	75
Tabela 16 - Carga hidráulica: altura de camada de lodo.	79
Tabela 17 - Qualidade do drenado T_{2T1}	84
Tabela 18 - Velocidade e aceleração de secagem.....	92
Tabela 19 - Temperatura interna média, máxima e mínima.....	96
Tabela 20 - Umidade interna média, máxima e mínima.....	99
Tabela 21 - Taxa de aplicação de sólidos.	105
Tabela 22 - Altura de camada e umidade de lodo após a drenagem.	109
Tabela 23 - Comparação do desaguamento de lodo em leito com piso de bloco drenante e leito com manta	110
Tabela 24 - Condições climáticas durante o TP 1, TP 2 e TP 3.	116
Tabela 25 - Informações sobre leitos de secagem com piso de blocos drenantes em operação.....	121
Tabela 26 - Leituras de temperatura e umidade dentro do leito durante Teste 1.	134
Tabela 27 - Leituras de temperatura e umidade dentro do leito durante Teste 2.	135

Tabela 28 - Leituras de temperatura e umidade dentro do leito durante Teste 3.	136
Tabela 29 - Leituras de temperatura e umidade dentro do leito durante Teste 4.	136
Tabela 30 - Médias diárias dos dados climáticos extraídos do INMET (2016) durante o TP 1.	137
Tabela 31 – Médias diárias dos dados climáticos extraídos do INMET (2016) durante o TP 2.	138
Tabela 32 - Médias diárias dos dados climáticos extraídos do INMET (2016) durante o TP 3.	139

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
DAA – Digestão Anaeróbia Avançada
DQO – Demanda bioquímica de oxigênio
DS – Decantador Secundário
ETE – Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MO – Matéria orgânica
PLANSAB – Plano Nacional de Saneamento Básico
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROSAB – Programa de pesquisa em Saneamento Básico;
SMEWW – Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
SNIS – Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento
ST – Sólidos Totais
SV – Sólidos Voláteis
SVS – Sólidos Voláteis em Suspensão
TAS – Taxa de aplicação de sólidos
UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket
USACERL – United States Army Corps of Engineers Research Laboratory
USEPA – United States Environmental Protection Agency
WEF – Water Environment Federation

Sumário

RESUMO	VI
ABSTRACT.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 OBJETIVO GERAL	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 GERAÇÃO E COMPOSIÇÃO DE LODO EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO	6
3.1.1 <i>Geração de lodo em sistemas de tratamento anaeróbio</i>	9
3.1.2 <i>Geração de lodo em sistemas de tratamento aeróbio</i>	11
3.1.3 <i>Característica e quantidade de lodo</i>	14
3.2 ETAPAS DO GERENCIAMENTO DO LODO	19
3.2.1 <i>Adensamento</i>	20
3.2.2 <i>Estabilização</i>	21
3.2.3 <i>Desaguamento de lodo</i>	28
3.2.4 <i>Secagem térmica de lodo</i>	39
3.3 LEITO DE SECAGEM.....	46
3.3.1 <i>Leito convencional de areia</i>	48
3.3.2 <i>Leito pavimentado</i>	58
3.3.3 <i>Leito de plantas (reeds bed)</i>	60
3.3.4 <i>Leito a vácuo assistido</i>	61
3.3.5 <i>Leito de drenagem</i>	62
3.3.6 <i>Leito de bloco drenante (wedge wire)</i>	63
4 MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.1 ETAPA 1 - ESCALA REAL COM LODO AERÓBIO	67
4.2 ETAPA 2 – ESCALA PILOTO COM LODO ANAERÓBIO	73

4.3	ETAPA 3 – LEVANTAMENTO DE DADOS DE LEITO DE SECAGEM COM PISO DE BLOCOS DRENANTES EM OPERAÇÃO.....	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1	ETAPA 1 - ESCALA REAL COM LODO AERÓBIO	77
5.1.1	<i>Taxa de aplicação de sólidos (TAS)</i>	77
5.1.2	<i>Desaguamento: drenagem do lodo</i>	78
5.1.3	<i>Desaguamento: secagem do lodo</i>	85
5.1.4	<i>Condições climáticas</i>	95
5.2	ETAPA 2 - ESCALA PILOTO COM LODO ANAERÓBIO	104
5.2.1	<i>Taxa de aplicação de sólidos (TAS)</i>	104
5.2.2	<i>Desaguamento: drenagem do lodo</i>	105
5.2.3	<i>Desaguamento: secagem do lodo</i>	114
5.3	ETAPA 3 - LEVANTAMENTO DE DADOS DE LEITO DE SECAGEM COM PISO DE BLOCOS DRENANTES EM OPERAÇÃO.....	121
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	125
6.1	PRINCIPAL	125
6.2	ESPECÍFICAS	126
6.3	RECOMENDAÇÕES	128
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
	ANEXO A – DADOS DE TEMPERATURA E UMIDADE DENTRO DO LEITO DE SECAGEM DURANTE A ETAPA 1.....	134
	ANEXO B – DADOS DE TEMPERATURA E UMIDADE AMBIENTE DURANTE A ETAPA 2.	137
	ANEXO C – QUESTIONÁRIO PARA LEITOS DE BLOCOS DRENANTES EXISTENTES	140

1 INTRODUÇÃO

O lodo, resíduo gerado durante o tratamento de esgotos, tem recebido maior atenção por parte das concessionárias de saneamento por conta do desafio de atingir o seu gerenciamento sustentável, a começar principalmente pela maior exigência dos órgãos ambientais.

É possível afirmar que o marco ambiental que deu a iniciativa do desenvolvimento sustentável foi a Agenda 21 Global, conferência das Nações Unidas sobre meio ambiente e o desenvolvimento, que ocorreu no Rio de Janeiro em 1992, seguido pela Lei Federal nº 9.605 de fevereiro de 1998 (BRASIL, 1998), chamada de Lei dos Crimes Ambientais” que determina sanções penais e administrativas aos geradores de resíduos os quais são os responsáveis pelo destino inadequado do mesmo. Como legislação mais recente, a Resolução CONAMA nº 375 de agosto de 2006 define critérios e procedimentos para o uso agrícola do lodo gerado em Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), um método de reciclagem de resíduos, uma das ações para o manejo de resíduos enfatizado pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PRNS), intitulada pela Lei 12.305 de agosto de 2010, a qual ainda possui princípios como o da prevenção à poluição e do poluidor-pagador, e ainda fornece diretrizes para o correto gerenciamento de resíduos sólidos.

Além da pressão do quesito ambiental, há a pressão da sociedade pela cobrança de maior qualidade e cobertura dos serviços de água e esgoto. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2014), 50,3% da população brasileira possui acesso à coleta de esgoto dos quais apenas 42,67% são tratados. Não há dados consistentes sobre a destinação adequada de lodo no Brasil, mas segundo Von Sperling *et al* (2007b) há uma relação de 0,1 a 0,15L/hab/dia de lodo a ser disposto. Atualmente com a população de quase 207 milhões, apenas 44.428.430 de habitantes são atendidos pelo tratamento de esgoto, o que equivale um mínimo de 4.443m³/dia de lodo a ser destinado. Se hoje já existe dificuldade para destinação ambientalmente correta deste volume, em longo prazo este número tende a um crescimento exponencial com a universalização dos serviços de

saneamento proposto pelo Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB (MMA, 2013). A Resolução nº 375 (CONAMA, 2006) também já considera o aumento problemático de produção de lodo por ser uma característica intrínseca dos processos de tratamento de esgoto, o qual tende um crescimento no mínimo proporcional ao crescimento da população brasileira.

O triângulo do desenvolvimento sustentável se integraliza com o impacto na economia das concessionárias devido ao aumento de exigências na qualidade e quantidade do lodo a ser destinado. Os custos para o gerenciamento do lodo podem significar de 20 a 60% do total da ETE (VON SPERLING *et al*, 2007b). De acordo com Vesilind (1980 *apud* MORTARA, 2011), “o tratamento da fase sólida e a destinação ou disposição final do lodo são responsáveis, aproximadamente, por 40% do investimento inicial, 50% do custo de operação e 90% dos problemas operacionais de uma ETE”.

Por estes motivos as concessionárias públicas e privadas de saneamento têm buscado pela solução individualizada para cada tipo de ETE, pois o adequado planejamento para destinação final do lodo é determinado a partir de uma série de características, desde sua concepção de tratamento do esgoto, que influencia na quantidade e tipo de lodo, até as etapas de tratamento do lodo que incluem ou podem incluir: estabilização, adensamento, condicionamento, desaguamento englobando as fases de drenagem e secagem, e higienização.

Mais de 90% do lodo produzido no mundo tem sua destinação final por meio de três processos: incineração, disposição em aterros e uso agrícola (ANDREOLI *et al*, 2001). Todas as três requer que o lodo gerado tenha seu teor de umidade reduzido, já que em média 95% de sua composição é água.

A etapa do desaguamento de lodo é a que demanda maior operação e custos para ETE, mas que se for eficiente, é também a mais importante para que os custos de transporte e destinação sejam reduzidos, porque através dessa etapa ocorre a remoção da maior parte do volume de lodo, relativo à água livre presente neste resíduo. Tendo em vista as diversas tecnologias para o gerenciamento dos lodos, a análise tecnológica dessas alternativas tem o objetivo de determinar qual método terá melhor desempenho para cada tipo de ETE. Geralmente em ETE's de pequeno a médio porte localizados fora da área urbana e com disponibilidade de área, o método natural de desaguamento mais utilizado é o leito de secagem. Por outro lado, se a ETE for de grande porte e localizada em área urbana, os métodos mecanizados, como a centrífuga, são os mais utilizados.

No Brasil, o método mais utilizado e antigo é o leito de secagem. Apesar do uso das tecnologias mecanizadas terem aumentado nos últimos anos, ainda existe a tendência de se optar pelo leito de secagem para o desaguamento de lodo em ETE municipais, visto que além do clima do país ser propício a secagem natural, a população de 44% dos municípios brasileiros está abaixo de 10.000 habitantes (IBGE, 2015), ou seja, considerado de pequeno porte.

O projeto de leito de secagem no Brasil é caracterizado por um tanque retangular onde em seu interior é incluído uma camada filtrante composta de areia e brita para permitir a drenagem da água presente no lodo (ABNT, 2011). As vantagens da utilização de leitos de secagem são: baixo valor de investimento, simplicidade operacional, baixo consumo de energia elétrica, baixa sensibilidade a variações nas características do lodo e torta de lodo com alto teor de sólidos. Entre as desvantagens destacam-se: elevada área requerida, necessidade de estabilização prévia do lodo, influência do clima no desempenho operacional, lenta remoção do lodo seco, elevada mão de obra para limpeza, limite de teor de sólidos de lodo em 30% para não dificultar a remoção, facilidade em colmatção (entupimento) ocasionando maior frequência de manutenções no meio filtrante.

Com o objetivo de minimizar as desvantagens deste processo natural de drenagem e secagem, evoluções nos sistemas têm surgido, dentre os quais podem-se destacar o leito com piso de blocos drenantes, ou *wedge wire* como é chamado internacionalmente.

O bloco drenante é um meio filtrante que substitui as camadas de brita e areia de um leito convencional, o qual já vem sendo aplicado no Brasil por indústrias e concessionária de águas e esgotos.

Apesar do leito com piso de blocos drenantes já ser aplicado em escala real, existe pouco estudo sobre o seu desempenho, assim como informações para o dimensionamento dos leitos. Atualmente no Brasil, o dimensionamento de qualquer modalidade de leito de secagem é baseado na NBR 12.209 (ABNT, 2011), que estabelece normas para projeto de ETE e define como taxa de aplicação de sólidos (TAS) máxima de 15kg de sólidos em suspensão total de lodo por m² de leito de secagem. Alguns projetistas relatam dificuldades ao considerar apenas esta informação para projetar um leito de secagem, pois ao determinar a TAS não consideram o tipo e a característica do lodo bruto, nem as condições climáticas do meio ambiente em que ocorrerá a secagem. A umidade do lodo final requerida também é um fator determinante no tempo de secagem, e que definirá quando o lodo deve ser removido do leito e preparado para o próximo descarte. Segundo a PNRS o lodo é um resíduo sólido e, portanto, após a remoção nos leitos, este deve ser destinado de

forma ambientalmente adequada, priorizando reuso e reciclagem para lodos estabilizados. Apesar disto, a prática comum no Brasil ainda é encaminhar o lodo de ETE para aterros após seu desaguamento, o que está em desacordo com a PNRS, que prevê a disposição apenas de rejeitos em aterro sanitário. Apesar disto, vale ressaltar que para disposição de lodo em aterros, geralmente exige-se em torno de 65% de umidade, ou seja, 35% de sólidos totais (ST). Uma torta de lodo com teor de 40% de ST pode ser alcançada dentro de 2 a 6 semanas em leito de secagem convencional com boas condições climáticas para um lodo bem digerido (USEPA, 1987).

Portanto, nesta dissertação buscou avaliar o leito com piso de blocos drenantes (*wedge wire*) para o desaguamento de lodos aeróbio e anaeróbio gerados em ETE, a operação do sistema, bem como as variações que podem afetar no seu desempenho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa foi de avaliar o leito de secagem com piso de blocos drenantes para o desaguamento de lodo gerados em Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários nas fases de drenagem e secagem natural.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar em escala real o desempenho do leito com piso de blocos drenantes durante o desaguamento de lodo aeróbio em quatro períodos do ano distintos com diferentes condições climáticas;
- Testar e avaliar o desempenho do leito com piso de bloco drenante em escala piloto durante o desaguamento de lodo anaeróbio em três períodos do ano com diferentes condições climáticas;
- Levantar as variáveis que podem interferir no desempenho do sistema, tanto operacionais quanto climáticas;
- Pesquisar a opinião de operadores de ETE que já utilizam o leito de secagem com piso de blocos drenantes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Geração e caracterização de lodo em sistemas de tratamento de esgoto sanitário

Durante as etapas do tratamento de esgoto sanitário são gerados sólidos que também devem receber tratamento específico antes de sua disposição final. Estes resíduos removidos da fase líquida são os sólidos grosseiros, areia, espuma e, lodo primário, secundário e químico (quando houver etapa físico-química). Neste trabalho será abordado apenas o lodo que é gerado no tratamento biológico do esgoto.

A finalidade da etapa biológica do tratamento de esgoto é a remoção da matéria orgânica, cujas bactérias são as responsáveis pela sua degradação, usando-a tanto como fonte material quanto como fonte de energia.

Quando a bactéria usa a matéria orgânica (MO) como fonte material, cujo processo é denominado anabolismo, ela transforma a MO em massa celular causando um aumento de massa bacteriana, que está presente no tratamento como suspensão de flocos ou lodo biológico. O anabolismo depende da disponibilidade da energia química para a bactéria, a qual é liberada quando a bactéria transforma material orgânico em produtos estabilizados, processo chamado de catabolismo (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

O catabolismo pode ser de dois tipos: oxidativo ou fermentativo. No processo oxidativo, o material orgânico é oxidado por um agente extracelular presente no sistema de tratamento, geralmente o oxigênio, nitrato e/ou o sulfato. Os produtos da oxidação do material orgânico são compostos inorgânicos estáveis, sendo o dióxido de carbono (CO₂) e a água os mais importantes.

Já processo fermentativo resulta de uma transferência intramolecular de elétrons de tal maneira que o composto catabolizado se decompõe em pelo menos duas partes: uma

será mais oxidada e a outra mais reduzida do que o composto original (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001). Dentre os processos fermentativos a digestão anaeróbia é a mais utilizada nos tratamentos de esgoto e tem como produtos finais o metano e o CO₂. O metano não pode ser mais reduzido e o CO₂ não pode ser mais oxidado, sendo assim a digestão anaeróbica é considerada a última fermentação, ou seja, os produtos são estáveis.

A proporção entre a massa de matéria orgânica utilizada nos processos anabólicos e catabólicos depende da quantidade de energia liberada no catabolismo. O efeito energético do catabolismo oxidativo é muito mais significativo do que o catabolismo fermentativo, porque, neste último, grande parte da energia química originalmente presente no material orgânico fermentado fica contida no metano (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001). Por este motivo, a energia disponível para o processo anabólico para as bactérias que usam o catabolismo oxidativo é maior do que para as bactérias fermentativas, e desta forma tendem a crescer mais por unidade de massa de material orgânico. O anabolismo causa aumento de massa de lodo, comumente expresso pelos sólidos voláteis em suspensão (SVS), e o catabolismo causa consumo de oxigênio se for através de mecanismo oxidativo ou, produção de metano, no processo fermentativo. Segundo Van Haandel e Cavalcanti (2001), vários pesquisadores relatam uma proporção entre a massa de lodo gerada e a massa de demanda química de oxigênio (DQO) metabolizada, dada pela razão representada na Equação 1.

$$Y = \frac{\Delta X_v}{\Delta S_{met}}$$

Equação 1

Sendo:

Y = coeficiente de rendimento;

ΔX_v = massa em kg bacteriana gerada (massa de lodo volátil);

ΔS_{met} = massa em kg de DQO metabolizada (matéria orgânica ou substrato).

No caso de metabolismo em ambiente aeróbio o valor do coeficiente de rendimento é uma constante e não depende do MO. Com base em pesquisas, Marais e Ekama (1976 *apud* VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001), sugeriram um valor de coeficiente de rendimento em ambiente aeróbio (Y_{ae}) de 0,45gSVS/gDQO_{met}. Segundo Von Sperling *et al* (2007a) o valor da proporção de kgSVS/kgDQO em sistema de lodos ativados

convencional varia de 0,6 a 0,8, enquanto em lodos ativados de aeração prolongada gera 0,5 kgSVS/kgDQO.

Por outro lado, o valor do coeficiente de rendimento em ambiente anaeróbio (Y_{an}) depende da natureza do material orgânico porque a digestão anaeróbia é um processo complexo desenvolvido em etapas e com várias populações de bactérias envolvidas. Devido a isso, o Y_{an} pode variar de 0,04 a 0,06gSVS/gDQO_{met}, adotando-se a média de $Y_{an} = 0,05\text{gSVS/gDQO}_{\text{met}}$ (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001). Segundo Von Sperling *et al* (2007a) o Y_{an} varia de 0,12 a 0,18 kgSVS/kgDQO.

Para estimar a produção de lodo em sistemas de tratamento é necessário conhecer dois aspectos cinéticos e estequiométricos do processo biológico: a produção líquida de sólidos biológicos (anabolismo pela massa bacteriana), subtraído pela mortandade (decaimento ou catabolismo da massa bacteriana).

O decaimento bacteriano pode ser determinado experimentalmente observando-se o comportamento da massa bacteriana ativa (lodos ativados) quando esta não é alimentada. No caso de lodo aeróbio, o decaimento pode ser determinado pelo consumo de oxigênio associado à oxidação de massa celular ou à diminuição da concentração de SVS. De acordo com Van Haandel e Marais (1999), a taxa de decaimento é um processo de primeira ordem, sendo que uma grande parte da massa decaída é oxidada para produtos minerais, enquanto uma fração do material decaído permanece como sólido volátil não biodegradável, chamado de resíduo endógeno, que se acumula no sistema de tratamento. A partir de resultados experimentais para uma temperatura de 20°C a massa bacteriana decai 1% por hora (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001). No caso de lodo anaeróbio, a taxa de decaimento é muito menor porque este mantém sua capacidade metabólica após longos períodos sem alimentação de material orgânico. Sendo assim, o decaimento de lodo ativo anaeróbio em sistemas de tratamento pode ser considerado insignificante.

A eficiência dos processos biológicos usados para o tratamento de esgotos depende da dinâmica de utilização de substrato e do crescimento microbiano (METCALF; EDDY, 2014). A remoção do material orgânico depende da cinética do metabolismo bacteriano e também da massa de lodo disponível para este metabolismo. A proporção entre o material orgânico biodegradável e a massa bacteriana presente no sistema é determinada pela idade do lodo. A idade do lodo é a principal variável operacional do sistema, que indica o tempo de permanência médio dos sólidos, podendo ser determinado pela razão entre a massa de lodo presente no sistema e a massa de lodo descartado. Quanto maior a idade de lodo,

maior será a massa bacteriana atuante no processo metabólico de utilização de MO, e portanto, maior será a eficiência na remoção de material biodegradável.

Na maioria dos esgotos, a MO é uma mistura de muitos compostos divididos em duas categorias principais: material biodegradável, que são os compostos que podem ser utilizados pela massa bacteriana, e material não biodegradável, que são compostos não afetados pela ação bioquímica das bactérias. Cada uma dessas frações é subdividida em uma fração solúvel, compreendendo os compostos dissolvidos, que são de fácil acesso para o metabolismo bacteriano, e outra fração particulada, composta de material coloidal que precisa ser hidrolisado antes de ser utilizado pela bactéria (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999). Independente da atividade biológica do lodo, o intenso contato entre os flocos de lodo e as partículas de MO do afluente faz com que essas partículas sejam floculadas e passem a fazer parte do lodo, sendo posteriormente utilizadas pelas bactérias caso forem biodegradáveis. As partículas não biodegradáveis irão se acumular no reator, formando a fração inerte do lodo, até que sejam descartadas como lodo de excesso. A característica desse lodo de excesso é diferente dependendo do sistema de tratamento empregado.

3.1.1 *Geração de lodo em sistemas de tratamento anaeróbio*

Como mencionado anteriormente, o decaimento da massa bacteriana em tratamento anaeróbio é muito lento, por isso acaba sendo desconsiderado. Com isso tem-se que o lodo volátil compõe de três frações: (1) a massa bacteriana gerada durante o anabolismo; (2) o lodo inerte, originado na floculação de material orgânico não biodegradável e particulado; e (3) o substrato particulado ainda não hidrolisado. A proporção entre as três frações do lodo depende da composição do material orgânico afluente e da idade do lodo (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001). Na Figura 1 está esquematizada a interação entre o material orgânico afluente e o lodo em sistemas anaeróbios.

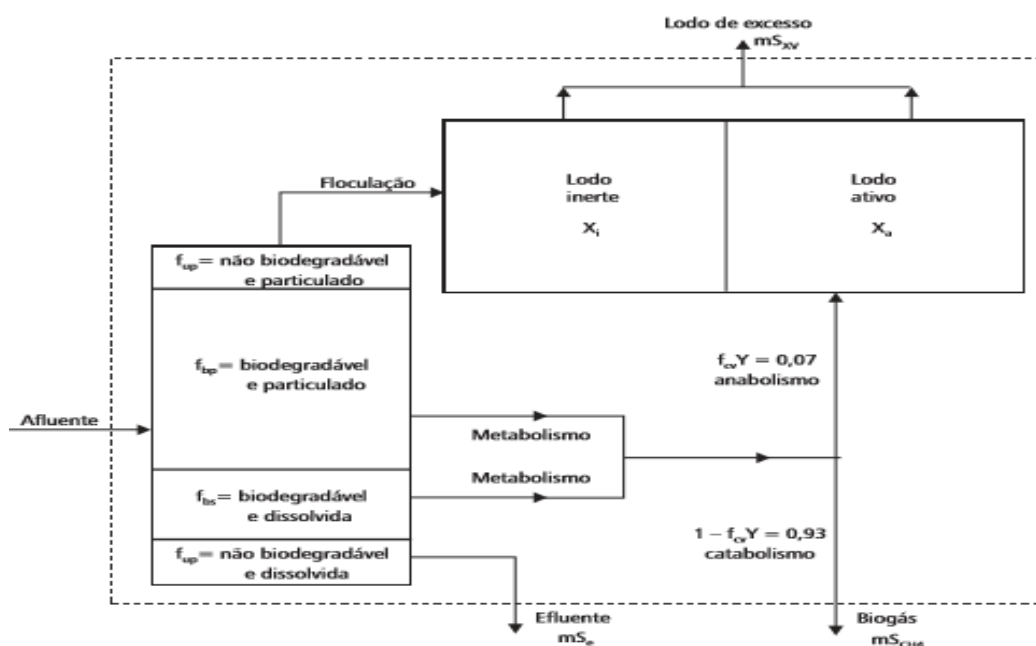


Figura 1 - Interação entre a matéria orgânica afluyente e o lodo em sistema anaeróbico.

(Fonte: VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

Em um sistema ideal de tratamento anaeróbico, a MO afluyente pode sair de três formas: (1) como material solúvel e não biodegradável no efluente, (2) como lodo inerte ou ativo ou (3) como gás após convertido em metano. No sistema ideal a fração do material orgânico não biodegradável no lodo será igual à fração do material orgânico particulado e não biodegradável (lodo inerte) mais a fração anabolizada da fração biodegradável (lodo ativo).

Na Figura 2 está apresentada a relação da fração de material biodegradável no lodo de excesso com a idade do lodo. A fração de material orgânico biodegradável no lodo fica abaixo de 15% quando a idade do lodo é maior que 50 dias. Para valores menores que 50 dias, a fração biodegradável aumenta exponencialmente. Quanto maior a fração volátil no lodo, menor é seu grau de estabilidade e maior a dificuldade em separar a água dos sólidos (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

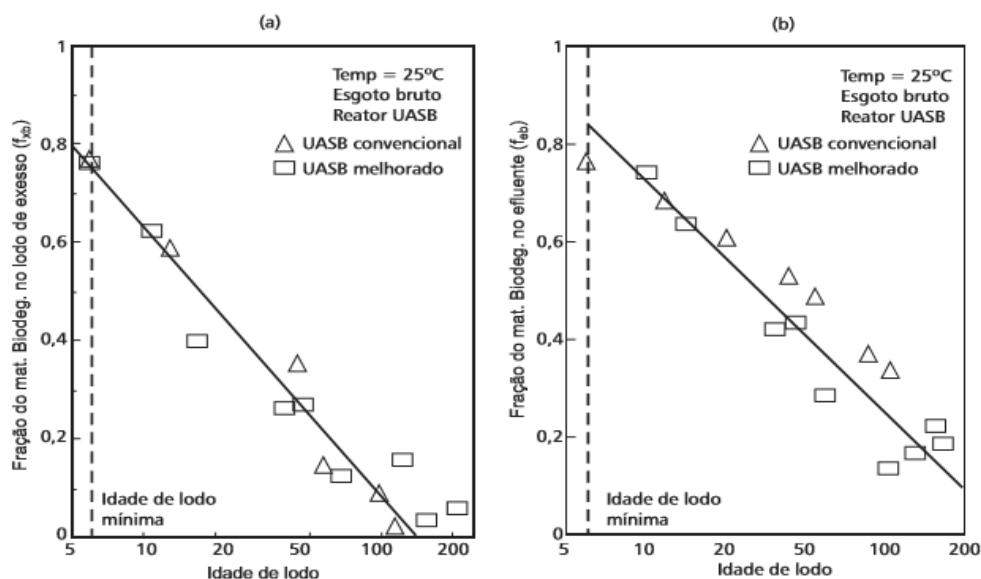


Figura 2 - Fração de matéria orgânica biodegradável no lodo de excesso e no efluente, em função da idade do lodo.

(Fonte: VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

Para disposição de lodo no solo, a *United States Environmental Protection Agency* - USEPA (1979 *apud* VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001) estabelece que não deve haver mais que 38% de material biodegradável no lodo. Segundo a Figura 2, a fração biodegradável no lodo de excesso seria menor que 40% para idade de lodo acima de 20 dias. Por esta razão, esse valor é indicado como idade de lodo mínima que deve ser aplicada em sistemas de tratamento anaeróbio. Também é possível observar a curva da fração do material orgânico biodegradável no efluente, o qual se comporta semelhante à do material biodegradável no lodo, o valor é inversamente exponencial à idade do lodo. Uma diminuição da idade de lodo leva a um menor grau de estabilização do lodo, e uma menor eficiência na remoção de matéria orgânica no efluente. A presença desse material biodegradável no efluente e no lodo de excesso é inevitável e não decorre apenas de eventuais falhas no projeto do sistema de tratamento anaeróbio, é também devido à cinética da digestão anaeróbia, que resulta em processos metabólicos lentos e incompletos (VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

3.1.2 **Geração de lodo em sistemas de tratamento aeróbio**

Segundo Van Haandel e Cavalcanti (2001) as considerações sobre a geração de lodo em sistemas de tratamento aeróbio são mais complicadas devido a três fatores:

1. O decaimento de lodo é importante, de maneira que tem de ser levada em consideração a demanda de oxigênio para a respiração endógena e a geração de resíduo endógeno no sistema;
2. O lodo ativo é instável, morrendo pouco tempo depois de se interromper a aeração. Geralmente, o lodo produzido em sistema aeróbio é introduzido em um digestor anaeróbio para a redução da massa bacteriana aeróbia.
3. São produzidos lodos de naturezas diferentes. Em sistemas de lodos ativados convencional aplica-se a decantação primária para reduzir fração de material particulado no reator aeróbio, obtendo lodo primário, que posteriormente será levado para o digestor. O lodo produzido no reator biológico é denominado lodo secundário ou biológico.

Na Figura 3 está apresentada a interação entre a MO do afluente e o lodo em sistemas de tratamento aeróbio. Ao comparar com a Figura 1, há duas diferenças importantes: (1) no processo catabólico ocorre oxidação da MO em vez de digestão anaeróbia e (2) o decaimento de lodo é mais rápido, e por isso forma-se uma quantidade significativa de resíduo endógeno, e havendo ao mesmo tempo, consumo expressivo de oxigênio para atender à demanda da respiração endógena.

A fração da DQO afluente, que não é descartada no efluente e não está no lodo, é oxidada no sistema. Frações da DQO são oxidadas durante a respiração exógena, respiração endógena ou durante o decaimento bacteriano.

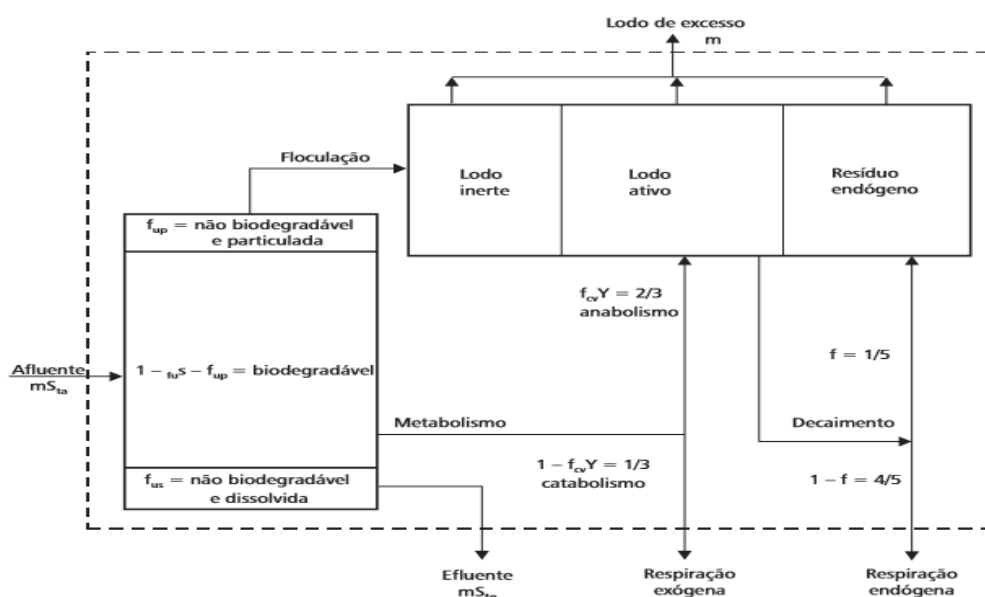


Figura 3- Interação entre a matéria orgânica do afluente e o lodo em sistemas de tratamento aeróbio.
(Fonte: VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

Na Figura 4 estão apresentadas as frações da MO transformadas em lodo aeróbio, oxidadas ou descartadas no efluente, em função da idade de lodo em um sistema ideal, onde o metabolismo do material biodegradável seria completo. É possível observar que o decaimento do lodo ativo aumenta quando a idade de lodo aumenta, a demanda de oxigênio para a respiração endógena tende a exceder a demanda para a respiração exógena. Para uma idade de lodo maior que 20 dias, a massa do resíduo endógeno excede a massa do lodo ativo.

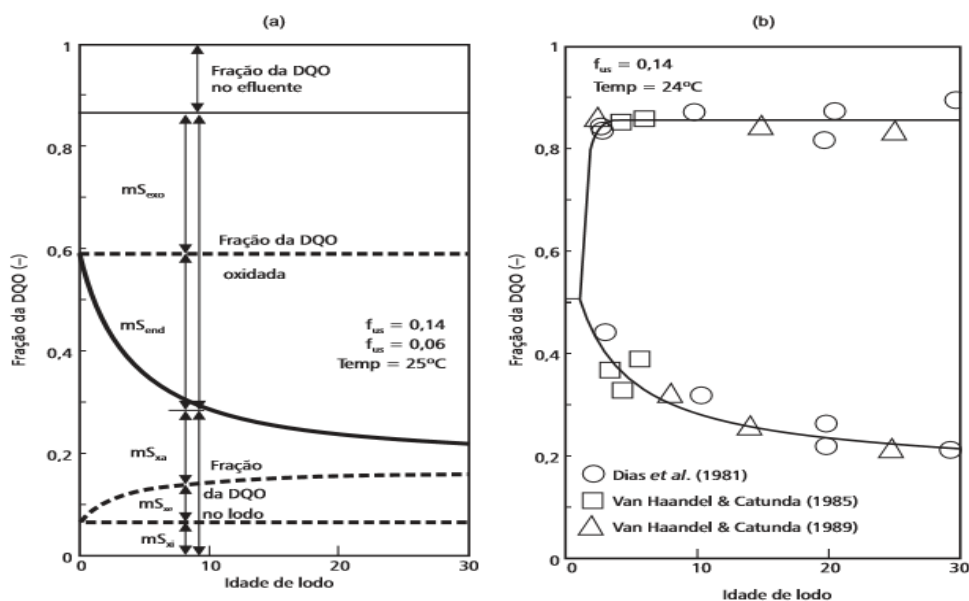


Figura 4 – Divisão da matéria orgânica afluente entre as frações do efluente.
(Fonte: VAN HAANDEL; CAVALCANTI, 2001).

O gráfico (a) da Figura 4 apresenta a divisão da MO em sistemas aeróbios ideais, mas na prática não ocorre uma remoção de 100% do material orgânico biodegradável. Entretanto, diferente dos sistemas de tratamento anaeróbio, no tratamento aeróbio há uma boa percepção sobre a cinética do metabolismo bacteriano, o que permite calcular a eficiência de remoção do material biodegradável. De acordo com Van Haandel e Marais (1999), a remoção da MO biodegradável pode ser considerada completa, a menos que a idade de lodo seja muito curta, menor de 2 dias. Isso se deve ao fato da capacidade metabólica de utilização da MO ser maior no lodo aeróbio do que no lodo anaeróbio, o que resulta em uma maior eficiência de remoção da mesma. É possível observar no gráfico (b) da Figura 4, que com exceção da faixa de idade do lodo muito curta, o sistema real é aproximado do sistema ideal.

De acordo com Van Haandel e Cavalcanti (2001) no que se refere à produção de lodo, o sistema anaeróbio possui vantagens em comparação ao sistema aeróbio, pois:

1. A produção de sólidos voláteis é inferior e, por isso, as unidades de processamento do lodo de excesso podem ser menores;
2. No caso do reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) ou sistemas anaeróbios semelhantes, a concentração do lodo é muito maior;
3. A fração de material biodegradável no lodo aeróbio é muito maior, uma vez que o próprio lodo ativo é putrescível. Por outro lado, o material biodegradável no lodo de excesso de sistemas anaeróbios é resultado do material orgânico do afluente que ainda não foi metabolizado.

Devido à alta fração de material biodegradável em lodo aeróbio existe a necessidade de aplicar um sistema de estabilização de lodo.

3.1.3 **Caracterização e quantificação de lodo**

As características do lodo afetam diretamente os processos de seu tratamento e destinação ambientalmente adequada. De acordo com Metcalf e Eddy (2014), as características variam dependendo da origem do lodo, o período de armazenamento e o tipo de processo que o lodo foi submetido. Na Tabela 1 estão apresentados alguns tipos de lodo produzidos durante o tratamento de esgoto.

A quantidade de lodo também varia com o tipo de processo e operação do sistema. A quantidade de lodo é geralmente expressa sob a forma de volume, incluindo as parcelas de água e sólidos em m³ de lodo, ou massa de sólidos secos, representado como kg de sólidos totais (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Tabela 1 – Características de lodos gerados no processo de tratamento de esgoto.

Tipo	Origem	Descrição
Lodo primário	Decantador primário	Sólidos removidos por sedimentação. Geralmente apresentam cor cinza e forte odor.
Lodo Biológico aeróbio (não estabilizado)	Lodos ativados convencional; reatores aeróbios com biofilmes.	Biomassa de microrganismos gerada no metabolismo da matéria orgânica. Esta biomassa está em constante crescimento, em virtude da entrada constante de matéria orgânica nos reatores. Para manter o sistema em equilíbrio, aproximadamente a mesma quantidade de sólidos gerados precisa ser removido do sistema. Como o tempo de permanência no sistema é mais baixo este lodo não se encontra estabilizado. O lodo em boa condição tem um odor inofensivo e cor marrom.

continua

Continuação

Lodo Biológico aeróbio (estabilizado)	Lodos ativados de aeração prolongada; Digestor aeróbio	No caso do sistema lodos ativados de aeração prolongada a disponibilidade de alimento é menor e a idade do lodo maior, com isso as bactérias se alimentam da própria massa celular. O lodo geralmente de cor marrom escuro e odor inofensivo. Quando bem digerido, o lodo deságua muito bem em leitos de secagem.
Lodo Biológico Anaeróbio (estabilizado)	Reatores e digestores anaeróbios; Lagoas de estabilização	Biomassa de microorganismos gerada no metabolismo da matéria orgânica por catabolismo fermentativo. O lodo é de cor marrom escuro a preto e contém uma grande quantidade de gás. Quando completamente digerido possuem odor inofensivo e têm aparência de piche.

Fonte: Adaptado METCALF; EDDY (2014); VON SPERLING *et al* (2007b).

A parcela de sólidos secos no lodo costuma ser representada em porcentagem como teor de sólidos, muito utilizado para determinar as etapas do tratamento do lodo e também, na concentração de sólidos exigidos na disposição final. Um lodo com 2% de teor de sólidos possui uma umidade de 98%. Assim, em cada 100kg de lodo, 98kg são de água e 2kg são de sólidos. Na Tabela 2 estão apresentadas as concentrações de lodo esperadas a partir de cada processo.

Tabela 2 - Concentração de sólidos em lodo gerado durante o tratamento de esgoto.

Operação/Processo	Concentração de sólidos, % sólidos secos		
	Metcalf & Eddy (2014)	Jordão & Pessoa (2014)	Von Sperling <i>et al</i> (2007b)
Lodo primário	1-6	-	2-6
Lodo primário adensado	3-10	4-10	4-8
Lodo ativado em excesso (convencional)	0,5-1,5	0,5-1,5	0,6-1
Lodo ativado em excesso (aeração prolongada)	0,8-2,5	0,8-2,5	0,8-1,2
Lodo misto (primário e ativado) adensado	2-6	2-6	3-7
Lodo ativado adensado por flotação (com polímero)	4-6	-	2-5
Lodo ativado adensado por flotação (sem polímero)	3-5	-	-
Lodo ativado adensado por centrifugação	4-8	3-8	3-7
Lodo misto estabilizado por digestão anaeróbia	1,5-4	2,5-7	3-6
Lodo misto estabilizado por digestão aeróbia	1,5-4	1,5-4	-

A partir do teor de sólidos também é possível determinar o volume de lodo, como segue na Equação 2 (JORDÃO & PESSOA, 2014):

$$V = \frac{M}{ST \cdot \rho \cdot \gamma} = \frac{M}{\left[\left(\frac{ST}{100}\right) \cdot \rho \cdot 1000\right]} = \frac{M}{ST \cdot 10}$$

Equação 2

Onde:

V = volume (m³)

ρ = densidade do lodo, de ordem 1,01

M = massa de sólidos secos (kg)

γ = massa específica da água = 1000 kg/m³

ST = teor de sólidos no lodo (%).

A Equação 2 mostra que a variação de volume de lodo é aproximadamente inversamente proporcional ao teor de sólidos, uma vez que a massa de sólidos permanece inalterada ao longo do tratamento. Assim, para as duas condições, antes e depois do tratamento do lodo, a relação volume/teor de sólidos pode ser escrita como segue as Equação 3 e Equação 4.

$$\frac{V1}{V2} = \frac{ST1}{ST2} \quad \Longrightarrow \quad V2 = V1 \frac{ST1}{ST2}$$

Equação 3

Admitindo a umidade, H = 100 – ST:

$$\frac{V1}{V2} = \frac{100 - H2}{100 - H1} \quad \Longrightarrow \quad V2 = V1 \frac{100 - H1}{100 - H2}$$

Equação 4

A Equação 4 mostra que uma pequena redução na umidade do lodo resulta em elevada redução do volume inicial do lodo (JORDÃO & PESSÔA, 2014). Considerando o exemplo de lodo com umidade inicial de 98%, após o desaguamento a umidade cai para 95%, e o volume final de lodo cai para 40m³ se o inicial for de 100m³.

Outras características do lodo que influenciam a escolha das etapas do tratamento são:

Carga da superfície das partículas:

A carga elétrica superficial é responsável pela força de repulsão entre as partículas coloidais e os flocos, impedindo que elas se juntem e formem flocos maiores e mais densos. Ademais, as partículas de lodo atraem as moléculas de água mais fracas para sua superfície (hidratação) tanto por ligação química ou por ação da capilaridade, não resistem o adensamento e interferem no desaguamento (USEPA, 1987). O condicionamento químico é usado para vencer estes efeitos de carga e hidratação reduzindo, e até mesmo eliminando a força de repulsão, o que permite que as partículas se juntem e floculem.

Tamanho das partículas:

Fator importante que influencia o desaguamento, pois segundo Wang *et al* (2007) quanto menor o diâmetro médio das partículas, maior é a resistência ao desaguamento. Isto ocorre porque a área de superfície e a relação superfície/volume para uma determinada massa de lodo aumentam. De acordo com a USEPA (1987) os efeitos do aumento da área de superfície são: maior força de repulsão entre as partículas e maior capacidade de hidratação. O lodo primário, por conter maior quantidade de material inorgânico, possui maior tamanho médio de partículas comparado ao lodo secundário. Em contrapartida, o efluente do decantador primário ainda possui alta concentração de partículas mais finas e dissolvidas. O processo de lodo ativado, além de remover a maior parte da fração dissolvida do material orgânico, tem função de capturar, remover e consequentemente recuperar estas partículas através da biocoagulação e floculação. Por este motivo o lodo ativado é mais fino que o lodo primário, pois é normalmente composto de 60-90% de material orgânico celular e contém uma quantidade muito grande de água (USEPA, 1987).

Compressibilidade:

Numa situação ideal, as partículas de lodo não se deformam e a resistência à filtração seria proporcional à profundidade do lodo. Com isso não haveria aumento da resistência de filtração conforme o avanço do desaguamento. Todavia, as partículas do lodo são compressíveis causando deformação e redução da área de vazão entre as partículas, diminuindo os caminhos que serviriam para escoamento da água através do lodo, ou seja, reduz a taxa de desaguamento. O condicionamento do lodo melhora o desaguamento, pois produz um sólido floculado, e com isso, libera muito mais água livre para filtração. Quando o lodo floculado é depositado sobre o meio filtrante, a massa de lodo retém a porosidade consideravelmente. Entretanto, uma pressão muito alta atravessando o floco de

lodo pode levar o lodo condicionado ao colapso e causar um decréscimo da taxa de filtração. O resultado do condicionamento é a remoção de água mais rápida, principalmente devido à taxa de remoção de água ser mais alta no começo do ciclo de filtração (USEPA, 1987).

Composição química:

A composição química do lodo também é um fator importante para a escolha dos processos de tratamento e disposição final. O pH, alcalinidade e o teor ácido orgânico são medidas que influenciam no controle do processo de digestão anaeróbica. A concentração de metais pesados, pesticidas e nutrientes deve ser determinada quando a aplicação em solos for o destino final, assim como, o poder calorífico e hidrocarbonetos quando a destinação for a incineração. Na Tabela 3 estão apresentados alguns dados de composição química do lodo bruto.

Tabela 3 - Composição química de lodo de esgoto.

Parâmetro	Lodo primário		Lodo ativado	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
Sólidos voláteis (%ST)	60-95	75	60-85	70
Nitrogênio (N %ST)	1,5-4	2,5	2,4-5	3,8
Fósforo (P_2O_5 %ST)	0,8-2,8	1,6	2,8-11	5,5
Potássio (K_2O %ST)	0-1	0,4	0,5-0,7	0,6
Ferro	2-4	2,5	-	-
pH	5-8	6	6,5-8	7,1
Alcalinidade (mg/L $CaCO_3$)	500-1500	600	580-1100	790
Ácido Orgânico (mg/L HAc)	200-2000	500	1100-1700	1350
Teor Energético (kJ/kg SSV)	23.000-29.000	25.000	19.000-23.000	20.000

Fonte: Adaptado Metcalf; Eddy, 2014.

A matéria orgânica no lodo é representada pela porcentagem de sólidos voláteis (SV) nos sólidos totais (ST). Quanto menor a relação SV/ST, maior a presença de sólidos fixos no lodo, e, portanto, maior o grau de estabilização da matéria orgânica no lodo. Maior quantidade de sólidos fixos no lodo também indica um melhor desaguamento (USEPA, 1987). Um lodo mal digerido não forma, após o desaguamento, fissuras responsáveis pelo aumento da área de exposição ao ambiente, e consequentemente pelo aumento da taxa de evaporação. Este tipo de lodo quando desaguado em leito de secagem convencional pode chegar ao máximo 30% de teor de sólidos, e para isso, demanda de um maior período de

secagem (SAMUDIO, 1993 *apud* MORTARA, 2011). Segundo Jordão e Pessôa (2014) a verificação SV/ST além de ser relevante para os processos de estabilização, também é importante para a incineração, aplicação no solo, na produção de fertilizantes e como indicador de problemas de odor.

Embora o lodo apresente teores de nutrientes N-P-K mais baixos que os fertilizantes comerciais, encontrados em geral na proporção de 5-10-10%, é um excelente produto para a produção do mesmo por conter em média proporção de 3,3-2,3-0,3% (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Quanto à septicidade, o lodo séptico é mais difícil de desaguar e requer dosagens maiores de condicionantes químicos do que o lodo fresco. Isto acontece devido à redução do tamanho das partículas, à geração de gases que ficam nos vazios do lodo e à mudança de características de superfície criada pela bio-conversão (USEPA, 1987). Segundo Jordão e Pessôa (2014), em relação à transmissão de doenças, o lodo seco não é considerado um material perigoso, embora a constatação de ovos helmintos requererem cuidados especiais no manuseio. Já o lodo fresco, sem estabilização, concentra a maior carga de microrganismos contidos inicialmente no afluente. Os agentes patogênicos que podem ser encontrados no lodo são: ovos de helmintos, cistos de protozoários, bactérias entéricas patogênicas e vírus patogênicos.

3.2 Etapas do gerenciamento do lodo

Como já mencionado, o lodo de esgoto se apresenta de forma líquida com concentração de sólidos baixa. O lodo biológico, bem como os gerados em outras etapas, vai requerer uma série de operações específicas de gerenciamento até chegar na sua destinação final, os quais incluem no todo ou em parte:

- Adensamento;
- Estabilização;
- Condicionamento
- Remoção de umidade (Desaguamento: Drenagem e Secagem);
- Higienização
- Destinação ambientalmente adequada.

3.2.1 Adensamento

A etapa de adensamento do lodo consiste no aumento da concentração de sólidos nele contido através da remoção parcial da quantidade de água que caracteriza seu grau de umidade. A finalidade principal é a remoção de volume a ser processado, e consequentemente remoção dos custos de implantação e operação das unidades seguintes. De acordo com Metcalf e Eddy (2014), o lodo ativado bombeado do decantador secundário com uma concentração de 0,8% de sólidos, após o adensamento pode atingir teor de sólidos de 4%, ou seja, uma redução de 5 vezes em volume. Os adensadores também tem função de misturar vários tipos de lodo, equalizar a vazão e clarificar o líquido removido.

Esta etapa de tratamento é mais comum em ETE com processos de lodos ativados para adensamento do lodo secundário ou lodo misto (primário e secundário). Em ETE que utiliza tratamento por reatores anaeróbios, tipo o UASB, o adensamento geralmente já ocorre dentro do próprio reator onde acontece a concentração de lodo no fundo do tanque.

A concentração do lodo pode ser por três tipos: adensador por gravidade, adensador por flotação ou adensador mecânico (centrífugas e prensas).

Segundo Jordão e Pessôa (2014), o adensador por gravidade é muito eficiente, mas não tem um bom desempenho para lodos secundário e misto. Para estes casos, os flotadores com adição de produtos químicos e injeção de ar comprimido apresentam maior eficiência. Na Tabela 4 estão apresentadas as faixas usuais de teor de sólido que se consegue atingir após os diversos tipos de adensamento.

Tabela 4 - Teor de sólidos (%) no adensamento do lodo.

Tipo	Faixa usual	Típico
Adensamento por gravidade de lodo primário bruto	4-10	6
Adensamento por gravidade de lodo misto	2-6	4
Adensamento por flotação de lodo ativado	3-6	4
Adensamento por centrifugação de lodo ativado	3-8	5
Adensamento em filtros de esteira de lodo ativado	4-8	5

Fonte: Jordão; Pessôa (2014).

A quantidade de lodo retido no adensamento é representada como capacidade de captura de sólidos, os quais, em adensadores por gravidade atingem entre 85 a 90% e, em flotadores por ar dissolvido acima de 95% (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

3.2.2 **Estabilização**

Os processos de estabilização do lodo têm por objetivo reduzir os patógenos, eliminar odor ofensivo, e inibir, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação (METCALF; EDDY, 2014). O sucesso em alcançar estes objetivos está relacionado com os efeitos da operação de estabilização da fração orgânica ou volátil do lodo. Quanto mais o lodo se assemelhar à matéria orgânica “fresca”, maior será seu potencial de putrefação, produção de odores desagradáveis e também, maior será seu teor de microrganismos patogênicos.

Os odores são causados por gases produzidos durante o processo de biodegradação do lodo, como aminas, diaminas, gás sulfídrico, mercaptanas e amônia. Já a origem da contaminação microbiológica do lodo é proveniente do material fecal contida no esgoto. O conteúdo microbiológico das fezes é diluído no esgoto, que mesmo assim apresenta concentração elevada de microrganismos, como por exemplo, coliformes totais na ordem de $10^6 \cdot \text{ml}^{-1}$ de esgoto. O sistema de tratamento de esgoto elimina muito deles, diminuindo a concentração de patógenos na fase líquida, mas migrando para a fase sólida, através da sedimentação do lodo provocada pelo poder de adsorção dos flocos e peso específico mais alto dos microrganismos.

À medida que o lodo fresco passa por processos de biotransformação, seus componentes orgânicos mais facilmente biodegradáveis são transformados em líquidos, sólidos dissolvidos e subprodutos gasosos, e o lodo se estabiliza, apresentando odor menos ofensivo e com menor concentração de microrganismos patogênicos.

A *Water Environment Federation* (WEF 1995) sugere o termo biossólido para qualquer lodo que tenha sido estabilizado e que possa ser usado de forma útil e benéfico de acordo com a regulamentação 40 CFR 503 (USEPA, 1992).

O grau de estabilização do lodo ao deixar um sistema de tratamento de esgotos vai depender da tecnologia de tratamento empregada. Nos sistemas de lodos ativados convencionais, em que o esgoto passa por um decantador primário, seguido de tanque de aeração e decantador secundário, há geração de lodo primário, constituído por material de sedimentado instável, e lodo ativado, também instável e que necessita passar por processos suplementares de estabilização.

Quando o sistema é do tipo lodos ativados com aeração prolongada, a estabilização do lodo ocorre dentro do próprio reator aeróbio, excluindo a etapa de digestão do lodo. Isto acontece porque a biomassa permanece no sistema por mais tempo recebendo a mesma quantidade de carga de matéria orgânica, ou seja, maior quantidade de biomassa para

menor disponibilidade de alimento. Em decorrência disso, as bactérias passam a utilizar sua própria matéria orgânica biodegradável celular para obtenção de energia para os processos metabólicos. Esta matéria orgânica celular é convertida em gás carbônico e água através da respiração endógena, o que corresponde à estabilização da biomassa (VON SPERLING *et al*, 2007a). Como o lodo secundário é estabilizado dentro do tanque de aeração, em ETE que possui este sistema não há decantador primário, para evitar a necessidade de estabilização do lodo primário em outra unidade.

Em ETE que utilizam reatores anaeróbios de fluxo ascendente, os quais retêm o lodo dentro do reator por longo período, também ocorre a estabilização do lodo durante o processo de metabolização da MO afluyente. Mesmo quando os reatores tipo UASB são seguidos por lodos ativados, o lodo produzido nessas unidades geralmente retorna ao reator anaeróbio para ser digerido. Segundo Von Sperling *et al* (2007a), como vantagem obtém-se uma massa de lodo menor a ser tratada de ordem de 40 a 50% do total produzido no sistema de lodos ativados convencional, mais concentrado e de maior facilidade para o desaguamento.

Quando a estabilização do lodo acontece durante a fase de tratamento de lodo, ela pode ocorrer por processos biológicos, estabilização química ou estabilização térmica. Na estabilização biológica o mecanismo de biodegradação ocorre por via anaeróbia ou aeróbia através dos processos de digestão anaeróbia, digestão aeróbia ou compostagem. Já o tratamento químico mais utilizado é a via alcalina, com adição de cal para elevar o pH. Quando a estabilização do lodo acontece após o desaguamento, esta etapa também pode ser chamada de higienização, geralmente feita por adição de produtos químicos ou secagem térmica.

3.2.2.1 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia do lodo é um dos métodos mais antigos de estabilização e, talvez, o mais utilizado. O processo consiste na solubilização e redução de substâncias orgânicas complexas pela ação de microrganismos, na ausência de oxigênio.

O lodo é colocado em digestores, normalmente tanques de concreto, e a biodegradação anaeróbia leva à produção de metano, dióxido de carbono e lodo estabilizado. Acontecem três reações bioquímicas dentro do digestor: hidrólise, que é a solubilização de proteínas, lipídios e carboidratos; a acidogênese, que é conversão dos compostos orgânicos solúveis em ácidos orgânicos de cadeia curta; e metanogênese,

conversão de ácidos orgânicos de cadeia curta em metano e dióxido de carbono. Em termos genéricos, uma amostra de 100kg de lodo bruto contendo 70kg de sólidos voláteis e 30kg de sólidos fixos, após a digestão anaeróbia, será transformada em 40kg de gases, 30kg de sólidos voláteis e 30kg de sólidos fixos (FERNANDES; SILVA, 2001).

A eficiência da digestão costuma ser medida de forma indireta através da redução de sólidos voláteis e está condicionado às condições de projeto das unidades. Os fatores mais importantes para o processo são: o tempo de detenção dos sólidos, tempo de retenção hidráulico e a temperatura (METCALF; EDDY, 2014).

O processo básico mais utilizado é a digestão anaeróbica mesofílica, a qual desenvolve organismos que vivem na faixa de 20°C a 45°C. Os sistemas mais antigos, porém não mais utilizado devido ao grande volume de tanque requerido, são chamados de baixa taxa e constituídos por reatores de alimentação contínua, sem mistura, e retêm o lodo por um período de 30 a 60 dias. Após modificações no processo surgiu a digestão anaeróbia de alta taxa em único estágio, onde a mistura e o aquecimento do lodo foram incluídos para reduzir o tempo de detenção de lodo para 15 a 20 dias. Segundo Metcalf e Eddy (2014), a eficiência em remoção de sólidos voláteis para esta variação de digestor pode variar de 45 a 65%, dependendo do tempo de digestão. Outra configuração muito usada nos países desenvolvidos é a digestão com duplo estágio, em que o primeiro tanque, dotado de sistema de aquecimento e misturadores, é usado para digestão, enquanto o segundo tanque tem a função de adensar o lodo digerido, permitindo a separação do sobrenadante.

Atualmente existe uma nova configuração de digestão anaeróbia avançada (DAA) desenvolvida com objetivo de aumentar a redução de sólidos voláteis e/ou produzir biossólidos de Classe A de alta qualidade, quando o mesmo deve atender critérios de qualidade específicos para assegurar que a sua utilização pelo público em geral não resulte problema de saúde pública (USEPA, 1992). Dentre os processos de DAA estão: a digestão termofílica, digestão termofílica por estágios, digestão mesofílica por estágio, digestão por fase ácido-gasosa e digestão por fase de temperatura.

Na Tabela 5 está apresentada a evolução de algumas características do lodo após a digestão anaeróbia.

Tabela 5 - Características médias observadas em lodos bruto e digerido.

Tipo de lodo	pH	Sólidos Fixos (%)	C (%)	N (%)	C/N	P (%)
Lodo primário	6,2	12	33,3	4,5	7,4	3,1
Lodo ativado	7,0	13	30,4	6,0	5,0	2,9
Lodo digerido	7,0	40	23,5	3,0	7,8	5,6

Fonte: Fernandes; Souza (2001).

É possível observar a elevação relativa do teor de sólidos fixos como resultado do processo de biodegradação. Também ocorrem perdas de nitrogênio, devido à volatilização e pequena elevação da relação C/N. No que diz respeito à redução de patógenos, na Tabela 6 estão apresentados alguns valores de redução após a digestão.

Tabela 6 - Redução de alguns microrganismos após digestão do lodo em número/100ml.

Patógeno	Lodo Bruto	Lodo digerido
Vírus	$380 \text{ a } 7 \times 10^4$	ND a 10^3
Coliformes Totais	$4,3 \times 10^9 \text{ a } 5,0 \times 10^9$	$3,0 \times 10^4 \text{ a } 7,0 \times 10^7$
Coliformes Fecais	$1,4 \times 10^9 \text{ a } 10^9$	ND a $7,8 \times 10^6$
Salmonella	$3 \text{ a } 4,6 \times 10^4$	3 a 62
Estreptococos	$2,3 \times 10^7 \text{ a } 1,5 \times 10^8$	ND a $2,2 \times 10^6$
Ovos de helmintos	20 a 700	30 a 70

Fonte: WEF *apud* Fernandes; Souza (2001)

Em digestores anaeróbios bem operados é comum a redução de duas ordens de magnitude para os coliformes fecais. Os cistos de protozoários são geralmente eliminados, enquanto os ovos de helmintos são mais resistentes (FERNANDES; SILVA, 2001). A digestão anaeróbia do lodo é um processo de estabilização eficiente para diminuir o problema do mau odor, porém a redução de patógenos observada é pequena, o que impõe limites ao uso do bio sólido ou então, uma etapa posterior de higienização do lodo.

3.2.2.2 Digestão aeróbia

Este tipo de digestão tem a mesma base conceitual dos sistemas de tratamento de esgoto do tipo aeração prolongada. O mecanismo da estabilização é a biodegradação de componentes orgânicos em meio aeróbio, e a fase final do processo é caracterizada pela respiração endógena, que acontece quando o substrato disponível para a biodegradação é

totalmente consumido e os microrganismos passam a consumir o próprio protoplasma microbiano a fim de obter energia para suas reações celulares.

Devido à necessidade de manter o processo em respiração endógena, a digestão aeróbia é tipicamente utilizada para estabilizar lodos ativados que têm grande massa bacteriana. Como existe pouca massa bacteriana no lodo primário, a sua inclusão no sistema exige um aumento do período de detenção no digestor para que o lodo primário se transforme primeiro em massa celular, e depois aconteça a oxidação pelas próprias bactérias.

De qualquer forma, apenas 75-80% da massa bacteriana pode ser oxidada, porque 20-25% do tecido celular é composto de componentes inertes e orgânicos não biodegradáveis. A massa bacteriana oxidada é convertida em CO₂, água e amônia. A amônia é subsequente oxidada a nitrato e esta conversão resulta um aumento na concentração de H⁺, que se a capacidade de tamponamento não for suficiente ocorre uma redução no pH. Segundo Metcalf e Eddy (2014), 7 kg de alcalinidade são destruídos para cada kg de amônia oxidada. Teoricamente, 50% da alcalinidade consumida pela nitrificação é recuperada pela desnitrificação. Caso haja queda excessiva de pH devido à nitrificação, o sistema pode passar por um período de desnitrificação, desligando-se os aeradores ou adicionando-se cal ao lodo. Quando não ocorre nitrificação, teoricamente, 1,5kg de oxigênio é necessário para cada kg de massa bacteriana. Se o sistema realiza a nitrificação, as necessidades são de 2kg de O₂/kg de material celular (FERNANDES; SILVA, 2001).

O maior objetivo da digestão aeróbica é a redução de massa de sólidos para a disposição. É possível encontrar uma eficiência de 35 a 50% de redução de SVS dependendo do tempo de detenção. O tempo de detenção deve ser definido em função dos objetivos da estabilização, sendo que a redução da parcela biodegradável pode ser representada pela Equação 5, equação de primeira ordem.

$$\frac{dM}{dt} = KdM$$

Equação 5

Onde:

dM/dt = taxa de variação dos sólidos voláteis biodegradáveis por unidade de tempo;

K_d = constante da taxa de reação;

M = concentração de SVS biodegradáveis restantes no tempo t .

De acordo com a NBR 12209 (ABNT, 2011), o tempo de detenção mínimo é de 12 dias para o digestor que recebe apenas o lodo biológico, e 18 dias para lodo misto. Já a USEPA indica a necessidade de aumentar a idade de lodo para reduzir patógenos nos casos de uso do bio sólido na agricultura para 40 dias á uma temperatura de 20°C, e 60 dias para temperatura de 15°C (USEPA, 1992).

Segundo Metcalf e Eddy (2014) a destruição dos sólidos é primeiramente uma função direta do produto da temperatura e idade do lodo, por exemplo: uma redução de 40% de SVS é obtida para um produto de 500°C x d. Na Figura 5 está indicada esta relação de eficiência em função da temperatura x idade do lodo. Como pode ser observado, à medida que sobe o produto temperatura x idade do lodo, a eficiência também aumenta, mas ocorre pouca variação acima de 1200°C x d.

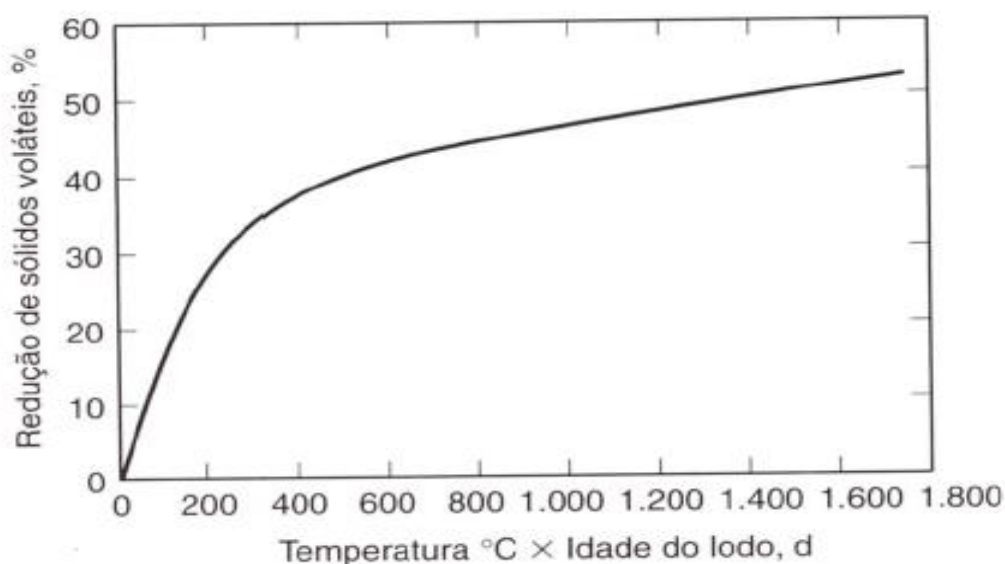


Figura 5 - Relação temperatura x idade do lodo.
(Fonte: METCALF; EDDY, 2014)

Existem três variações comprovadas de processo de digestão aeróbia: digestor convencional, digestor aeróbio de oxigênio puro e digestão aeróbia autotérmica (METCALF; EDDY, 2014).

De acordo com Jordão e Pessoa (2014), as principais vantagens a favor da digestão aeróbia são:

- Simples operação em comparação a digestão anaeróbia;
- Menores custos de implantação;

- Não apresenta gases tóxicos explosivos e mal cheirosos, típicos da fase acidogênese da digestão anaeróbia;
- Maior redução de óleos e graxas;
- Maior qualidade no sobrenadante;
- Maior redução dos microrganismos patogênicos.

Em contrapartida, as principais desvantagens são:

- Maior custo operacional devido ao custo de energia da aeração;
- Não há aproveitamento de gás gerado durante a digestão anaeróbia;
- Pior característica no desaguamento do lodo, e com isso a secagem é mais dificultosa.

3.2.2.3 Compostagem

A compostagem também é um processo de estabilização que ocorre em meio aeróbio, porém se realiza em meio sólido, ou seja, após o desaguamento do lodo. A compostagem é definida como uma biooxidação aeróbia exotérmica de substrato orgânico heterogêneo, no estado sólido, caracterizado pela produção de CO₂, água, liberação de substâncias minerais e formação de matéria orgânica estável.

Por ser um processo biológico aeróbio, os fatores mais importantes que influenciam na degradação da matéria orgânica são a aeração, os nutrientes e a umidade.

3.2.2.4 Estabilização química

Na estabilização química são adicionados produtos ao lodo que inibem a atividade biológica ou oxidam a MO. O tratamento químico mais utilizado é o alcalino, onde geralmente cal é misturado ao lodo para elevar o pH e destruir a maior parte dos microrganismos patogênicos. Além disso, a cal também é utilizada no saneamento para remover fósforo dos efluentes, corrigir pH dentro dos digestores e condicionar o lodo para o desaguamento mecânico.

O produto mais utilizado é a cal virgem (CaO) podendo ser utilizado também a cal hidratada (Ca(OH)₂). O fundamento do processo é simples: adicionar cal até o lodo atingir pH mínimo de 12, cujo efeito é a destruição de microrganismos patogênicos, diminuição do odor gerado e fixação de metais pesados (FERNANDES; SILVA, 2001).

A principal desvantagem do processo é o aumento de geração de lodo, que passa a incluir a massa da cal adicionada, consequentemente aumentando o volume de lodo a ser transportado e disposto, e com isso os custos operacionais.

A cal pode ser aplicada antes ou após o desaguamento. Quando utilizado antes do desaguamento, a cal possui função também de condicionar para melhorar a desidratação. Neste caso o filtro prensa é o método de desaguamento mais utilizado, já que outros equipamentos mecânicos são mais susceptíveis ao desgaste e abrasão causada pela cal. Outra desvantagem na utilização pré-desidratação é o aumento da quantidade de produto requerida para estabilização do lodo.

Já o uso da cal pós-desidratação é mais econômico, pois além de utilizar menor quantidade de produto devido ao menor volume de lodo, a reação da cal com o lodo com teor de sólidos de 25 a 30% pode aumentar a temperatura até 50°C, e com isso inativa os microrganismos mais rapidamente. A desvantagem da aplicação após o desaguamento é a geração de odor causado pela hidrólise da amônia.

Segundo Metcalf e Eddy (2014) a dosagem de Ca(OH)_2 pode variar de 120 a 300g para cada kg de sólido seco dependendo do tipo de lodo. Em pesquisas do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) foram testadas maiores doses de cal e conforme está apresentado na Tabela 7, a aplicação de cal é eficiente na eliminação de patógenos e seus indicadores.

Tabela 7 - Médias dos percentuais de eficiência na remoção entre os tratamentos com cal a 30%, 40% e 50% em relação ao peso de lodo seco.

Cal	Coliformes Totais	Coliformes Fecais	Salmonellas	Estreptococos	Ovos de Helmintos	Cistos de protozoários	Larvas de helmintos
30%	99,40%	100%	100%	92,23%	75,33%	100%	100%
40%	98,14%	100%	-	98,71%	81,00%	100%	98,38%
50%	99,95%	100%	100%	100%	77,33%	100%	100%

Fonte: Fernandes; Silva (2001)

3.2.3 *Desaguamento de lodo*

O desaguamento ou desidratação é uma operação unitária física para separação sólido-líquida do lodo ou biossólidos que visa à redução do volume em excesso pela redução do seu teor de umidade. A etapa do desaguamento geralmente é a que demanda maior operação e tem como principais razões:

- Redução de custo de transporte até o local da destinação;
- Lodo desaguado é mais fácil de manusear do que o lodo adensado e líquido;
- Desaguamento é requerido quando o objetivo final é a incineração do lodo para aumentar o poder calorífico;
- Desaguamento é requerido antes da secagem térmica devido ao custo efetivo de remover água mecanicamente, comparado a evaporação da água durante a secagem;
- Redução da umidade para reduzir odor;
- Redução de umidade para recebimento de lodo em aterros ou para reuso na agricultura.

A capacidade da desidratação vai depender do tipo de lodo. Um lodo ativado, por exemplo, é mais difícil de ser desaguado do que um lodo primário digerido de forma anaeróbia. A variação dessa capacidade está diretamente relacionada ao tipo de sólido e à forma pela qual a água está ligada às partículas do lodo. Segundo Tsang e Vesiland (1990 *apud* Metcalf & Eddy, 2014) há quatro tipos de associação da água com o lodo: água livre, água intersticial, água adsorvida e água celular ou de hidratação, as quais estão apresentadas na Figura 6.

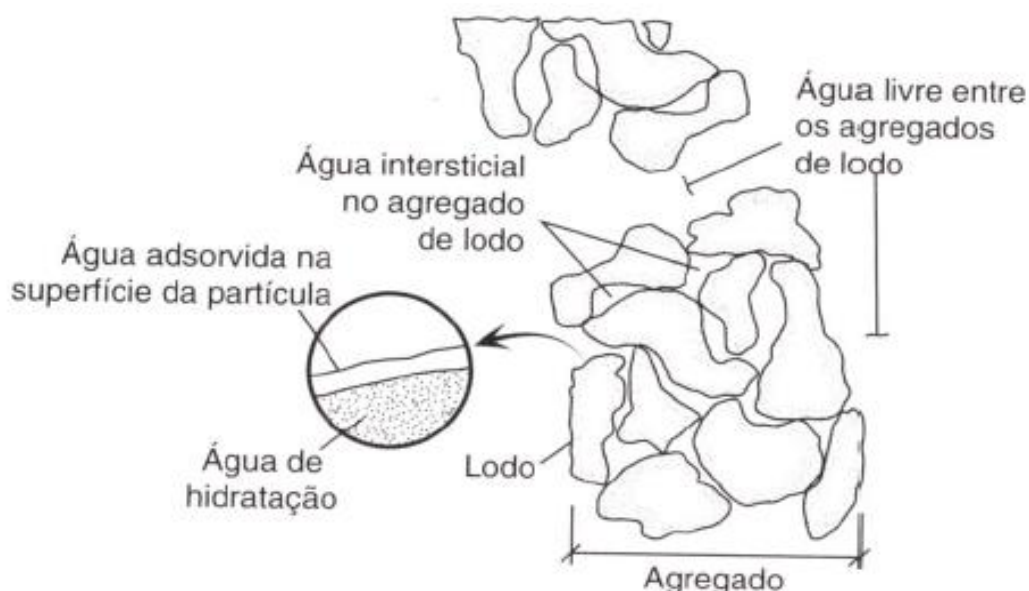


Figura 6 - Formas de associação da água ao lodo.
(Fonte: METCALF; EDDY, 2014)

A água livre corresponde à fração de água que pode ser separada dos sólidos apenas pela força gravitacional e compõe cerca de 70% do lodo (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999).

A água intersticial é a água que está ligada entres os flocos de lodo por capilaridade. Para ela ser desaguada como por força gravitacional geralmente necessita de condicionamento químico ou força mecânica.

A água adsorvida ou água de superfície está ligada por pontes de hidrogênio. Também necessita de condicionamento para ser removida ou forças externas como centrífuga.

A água celular é a fração mais difícil de ser removida, pois está presente dentro das partículas, hidratadas. Segundo Van Haandel e Morais (1999) esta fração de água corresponde a 10% do volume do lodo e só pode ser removida através de mudança de estado de agregação provocadas por força térmica, ou seja, evaporação ou congelamento.

Como mencionado anteriormente, o tamanho das partículas também é um dos principais fatores que influencia em sua desidratação, porque se o tamanho médio das partículas diminui, a relação superfície/volume aumenta exponencialmente, aumentando também o grau de hidratação e a demanda por condicionantes.

A seleção do método de desaguamento aplicado também depende do tipo de lodo e da área disponível. Para ETE's de pequeno porte em locais onde não há restrição de área, os processos naturais são os mais indicados. Por outro lado, quando as ETE's são de médio e grande porte em regiões metropolitanas, o desaguamento por equipamentos mecânicos são os mais utilizados.

Para uma separação de sólido-líquido do lodo mais efetiva, geralmente o lodo passa por uma etapa de condicionamento químico antes do desaguamento.

3.2.3.1 Condicionamento do lodo

O condicionamento prévio ao desaguamento envolve um tratamento químico e/ou físico do lodo para aumentar a remoção de água e melhorar a captura de sólidos. A primeira etapa do condicionamento é a coagulação, onde se adiciona produtos químicos com objetivo de desestabilizar as partículas por meio da diminuição das forças eletrostáticas de repulsão entre elas. Uma vez que as partículas do lodo possuem cargas negativas, o processo de coagulação as neutraliza e assim, facilita sua aproximação. A segunda etapa é a floculação que permite a agregação dos flocos de lodo por meio de baixos gradientes de agitação tornando-lhes maiores. A filtração de um lodo condicionado libera mais água livre, além da água intersticial e parte da adsorvida. Segundo Wang *et al*

(2007) com o condicionamento químico o tempo de desaguamento pode ser reduzido em até 50%.

O tipo de condicionamento influencia diretamente a eficiência dos processos de desaguamento. Os três tipos mais comuns de sistemas de condicionamento são o uso de produtos inorgânicos, como sais metálicos e cal, polímeros orgânicos (polieletrólitos) e o calor (USEPA, 1987).

3.2.3.1.1 Condicionante inorgânico

O uso de coagulantes inorgânicos para condicionamento de lodo é associado principalmente com sistemas de desaguamento por filtração a vácuo ou pressão. Os produtos mais utilizados em ETE são os cloretos férricos e a cal. O sulfato ferroso e de alumínio também são usados, mas menos comum.

A utilização de cloreto férrico geralmente é realizada em associação com a cal, a qual é adicionada posteriormente. O cloreto férrico é hidrolisado, formando complexos de ferro com cargas positivas que neutralizam as cargas negativas do lodo, proporcionando sua agregação. O cloreto férrico também reage com a alcalinidade de bicarbonatos do lodo formando hidróxidos que atuam como floculantes. A desvantagem é que esta formação de hidróxido torna o lodo pobre para adensamento e desaguamento, requerendo posteriormente a adição de polímeros. De acordo com a USEPA (1987), não é comum encontrar uma torta de lodo que deságua em centrífuga com teor de sólido de 10 a 15%, quando são formados hidróxidos. Outro aspecto importante relacionado ao uso de cloreto férrico é a sua corrosividade.

A cal hidratada é utilizada, em geral, com o cloreto férrico. Embora a cal tenha pouco efeito sobre a desidratação de colóides, seu uso busca principalmente o controle do pH, odores e a desinfecção dos lodos. O carbonato de cálcio resultante da reação da cal com bicarbonatos consiste em uma estrutura granular que aumenta a porosidade do lodo e reduz sua compressibilidade.

Segundo Metcalf e Eddy (2014) o condicionamento químico inorgânico pode aumentar a massa de lodo de 20 a 30%, que é uma desvantagem, pois aumenta os custos para transporte e disposição de lodo.

3.2.3.1.2 Polímeros

Os polímeros ou polieletrólitos, como também são chamados devido à dissociação após adição de água em cargas negativa ou positiva, são compostos orgânicos sintéticos de alto peso molecular que podem ser usados como coagulantes e auxiliares na floculação. As propriedades químicas do polímero podem variar de acordo com a carga elétrica, a densidade da carga, a estrutura molecular e o peso molecular (WEF *apud* METCALF & EDDY, 2014). Devido ao lodo e biossólidos terem carga negativa, os polímeros mais utilizados são os catiônicos, com alta densidade de carga e peso molecular.

As vantagens do uso de polímeros em relação aos condicionantes inorgânicos são:

- Não aumentam a massa de lodo;
- Polímeros não reduzem a aptidão à combustão do lodo desidratado, caso a incineração seja a disposição final, ao contrário do coagulante inorgânico;
- Operações de manuseio mais limpas e seguras;
- Sua utilização reduz problemas na operação e manutenção.

A seleção do tipo e dosagem de polímero depende das propriedades do lodo, condições de mistura entre o produto e o lodo, e os dispositivos de desaguamento. A faixa de dosagens de polímero requerida pode ser estimada baseada na fonte do lodo, por exemplo, se é primário, ativado ou digerido. O aumento da destruição de sólidos voláteis na digestão aumenta a demanda de polímero (NOVAK *et al apud* METCALF; EDDY, 2014). A melhor forma de determinar o tipo e dosagem é o ensaio em *Jar Test*.

O método de desaguamento afeta a seleção do condicionamento químico devido às diferentes formas de mistura do produto e o lodo, podendo ser misturador hidráulico ou mecânico.

3.2.3.2 Tipos de desaguamentos

A seleção do sistema de desaguamento é determinada pelo tipo e característica do lodo, pela etapa anterior, se foi adensado ou digerido, pelo tipo disposição final e espaço disponível. Com isso, o desaguamento pode ser de forma natural ou mecânica.

Segundo Vesilind *et al* (1986) os mecanismos de separação geralmente ocorrem por três princípios básicos:

1. Os sólidos são mais (ou menos) densos do que o meio líquido;
2. As partículas dos sólidos são maiores em tamanho físico do que as moléculas líquidas;

3. Os sólidos não volatilizam quando o líquido é evaporado.

Na Tabela 8 estão apresentados os métodos de separação sólido-líquidos mais utilizados para lodos e o(s) princípio(s) básico(s) em que estão baseados.

Tabela 8 – Princípios Básicos nas operações de desaguamento.

Método de desaguamento	Técnica de separação	Princípio básico
Leito de secagem	Filtração e evaporação	2 e 3
Lagoas de secagem	Ação gravitacional e evaporação	1 e 3
Filtros <i>Bag</i>	Filtração	2
Centrífuga	Centrifugação (e também filtração dependendo do equipamento)	1 e 2
Filtro de esteira	Filtração	2
Filtro prensa	Filtração	2
Prensa de rosca	Filtração	2
Filtro a vácuo	Filtração	2
Secador rotativo	Evaporação	3

Fonte: Adaptado Vesilind *et al* (1986)

Além dos métodos de desaguamento citados acima existe um novo processo, o eletro-desaguamento ou desaguamento de campo elétrico assistido. Segundo Metcalf e Eddy (2014), o desaguamento elétrico envolve a aplicação direta de voltagem no lodo entre dois eletrodos. Como o lodo tem carga negativa, avança para o eletrodo de carga positiva (anodo). As moléculas de água de carga positiva movem em direção ao eletrodo negativo (catodo). A água é filtrada por uma manta de filtro que cobre o catodo, e de acordo com Yoshida (1993 *apud* Metcalf e Eddy (2014), ela não entope, um problema comum em outros tipos de filtração. Uma pressão é aplicada para acelerar o processo de desaguamento e permitir que uma corrente contínua mova uniformemente a carga do anodo para o catodo.

Outro método de desaguamento natural que tem sido muito utilizado no Brasil é o filtro geotêxtil ou *bags*, como são chamados (JORDÃO; PESSÔA, 2014). O *bag* é preenchido de lodo com ou sem condicionantes e através de seu tecido permeável de alta resistência, a água livre é drenada e retornada para o tratamento de efluente. A desvantagem é que a secagem da parte sólida é lenta, principalmente devido ao fato do lodo ficar dentro do *bag* fechado, e, na disposição final demanda máquinas para remoção dos grandes *bags*.

Atualmente, em ETE de grande porte e localizado em área urbana o desaguamento mecânico é mais indicado, sendo as centrífugas, filtro prensa, filtro de esteira e a prensa de rosca os mais utilizados. Os sistemas naturais são mais utilizados em municípios pequenos e em ETE's mais afastadas da área urbana. Na Tabela 9 estão apresentados os métodos de desaguamentos e suas vantagens e desvantagens.

Tabela 9 - Tipos de desaguamentos: vantagens e desvantagens.

Método	Vantagens	Desvantagens
Centrífugas	• Aparência limpa, pouco problema com odor, rápido para ligar e desligar; • Fácil de instalar; • Produz torta de lodo de 15 a 25% de sólido dependendo do tipo de lodo; • Baixo capital em relação ao custo/capacidade.	• Desgaste no rolamento com muito problema de manutenção; • Requer remoção de areia e às vezes, triturador de lodo na alimentação; • Requer mão de obra habilitado; • Não é possível ver a zona de desaguamento para melhorar o desempenho.
Filtro de esteira	• Baixo consumo de energia; • Custos de investimentos e operação relativamente baixos; • Menor complexidade mecânica e mais fácil de manter; • Máquinas com alta pressão são capazes de produzir uma torta de lodo muito seca; • Esforço mínimo requerido para o desligamento do sistema.	• Hidráulica limitada; • Requer triturador de lodo na alimentação; • Muito sensível às características do lodo de entrada; • Baixa vida útil comparado com outros dispositivos com esteira; • Operação automática geralmente não é aconselhável; • Emissão de aerossol; • Emissão de odor dependendo do tipo de lodo.
Filtro prensa	• Dos equipamentos mecânicos é o que produz lodo com maior concentração de sólidos, de 25 a 35%; • Baixo sólidos suspensos no filtrado; • Operação mais simples; • Alta taxa de captura de sólidos; • Baixo consumo de produtos químicos para condicionamento do lodo.	• Operação a batelada; • Alto custo de investimento; • Alto custo de mão de obra; • Requer estrutura de suporte especial.

continua

Continuação

Método	Vantagens	Desvantagens
Prensa giratória	• Baixa velocidade 0,5 a 2,5 rpm; • Baixo barulho <68dB; • Pode ser enclausurado, evitando odor e aerossol; • Relativamente baixo consumo de energia devido à faixa de motor de 0,75 a 20 cv; • A superdosagem de polímero não entope a grade e não impede o desaguamento; • Água de lavagem usada apenas após desligar o equipamento;	• Grande relação de espaço por unidade de volume de capacidade de desaguamento; • Limitação na capacidade, irá requerer unidades múltiplas para o tratamento acima de 19000m³/d; • Não é possível ver a zona de desaguamento para melhorar o desempenho.
Prensa de rosca	• Produz torta de lodo de 20 a 30%; • Baixa velocidade de rotação 0,3 a 1,5 rpm • Baixo barulho <68dB; • Pode ser enclausurado com acesso a portas articuladas, evitando odor e aerossol; • Baixo consumo de energia devido à faixa de motor de 0,5 a 5 cv; • A superdosagem de polímero não entope a grade e não impede o desaguamento;	• Limitação na capacidade, irá requerer unidades múltiplas para o tratamento acima de 19000m³/d; • Lavagem requerida periodicamente a cada ciclo de operação;

continua

Continuação

Método	Vantagens	Desvantagens
Desaguamento elétrico	• Operação automática; • Bons resultados para lodo difícil para desaguar; • Mecanismo simples e fácil de manter; • Reduz odor e contribui na destruição de patógenos no lodo; • Flexibilidade nas características de lodo de entrada; • Possui de 3 a 5 vezes mais eficiência energética do que secadores.	• Operação por batelada; • Alto custo de investimento; • Não é adequado para planta maior que 75.700m³/d; • Secagem final limitada, alcançando o máximo de 45-50% sólido seco; • Dificuldade em prever o desempenho sem um teste de bancada; • Nova tecnologia; • Requer tratamento de odor para não gerar gases; • Requer um pré-desaguamento na faixa de 10-25% de sólido seco; • Custo operacional de acordo com a tarifa de eletricidade local
Leitos de secagem	• O método é de menor custo de investimento quando a área é disponível; • Pequena atenção e habilidade de operador requerida; • Baixo consumo de energia; • De baixo a nenhum consumo de químicos; • Menos sensível a variabilidade na concentração e tipo do lodo; • Maior teor de sólidos secos comparado aos métodos mecânicos;	• Requer grandes áreas; • Exige lodo estabilizado devido aos problemas com odor e proliferação de vetores; • O projeto requer consideração dos efeitos climáticos; • Remoção de lodo exige mão de obra intensiva.
Lagoas de lodo	• Baixo consumo de energia; • Nenhum consumo de químicos; • Matéria orgânica é mais estabilizada; • Baixo custo de investimento quando área é disponível; • É o que menos exige habilidade na operação.	• Potencial problema de odor e vetores; • Possível contaminação de solo e água subterrânea; • Maior exigência de área; • Aparência desagradável; • Projeto requer consideração de efeitos climáticos.

continua

Continuação

Leitos de drenagem	• Baixo consumo de energia; • Baixo ou nenhum consumo de químicos; • Baixo custo de investimento quando área é disponível; • Projeto mais simples do que leito convencional; • Drenagem mais rápida; • Boa qualidade na água do lodo drenado; • Maior facilidade de limpeza comparado ao leito convencional	• O projeto requer consideração dos efeitos climáticos; • Rápida colmatação da manta geotêxtil; • Secagem é dependente das condições climáticas;
Bags	• Podem ser instalados na horizontal ou vertical dependendo do <i>footprint</i> da ETE; • Grandes volumes de lodo podem ser desaguados; • Baixo consumo de energia; • Lodos condicionados ou não podem ser descartados; • Solução alternativa para limpeza de lagoas de estabilização. • Menor investimento comparados a desaguadores mecânicos;	• Requerido grandes áreas quando utilizado o <i>bag</i> horizontal; • Necessidade de longos períodos para atingir a secagem, o lodo pode demorar 12 meses para atingir 35% de sólidos totais; • Após o <i>bag</i> ser preenchido de lodo, há dificuldade de transportar e dispor o lodo devido ao tamanho e peso do <i>bag</i>;
Secadores mecânicos	• Atinge altos teores de sólidos totais, geralmente acima de 90%; • Maior redução de volume; • Maior produtividade na secagem • Também tem a função de estabilização devido a eliminação térmica dos patógenos;	• Lodo precisa passar por um pré-desaguamento; • Investimento alto; • Alto consumo de energia;

Fonte: Metcalf; Eddy (2014); Von Sperling *et al* (2007b), Jordão; Pêsoa (2014); Miki (1998); Andreoli *et al* (2001); Sayeg *et al* (2005); França (2010), Souza (2016);

Reis (2011); Mortara (2011); Fernandes; Souza (2001)

3.2.4 ***Secagem térmica de lodo***

A secagem térmica é considerada uma alternativa de desaguamento na literatura porque se encaixa dentro da etapa de remoção de umidade do lodo. No entanto, a secagem térmica é a segunda etapa do desaguamento, ou seja, o lodo passa por um processo de pré-desidratação através de um desaguador mecânico, e então segue para o secador mecânico com teor inicial de sólidos geralmente acima de 15%. Da mesma forma acontece com a secagem térmica natural, o leito de secagem contém as duas funções de drenagem e secagem, mas primeiro ocorre a etapa de drenagem e depois a secagem por evaporação.

A secagem térmica mecânica envolve a aplicação de calor para evaporar a água e reduzir o teor de umidade abaixo dos valores obtidos por métodos convencionais de desaguamento. O calor pode ser transferido por convecção, condução ou radiação (METCALF; EDDY, 2014). É um processo caro, pois envolve a utilização de combustível/energia para geração de calor e necessita de mão de obra mais especializada (DAVID, 2002).

O objetivo principal da secagem térmica é a redução da quantidade de água presente no lodo para reduzir os custos com transporte e aterro sanitário. Com a secagem térmica é possível obter teores de sólidos acima de 90% e reduzir significativamente o volume final.

Outra vantagem da secagem térmica é a destruição dos organismos patogênicos, devido a isso, é considerada também uma etapa de higienização do lodo. Quando a destinação final é aplicação na agricultura, além de destruir os patógenos, a secagem térmica é essencial para preservar os constituintes da matéria orgânica (DAVID, 2002).

O lodo seco resultante da secagem térmica ainda pode ser utilizado como material combustível para incineradores de resíduos, pois adquire elevado poder calorífico (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

Segundo a WEF (1992 *apud* DAVID, 2002), a transferência de calor para o lodo é afetada por condições externas como: temperatura, umidade, velocidade e direção do gás de secagem, área de superfície de exposição, tipo de lodo, agitação e tempo de retenção. O conhecimento do tipo de lodo e das condições externas é importante para determinar o tipo de secador e condições de operação. Os métodos de transferência de calor caracterizam o tipo de secador, o qual pode ser do tipo convecção, condução, radiação ou uma combinação dos métodos.

Convecção:

Nos sistemas por convecção o lodo é colocado em contato direto com o meio de transferências de calor, geralmente gases quentes. A taxa de transferência de calor para a evaporação é calculada utilizando a Equação 6:

$$q = hc \times A (T_g - T_s)$$

Equação 6

Onde:

q = taxa de transferência de calor por convecção (kJ/h);

hc = coeficiente de transferência de calor por convecção (kJ/m².h.°C);

A = área de superfície aquecida (m²);

T_g = temperatura do gás (°C);

T_s = temperatura na interface entre o lodo e o gás (°C).

O coeficiente de transferência de calor por convecção geralmente é obtido com o fabricante do equipamento ou a partir de ensaios piloto. Os secadores por convecção ou secadores diretos mais utilizados são o rotativo, de correia ou de leito fluidizado (METCALF; EDDY, 2014).

Condução:

Ao contrário do método por convecção, a secagem por condução é dita indireta, pois uma parede sólida de retenção separa o lodo úmido do meio de transferência de calor, que pode ser vapor, óleo térmico ou outro fluido aquecido. A transferência de calor por condução é calculada através da Equação 7.

$$q = hc \times A (T_m - T_s)$$

Equação 7

Onde:

q = taxa de transferência de calor por convecção (kJ/h);

hc = coeficiente de transferência de calor por convecção (kJ/m².h.°C);

A = área de troca térmica (m²);

T_g = temperatura do fluido aquecido (°C);

T_s = temperatura do lodo na superfície de troca térmica (°C).

O coeficiente de calor por condução, um termo composto, inclui os efeitos da transferência de calor do filme de lodo e material que separa do meio de aquecimento, também é obtido com o fabricante ou por meio de ensaios piloto. Os secadores indiretos podem ser projetados na configuração horizontal ou vertical (METCALF; EDDY, 2014).

Radiação:

A transferência de calor por radiação ocorre através de energia radiante proveniente de superfícies aquecidas como: resistência elétrica, lâmpada infravermelha ou superfície refratária incandescente (DAVID, 2012). A transferência de calor por radiação é calculada através da Equação 8.

$$q = Ce \times St \times A (Tr^4 - Ts^4)$$

Equação 8

Onde:

q = taxa de transferência de calor por convecção (kJ/h);

Ce = emissividade da superfície aquecida;

St = constante de Stefan-Boltzman;

A = área de troca térmica (m²);

Tr = temperatura absoluta da superfície radiante (°C);

Ts = temperatura absoluta do lodo na superfície de troca térmica (°C).

3.2.4.1 Plantas de secagem solar

Como os secadores térmicos possuem custos de investimento e operacionais altos, uma alternativa de secagem térmica do lodo são as plantas de secagem solar, as quais fornecem taxas de evaporação mais altas comparadas ao leito convencional de secagem, pois são equipadas com dispositivos que contribuem para acelerar a secagem (MATHIOUDAKIS *et al*, 2009).

As plantas de secagem solar de lodo geralmente são leitos de pisos pavimentados com estrutura de cobertura tipo estufa transparentes para permitir a passagem de radiação solar, com ventiladores para renovação de ar e tubos para injeção de fluidos aquecidos, ou seja, em uma planta de secagem solar pode ocorrer os três tipos de transferência de calor: convecção, condução e radiação. Ademais, a energia consumida para o fornecimento da secagem é menor comparada com os secadores, pois a radiação é proveniente do sol e

muitas vezes o fluido utilizado como condução é o biogás gerado nas próprias ETE's. Além do mais, a planta de secagem solar pode conter um robô para revolver o lodo, ou seja, misturar o lodo da camada inferior com a superior para evitar a formação de crosta e, ainda, espalhar o lodo. Este tipo de sistema tem sido muito utilizado para secagem de lodo desaguado em diversos países, principalmente os que têm condições anual de alta temperatura e radiação solar. Com este sistema, é possível obter um material seco em granular com um teor de sólidos acima de 90% (METCALF; EDDY, 2014).

O comportamento da secagem em plantas de secagem solar é similar aos secadores térmicos. Segundo Bennamoun (2012) o comportamento geral do lodo de esgoto durante o processo de secagem sob condições constantes de operação é dividido em 4 fases, como é apresentado na Figura 7, que representa uma típica curva de secagem. Durante o período constante AB a água removida é a água livre separada na fase de drenagem, antes da secagem, para redução dos custos de operação e, responsável por reduzir no mínimo 5% do teor de umidade inicial em desaguamento natural, ou até 20% quando utilizado desaguamento mecânico. Depois da fase constante, é seguido por duas fases de taxa decrescente de umidade, quando ocorre a evaporação. A linha BC representa praticamente a remoção da água intersticial e a CD a remoção da água de superfície. A última fase da curva é um intervalo curto quando finalmente a secagem atinge a água celular e a umidade de equilíbrio é alcançada, o que indica o final do processo.

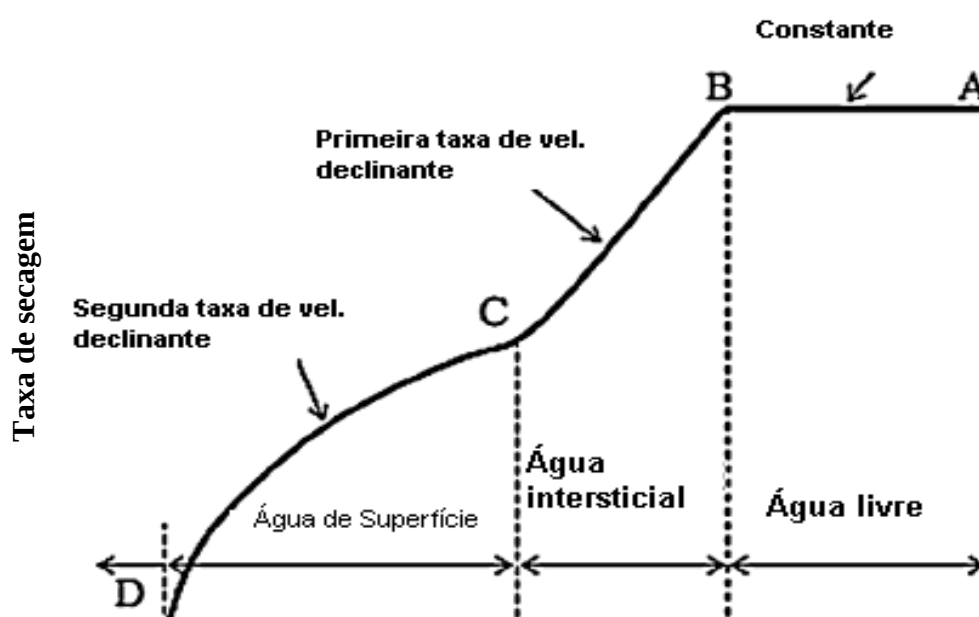


Figura 7 - Curva de secagem do lodo.

(Fonte: BENNAMOUN, 2012)

A umidade de equilíbrio é definida como a umidade que o material atinge quando submetido por longo período à certa condição de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve. Nessa condição, a pressão de vapor da água na superfície do sólido é igual à pressão de vapor da água contida no ar (PACHECO, 1995 *apud* DAVID, 2002). Ao manter a temperatura do sistema e variar a umidade relativa do ar, é comum obter diferentes valores para umidade de equilíbrio para um mesmo material.

Na secagem térmica é muito importante conhecer a umidade de equilíbrio, pois esta indica o teor de umidade limite em dadas condições de temperatura e umidade do ambiente. Se o sólido em processo deixar o secador com umidade abaixo de sua umidade de equilíbrio, este mesmo pode incorporar a umidade do ambiente de permanência, até atingir a umidade de equilíbrio nas condições do novo ambiente. Isto pode resultar em uma operação ineficiente no que se diz a consumo de energia e tempo, o que reflete a maiores custos e menor produtividade (DAVID, 2012).

A umidade de equilíbrio depende tanto da natureza do lodo como das condições climáticas do ambiente de secagem, e determina a condição final do processo de secagem, além do qual não adianta prosseguir, pois poderá haver comprometimento na eficiência final de secagem.

Após os experimentos de Bennamoun (2012) os resultados mostraram que a secagem cinética começa através de uma fase curta transiente, o qual chamou de fase de adaptação ou aquecimento, indicada pela linha AB na Figura 8. Foi observado um aumento importante no fluxo de evaporação até alcançar o valor máximo e a temperatura de superfície alcançar a temperatura de bulbo úmido relacionado à temperatura do ar e umidade. A temperatura de bulbo úmido é quando a temperatura da transferência de calor por convecção é igual ao consumo de calor (DAVID, 2012).

De acordo com Perry (1973 *apud* DAVID, 2012), a velocidade de secagem de um sólido é definida como o fluxo de massa de umidade que deixa o sólido por unidade de área de exposição ao meio de seca por unidade de tempo, expressa em kg/m².h e representada matematicamente pela Equação 9.

$$N = \frac{Md}{A} \times \frac{dW}{dt}$$

Equação 9

Onde:

N = velocidade de secagem (kgÁgua/m².h);

M_d = massa de sólido em base seca (kgST);

A = área de exposição ao meio de seca (m^2);

W = umidade do sólido em base seca (%);

t = tempo (h).

A Figura 8 apresenta a forma típica da curva de secagem desenvolvida por Perry (1973 *apud* DAVID, 2012).

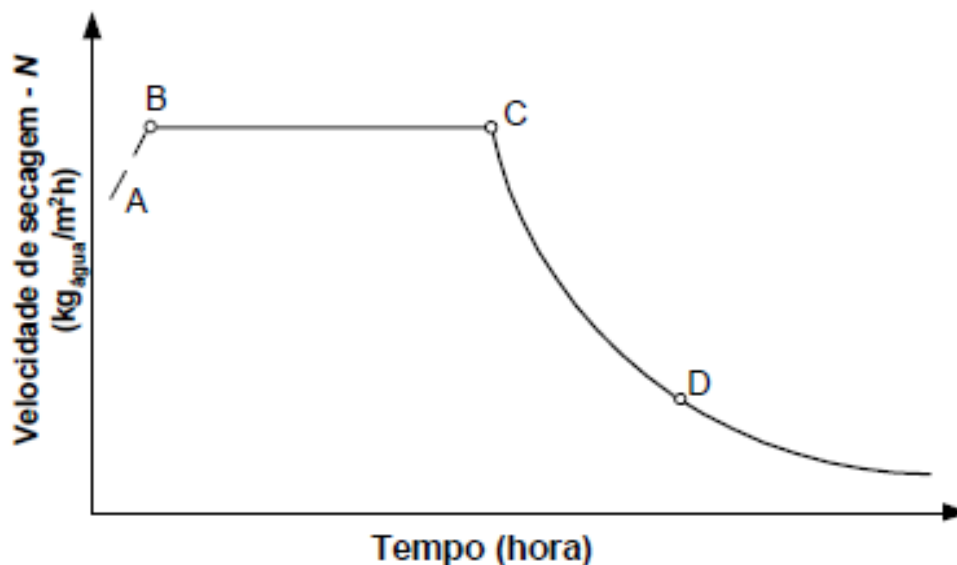


Figura 8 – Cinética de secagem em função da umidade.

(Fonte: PERRY *apud* DAVID, 2012)

Segundo Foust (1980 *apud* DAVID, 2012), após o contato entre o sólido úmido e o meio de secagem, a temperatura do sólido se ajusta até atingir um regime constante. Durante o período de taxa de secagem constante indicado na linha BC da Figura 8, o sólido está com uma umidade de modo que um filme de água permanece envolvendo toda a superfície de secagem, como se a parte sólida não existisse. A secagem à taxa constante continua, com a massa de umidade removida da superfície sendo substituída pelo líquido do interior do sólido. O mecanismo de deslocamento do líquido, e consequentemente a velocidade desse movimento varia conforme a estrutura do sólido (FOUST, 1980 *apud* DAVID, 2012). Entretanto, neste período, a velocidade de secagem independe do mecanismo interno de fluxo do líquido através do sólido. De acordo com Perry (1973 *apud* DAVID, 2012), a taxa de secagem constante depende: do coeficiente de transferência de calor e massa, da área de superfície exposta, e da diferença de temperatura e umidade entre o meio de secagem e a superfície úmida do sólido em questão, ou seja, a velocidade de

secagem é totalmente controlada por condições externas. O valor de umidade que marca o final do período de velocidade de secagem constante é denominado de umidade crítica. Esse ponto indica a situação em que a água superficial se torna insuficiente para manter um filme contínuo de água cobrindo a secagem (DAVID, 2012).

Conforme menciona Foust (1980 *apud* DAVID, 2012), o período de secagem à taxa decrescente geralmente é mais estendido do que o período à taxa constante, no entanto o volume de umidade removida é bem menor. A taxa de secagem se aproxima de zero no teor de umidade de equilíbrio com o meio. O formato da curva de velocidade de secagem no período decrescente depende do tipo de material e é controlado pelas suas condições internas.

O sólido pode ser higroscópico, que absorve água, ou não. Segundo David (2012), no caso de sólidos higroscópicos não porosos, o calor fornecido evapora primeiro a umidade superficial. A movimentação de umidade dentro do sólido acontece através de difusão no sentido de regiões mais úmidas, localizadas no interior do sólido para regiões menos úmidas, na sua superfície. A resistência à transferência de umidade para o ar é desprezível em relação à resistência de movimentação da umidade no interior do sólido. Nesta situação, alterações na velocidade do ar de secagem não produzem qualquer variação na velocidade de secagem do sólido.

Já os sólidos não higroscópicos porosos são compostos por uma rede de capilares de diferentes dimensões nas seções transversais, e as forças capilares são tão maiores quanto menores forem os raios dos capilares. Quando a água superficial se esgota, os capilares de maior diâmetro esvaziam-se primeiro, pois perdem água para o meio de secagem e para os capilares de diâmetros menores, sendo a água substituída pelo ar. À medida que os poros forem se esvaziando, a superfície de evaporação recua para o interior do sólido e a área disponível para troca de massa diminui, embora a taxa de evaporação por unidade de área úmida se mantenha constante. Por isso, o primeiro trecho do período de velocidade decrescente é reto, o qual é possível visualizar na linha BC da Figura 7, já que o mecanismo é similar ao período de velocidade constante, porém com a área efetiva para a troca de massa diminuindo a cada instante e a velocidade de secagem continua a ser calculada com referência à área disponível para troca de calor. Segundo Perry (1973 *apud* DAVID, 2012), esse estado em que a água constitui a fase contínua e o ar a fase dispersa, é denominado de estado funicular. Com o prosseguimento do processo, a secagem atinge uma situação em que a água deixa de ser fase contínua e recebe o nome de estado pendular. Este fato é indicado na curva de velocidade de secagem pelo ponto D da Figura 8,

chamado de segundo ponto crítico. A velocidade de secagem no estado pendular é independente da velocidade do ar, devendo o vapor difundir-se através do sólido e o calor deverá ser fornecido por condução a partir da superfície. A temperatura tende a se aproximar da temperatura do ar de secagem.

Para um sólido higroscópico poroso, uma vez evaporada a umidade superficial, tanto o estado funicular como o pendular são compostos por água ligada. A curva de velocidade de secagem à taxa decrescente apresenta um aspecto que depende da natureza e forma do material sem indicar, contudo, um ponto crítico. Quando houver somente água ligada, o mecanismo de movimentação se assemelha bastante ao da difusão.

No que diz respeito ao aspecto do lodo, Bennamoun (2012) referiu a vários autores que observaram dois fenômenos que acontecem com o lodo durante o processo de secagem: encolhimento e rachaduras. O encolhimento consiste na redução do tamanho do produto devido à perda de água na secagem. Através de imagens raio X microtomográficas foi observado o lodo no decréscimo de umidade com base nas variações dos tons de cinza, sólido úmido e seco. Os autores observaram rachaduras no interior e na superfície do lodo seco ao mesmo tempo em que acontece o encolhimento. O encolhimento começa quando o processo de secagem inicia, e continua até atingir um valor constante que depende do tipo de lodo. Existe uma redução isotrópica de 77 a 58% tanto no diâmetro e altura do lodo, que anuncia a taxa de encolhimento. Por outro lado, a rachadura é constante com baixos valores no início do processo, os quais aumentam com o decréscimo da umidade.

3.3 Leito de secagem

O leito de secagem é o método de desaguamento natural mais utilizado na maioria das estações de esgotos municipais dos Estados Unidos (WANG *et al*, 2007). No Brasil o leito de secagem está presente em 2/3 dos sistemas de tratamento de esgotos (CORDEIRO, 2001 *apud* MORTARA, 2011). O desaguamento de lodo em leitos de secagem é menos complexo, mais fácil de operar e requer menos energia operacional do que sistemas mecânicos. Por outro lado, necessitam de mais área e mais mão de obra para limpeza, e por este motivo são mais utilizados em sistemas de tratamento com capacidade menor que 7.500 m³/d (USEPA, 1987).

Os leitos de secagem são utilizados para reduzir umidade do lodo tanto pela drenagem gravitacional através da massa de lodo quanto pela evaporação da superfície do lodo

exposta ao ar. Assim, podem produzir lodos mais secos que os desaguamentos mecânicos, de 25-40% podendo atingir valores acima de 60%.

Os processos de desaguamento e secagem natural de lodo partiram do método mais antigo, o leito convencional de areia, nos meados de 1900 quando foi notado que o lodo digerido desaguava mais facilmente do que lodo bruto. A partir daí foram desenvolvidas novas técnicas e aprimoramentos, mas o processo continuou praticamente o mesmo: desaguamento do lodo, separação sólido-líquido através de meio poroso, evaporação da água contida no sólido e remoção do lodo seco. Na Figura 9 está apresentado um esquema geral do desaguamento de lodo em leitos de secagem.

O procedimento operacional comum em leitos de secagem envolve (WANG *et al* 2007):

1. Bombeamento do lodo estabilizado para a superfície do leito;
2. Quando utilizados, os condicionantes são adicionados continuamente em linha;
3. Preenchimento do leito com lodo até o nível desejado;
4. Desaguamento gravitacional do lodo através do meio filtrante. O filtrado geralmente retorna para o sistema e a parte sólida fica sob a camada de suporte;
5. Secagem do lodo até a concentração de sólidos desejada;
6. Remoção do lodo de forma manual ou mecânica;
7. Repetição do ciclo.



Figura 9 – Esquema do desaguamento do lodo em leitos de secagem.
(Fonte: WANG *et al*, 2007)

3.3.1 *Leito convencional de areia*

O leito de secagem convencional é caracterizado como tanques retangulares com paredes de alvenaria ou concreto, camada drenante e sistema de drenagem no fundo conforme está ilustrado na Figura 10.

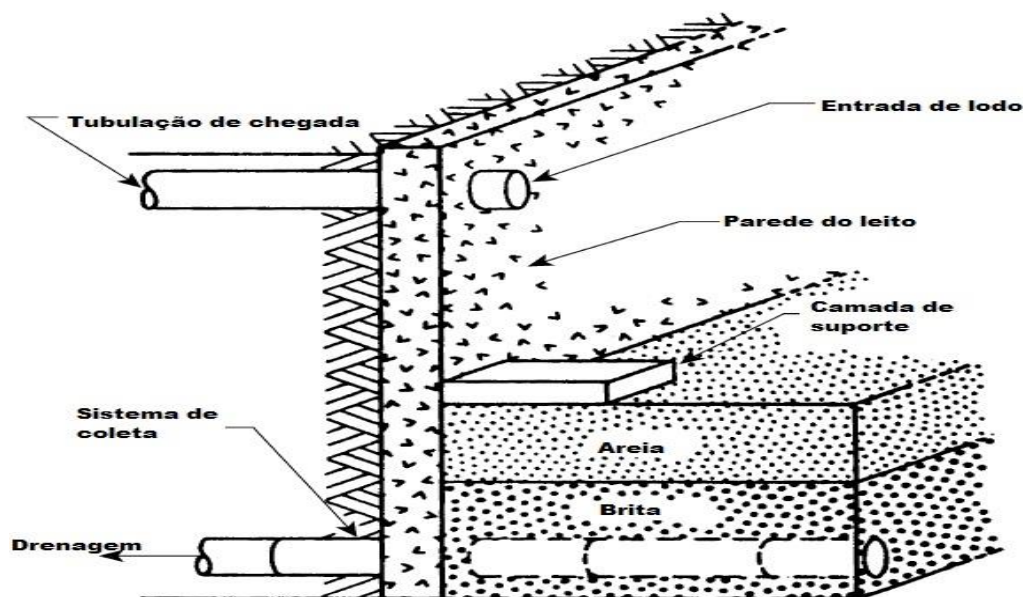


Figura 10 – Corte longitudinal de um típico leito convencional de areia.
(Fonte: USEPA, 1987)

Geralmente a camada drenante é constituída por: meio de suporte, normalmente tijolos; e meio de filtração, areia e pedras. O sistema de drenagem é constituído por canalizações dispostas abaixo do meio filtrante de modo a recolher o líquido removido do lodo. No Brasil o leito de secagem de areia deve seguir conforme a norma NBR 12209 (ABNT, 1992).

3.3.1.1 *Elementos da estrutura:*

Nos Estados Unidos, geralmente os leitos são retangulares com dimensões de 4,5 a 18m de largura e 15 a 47m de comprimento. Camadas de 10 a 23cm de areia com diâmetro efetivo de 0,3 a 1,2mm e coeficiente de uniformidade menor que 5 são colocadas por cima de camada de britas de 20 a 46cm com tamanho efetivo de 0,3 a 2,5cm (WANG *et al* 2007). No Brasil não existe exigência mínima ou máxima quanto à largura ou comprimento de, mas a norma NBR 12209/1992 estipula camadas de areia de 7,5 a 15cm,

diâmetro efetivo de 0,3 a 1,2mm e coeficiente menor que 5, sobre camadas de britas 1, 2, 3 e 4. Os tubos de drenagem geralmente são em plástico PVC ou em argila com diâmetro mínimo de 100mm com pelo menos 1% de declividade para garantir o escoamento.

3.3.1.2 Considerações de projeto:

Os dados de projeto para leitos convencionais ainda são muito empíricos, mas estudos recentes do processo e análises teóricas detalhadas podem ser encontrados em publicações da USEPA (WANG *et al*, 2007).

O parâmetro crítico de projeto é a área de superfície do leito requerida para obter a drenagem necessária e evaporação em tempo determinado tempo. A maioria dos leitos existentes foi projetada empiricamente de acordo com a carga de lodo gerada per capita. Este critério de carga per capita ainda é válido quando todas as condições originais dos sistemas são incorporadas, mas nem sempre é o caso dos sistemas mais modernos. O método de projeto mais utilizado é baseado na carga de massa de sólidos do lodo. O critério mais aceitável atualmente segundo a USEPA (1987) está apresentado na Tabela 10. Os valores para carga de sólidos de lodo misto em leitos descobertos variam de 60 - 100kg/m²/ano. Quando cobertos estes valores podem aumentar para 85 a 140kg/m²/ano, e um aumento ainda maior acontece quando são utilizados coagulantes para condicionar o lodo antes da aplicação no leito. Os valores máximos indicados se aplicam aos locais com clima mais quente e para lodos que drenam mais facilmente.

Segundo a USEPA (1987) o desempenho do leito depende:

- 1) da concentração de sólidos final atingido;
- 2) da concentração de sólidos no lodo aplicado;
- 3) o tipo do lodo a ser aplicado (estabilizado, adensado ou condicionado) e;
- 4) taxas de drenagem e evaporação.

Tabela 10 - Critério de carga para lodo não digerido e não-condicionado em Leitos de areia descobertos.

Tipo de lodo	Carga de massa (kg/m²/ano)
Primário	120-200
Primário + Filtração de baixa taxa	100-160
Primário + LA (misto)	60-100

Fonte: USEPA (1987)

A concentração de sólidos final vai depender dos requerimentos técnicos ou regulatórios para a disposição e/ou aplicação. Caso não exista nenhuma exigência ou uso especial, a torta de lodo geralmente é disposta com 25-30% de ST para facilidade de manuseamento e transporte, e também porque pode ser removido do leito sem ocorrer perda excessiva de areia (USEPA, 1987).

A quantidade de água que é removida pela drenagem é fortemente influenciada pelo tipo de lodo. A drenagem pode representar 25% da água removida para lodo misto e 75% ou mais para lodos bem condicionados. Uma drenagem eficiente geralmente é completada entre 3 a 5 dias. No entanto, a taxa de drenagem é menos crítica, ou seja, menos significativa para eficiência do que a porcentagem total de água removida.

A taxa de evaporação é função das condições climática local e das características de superfície do lodo.

As equações de projeto que relacionam a concentração inicial e final dos sólidos e a quantidade de água perdida na drenagem e evaporação estão apresentadas na Equação 10, Equação 11, Equação 12 e Equação 13. As equações fornecem um método racional para determinar a carga de ST no leito de secagem e outros parâmetros operacionais críticos.

O tempo de secagem para uma única aplicação é dado por (USEPA, 1987):

$$t_d = \frac{(\gamma_0) \cdot \left(1 - \frac{S_0}{S_f}\right) \cdot (1 - D)}{(k_e) \cdot (E_v)}$$

Equação 10

Onde:

t_d = tempo de desaguamento para uma aplicação única (mês);

γ_0 = profundidade da camada de lodo inicial (cm);

S_0 = concentração de ST inicial (%);

S_f = concentração de ST final requerido (%);

D = fração de água removida na drenagem (% decimal);

E_v = Evaporação média durante o tempo t_d (cm/mês);

k_e = fator de redução para evaporação do lodo versus a superfície de água livre (0,6).

O número de aplicações durante a operação de determinado período por (USEPA, 1987):

$$N = \frac{nv}{td} = \frac{(nv) \cdot (Evn) \cdot (ke)}{(\gamma_0) \cdot \left(1 - \frac{S_0}{S_f}\right) \cdot (1 - D)}$$

Equação 11

Onde:

N = número de aplicações de lodo;

n_v = comprimento do período de operação ou um incremento caso a evaporação for diferente (mês);

E_{vn} = média evaporação durante período n_v (cm/mês).

A carga de sólidos de projeto é dada por (USEPA, 1987):

$$L = (C) \cdot (S_0) \cdot \frac{(nv) \cdot (Evn) \cdot (ke)}{\left(1 - \frac{S_0}{S_f}\right) \cdot (1 - D)}$$

Equação 12

Onde:

L = carga de sólidos durante o período n_v (kg/m²);

C = fator de conversão (gravidade específica do lodo = 1,04)

A carga anual de sólidos é determinada pela soma dos resultados das equações para um diferente período operacional, acima de ciclo anual completo de 12 meses. Para obter uma primeira aproximação, assume-se $n_v = 12$ para obter uma média anual de evaporação para E_{vn} , se os leitos forem operados durante o ano todo.

A profundidade final da torta de lodo desaguado é dada por (USEPA, 1987):

$$\gamma_f = (\gamma_0) \cdot \left(\frac{S_0}{S_f}\right)$$

Equação 13

Onde:

γ_f = profundidade final da torta de lodo desaguado (cm).

Camadas mais finas de lodo irão secar mais rápido do que camadas mais grossas, mas a carga de sólidos anual é independente da profundidade de camadas individuais

aplicadas. Usar camadas muito finas tem suas desvantagens, incluindo maior frequência de operação e manutenção, pois alguns lodos secos devem ser removidos antes da próxima aplicação, pode ocorrer maior perda de areia no leito, e conseqüentemente, aumento de custos em geral. Uma camada de 20cm para um lodo a 3% de ST, após o desaguamento atinge 30% ST com uma camada de 2cm de profundidade, segundo USEPA (1987). Tal profundidade é tão fina que para maioria das técnicas de remoção poderia resultar em perda de grande quantidade de areia.

Para manter os custos de operação e manutenção mais baixos, o objetivo do projeto é alcançar a carga máxima de sólidos possível com número mínimo de ciclos de aplicação e remoção. A repetição dos cálculos da Equação 10 a Equação 13 irão convergir uma combinação mais efetiva de concentração inicial de ST e profundidade de camada para um determinado projeto. A otimização da profundidade de camada final é possível apenas com experiência operacional. A carga anual de sólidos depende da concentração de lodo aplicada, como mostrado na Equação 12, e esta relação está demonstrada na Figura 11.

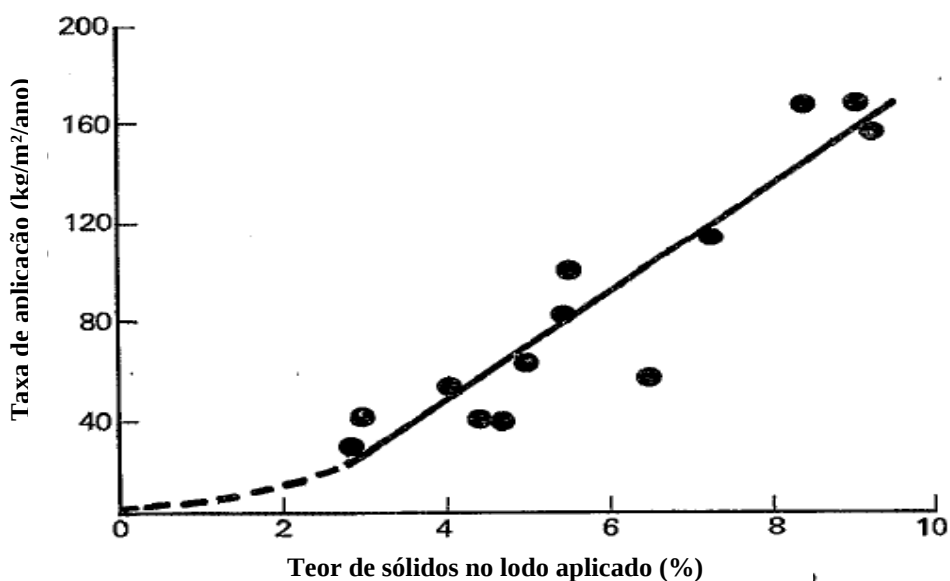


Figura 11 - Taxa de aplicação de sólidos x o teor de sólido no lodo.
(Fonte: USEPA, 1987)

Um aumento no teor de sólidos de 2 para 4%, por exemplo, dobraria a taxa de aplicação de sólidos (TAS) e poderia reduzir a área do leito requerida pela metade. Esta relação demonstra a grande vantagem em adensar e/ou pré-condicionar o lodo antes da aplicação no leito. Entretanto, aumentar o teor de sólidos em torno de 8% não é recomendado porque o lodo não distribui uniformemente no leito (USEPA, 1987).

Geralmente, a área total do leito é subdividida em várias células. É conveniente dimensionar as células de modo que uma ou duas contenha o volume total de retirada programada do lodo do digestor. A largura do leito vai depender do método de remoção de lodo, quando for manual e o lodo aplicado for condicionado, o máximo recomendado é de 6m de largura e o comprimento até 25m.

Outra forma de dimensionamento que é citado pela WEF e considerado o melhor método para projetos de leitos de secagem foi desenvolvido por Rolam (1979) (SAMUDIO *apud* MORTARA, 2011). Assim como o método da USEPA (1987), este também utiliza a taxa de evaporação e percentual de água drenada, os quais são determinantes no processo. Neste modelo é necessário calcular primeiramente a carga de lodo aplicada através da Equação 14.

$$IA = \frac{\rho_i \cdot D_i \cdot D_{si}}{100}$$

Equação 14

Onde:

IA = carga de lodo aplicada em cada ciclo (kgST/m².ciclo);

ρ_i = massa específica do lodo aplicado (kg/m³);

D_i = altura inicial da camada de lodo (m);

D_{si} = teor de sólidos no lodo aplicado (%ST)

A espessura final da camada de lodo, que depende do teor de sólidos desejado no final, e a diferença entre a altura inicial e final são calculadas pelas seguintes Equação 15 e Equação 16.

$$D_{ii} = \frac{100 \cdot IA}{\rho_{ii} \cdot D_{sii}}$$

Equação 15

$$D_{ii} = D_i - DD$$

Equação 16

Onde:

D_{ii} = altura final da camada de lodo seco (m);

D_{sii} = teor de sólidos desejado no lodo seco (%);

ρ_{ii} = massa específica do lodo desaguado (kg/m³);

DD = variação total de altura de camada de lodo (m).

A variação desta altura de camada que é resultante apenas da etapa de drenagem é determinada pela Equação 17.

$$DDu = DD.Pc$$

Equação 17

Onde:

Pc = porcentagem do volume total aplicado coletado pelo sistema de drenagem.

O valor do Pc é proporcional à facilidade com que água presente no material passa pela camada de lodo, atinge o meio filtrante e é coletada pelo sistema de drenagem. Já a altura de camada depois da etapa de drenagem e o tempo necessário para que a umidade do lodo seja evaporada é obtida através da Equação 18 e Equação 19.

$$DDe = DD - DDu$$

Equação 18

$$T = \frac{DDe}{E}$$

Equação 19

Onde:

DDe = altura de camada do lodo após a drenagem (m);

T = tempo de secagem por evaporação (mês);

E = taxa de evaporação média (m/mês)

Para concluir, o número de ciclos por ano e a taxa de aplicação anual de sólidos são determinados pela Equação 20 e Equação 21:

$$AA = \frac{12}{T}$$

Equação 20

$$IAa = IA - AA$$

Equação 21

Onde:

AA = número de ciclos

IAa = taxa de aplicação anual de sólidos (kgST/m².ano).

O valor utilizado nas equações deve ser definido baseado em uma análise da atividade de descarte de lodo, coleta de drenado e de remoção do lodo seco, de forma a otimizar o processo. O condicionamento químico pode aumentar o valor de P_c , resultando no aumento das taxas de aplicação anual e, conseqüentemente na diminuição das áreas. (MORTARA, 2011).

Segundo Van Haandel e Lettinga (1994) o tempo total do ciclo de secagem de lodo no leito é a somatória de quatro períodos sequenciais diferentes:

T1: tempo para preparação do leito e descarte de lodo;

T2: tempo de percolação ou drenagem;

T3: tempo de evaporação para atingir a umidade desejada;

T4: tempo de remoção do lodo seco.

Os períodos T1 e T4 são limitados pela mão de obra e equipamentos. Por outro lado, os períodos T2 e T3 são determinados pelas condições operacionais, condições meteorológicas e carga aplicada (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

A carga de sólidos aplicada tem influência direta sobre o tempo requerido para a drenagem. Dados experimentais comprovaram uma relação quadrática entre o tempo de percolação e cargas de sólidos aplicadas na faixa de 15 a 50kgST/m² podendo ser expressa conforme a Equação 22.

$$T2 = \left(\frac{Cs^2}{420} \right) + 0,5$$

Equação 22

Onde:

C_s = a taxa de aplicação de sólidos (15 kgST/m² < C_s < 50 kgST/m²) ;

T2 = tempo de percolação (dias).

Van Haandel e Lettinga (1994) citam ainda a produtividade dos leitos de secagem como principal parâmetro de dimensionamento expresso em kgST/m².dia, sendo definido pela razão entre a massa de lodo (C_s) e o tempo total do ciclo.

Apesar de existir os modelos apresentados para dimensionamento dos leitos de secagem, os modelos empíricos ainda são os mais utilizados. Aqui no Brasil o dimensionamento segue segundo a NBR 12209 (ABNT, 1992) que preconiza aplicar taxa máxima de 15kgST/m². Geralmente os projetistas através do conhecimento do valor de produção total diária ou mensal e concentração do mesmo, divide a massa de lodo pela TAS máxima 15kgST/m² e obtém a área total de leito necessária para o desaguamento e

secagem de lodo. Isto pode ser considerado um erro de projeto, pois dessa forma não é considerado tempo de percolação, o qual é influenciado pelo tipo de lodo e operação, nem as condições climáticas local, que pode resultar em diferentes taxas de evaporação e influencia no tempo de secagem.

3.3.1.3 Desempenho do processo:

A taxa de drenagem durante a etapa de drenagem depende do tipo de tratamento aplicado no esgoto e lodo, da concentração de sólidos e da altura de camada aplicada de lodo. Segundo USEPA (1987), o lodo digerido de forma aeróbia tende a drenar mais completamente do que lodos digeridos de forma anaeróbia, e lodo bruto drena mais rápido do que lodos digeridos. Por outro lado, o lodo bruto não seca tão fácil quanto os lodos digeridos, além do odor putrescível (WANG *et al*, 2007). Uma torta de lodo de 40% de ST pode ser alcançada dentro de 2 a 6 semanas em boas condições climáticas para lodo misto bem digerido, sendo possível alcançar até 90%, mas o tempo de secagem necessário para atingir esse teor de sólido torna a operação impraticável. A redução de volume mais significativa de lodo ocorre com ST de 30 a 40% (USEPA, 1987). Além do mais, remover o lodo com até 30% de ST causa menor perda de areia. De acordo com Chernicharo e Silva (2007 *apud* VANZETTO, 2012), a maior perda de umidade contida no lodo ocorre na drenagem, representando de 55 e 65% do volume inicial. Já o volume de água perdido na evaporação varia de 20 a 30%.

O tempo de secagem é afetado principalmente pela concentração inicial de ST no lodo. Vankleeck (1961 *apud* WANG *et al*, 2007) encontrou o dobro do tempo de secagem do lodo para um aumento da concentração de sólidos de 5 para 8%. Resultados de análises mostraram que a quantidade de água drenada decresce de forma linear conforme o aumento da concentração de sólidos. Na Figura 12 está apresentado o efeito na concentração de sólidos a partir da porcentagem de água drenada.

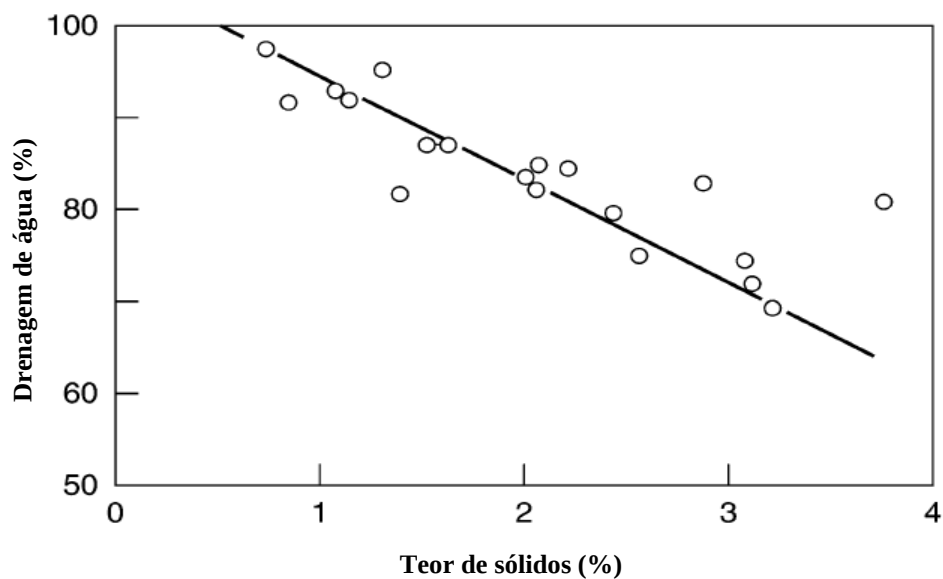


Figura 12- Concentração de sólidos x Volume de água drenada.
(Fonte: Wang *et al*, 2007)

Como já mencionado, a taxa de drenagem depende da altura da camada de lodo sob o leito, e o tempo de drenagem e umidade da torta aumentam com o aumento da altura da camada como apresentado na Figura 13.

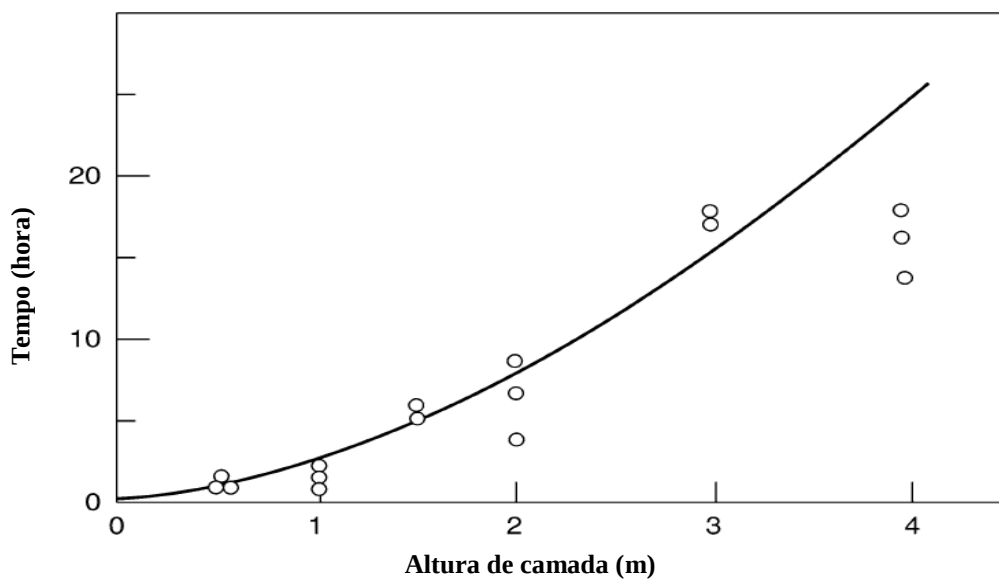


Figura 13 - Altura da camada de lodo x tempo de drenagem.
(Fonte: Wang *et al*, 2007)

A taxa de secagem pode aumentar quando inclui a etapa de condicionamento do lodo através de coagulantes e floculantes. Os condicionantes permitem uma porosidade de lodo mais alta, redução da compressão dos sólidos e consequentemente uma menor manutenção do leito.

Para uma secagem ótima de lodo ativado no leito de areia convencional, a carga não deveria exceder $75\text{kg/m}^2\cdot\text{ano}$ em leitos descobertos e $125\text{kg/m}^2\cdot\text{ano}$ para leitos cobertos (WANG *et al*, 2007). A cobertura elimina a influência negativa das chuvas, quando principalmente o lodo ainda se encontra com alta umidade. Uma vez que o lodo apresenta rachaduras, a chuva se torna menos significativa, pois a água percola entre as rachaduras e é drenada mais facilmente. Cheremisinoff (2002 *apud* VANZETTO, 2012) ainda afirma que essas rachaduras na superfície permitem que acelere a secagem das camadas inferiores pela evaporação. Já Pedroza *et al* (2006 *apud* VANZETTO, 2012) reporta que a secagem mais rápida na camada superior formando torrões prejudica o processo de difusão, responsável pelo transporte da massa de água das camadas inferiores para a superfície. Este problema pode ser solucionado com o revolvimento do lodo. O processo de revolvimento tem a função principal dentro do sistema de secagem natural do lodo propiciar a exposição das massas mais profundas do lodo com maior umidade na superfície, para receber maior intensidade da incidência de luz e calor solar. Segundo Andreoli *et al* (2001) este processo deveria proporcionar a obtenção de teor de sólidos final maior do que os tratamentos que não utilizaram revolvimento, porém a partir de resultados de testes verificou-se uma tendência de menor eficiência para os tratamentos com revolvimento. O processo não permite uma avaliação real do experimento, pois os tratamentos geralmente apresentam outros fatores que induzem ao incremento na concentração de sólidos final.

3.3.1.4 Operação e Manutenção:

A mão de obra para operação de um leito de secagem convencional inclui principalmente a remoção de lodo seco e reposição de areia perdida na limpeza dos leitos. Quando o lodo passa por condicionamento prévio há a necessidade de preparo da solução coagulante/floculante.

3.3.2 Leito pavimentado

O leito pavimentado surgiu da necessidade de se utilizar máquinas para fazer limpeza dos leitos de secagem. No leito convencional de areia não se usa máquinas pesadas para não causar danos ao sistema de drenagem. Diante dessa necessidade surgiu a utilização de concreto ou asfalto sobre uma base de pedregulhos. A possibilidade de utilizar equipamento mecânico para limpeza resulta em menores tempos de ciclos, assim

como uma operação mais econômica, pois a limpeza mecânica permite remover lodo com teor de umidade mais alto, com característica mais pastosa (WANG *et al*, 2007). A principal desvantagem é a inibição da drenagem, o que torna a área total do leito ser maior do que o leito convencional para se alcançar os mesmos resultados durante o mesmo período (USEPA, 1987).

3.3.2.1 Elementos de estrutura:

Normalmente, o leito pavimentado é retangular de 5 a 15m de largura e 21 a 46m de comprimento (WANG *et al*, 2007). É construído um revestimento de concreto ou asfalto de 20 a 30cm por cima da areia ou pedregulhos. Este revestimento deve ter no mínimo 1,5% de inclinação para o sistema de drenagem, que geralmente fica no centro e sem a pavimentação, como está ilustrado na Figura 14.

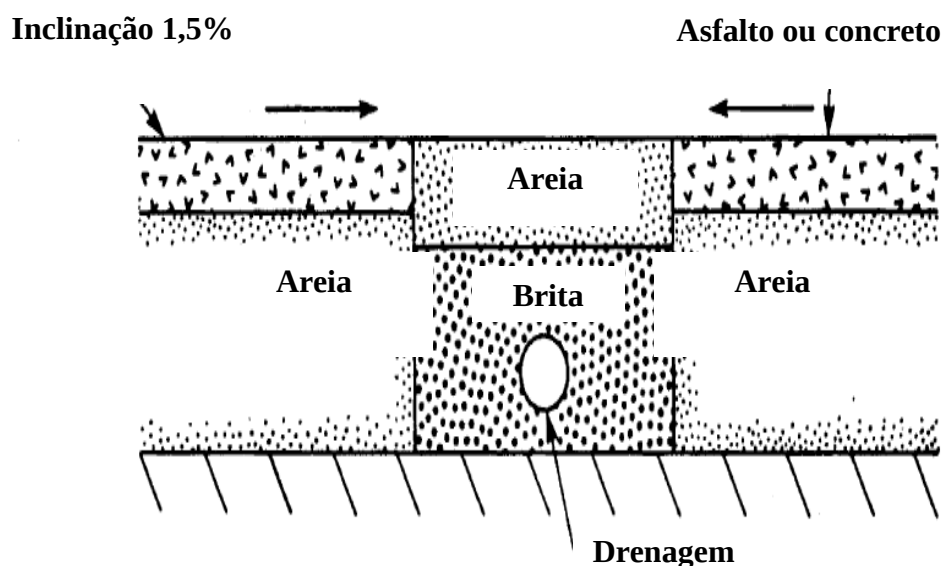


Figura 14 - Corte transversal de leito pavimentado.
(Fonte: Wang *et al*, 2007)

3.3.2.2 Desempenho:

O uso de lodo digerido é necessário para evitar problemas com odor. Segundo o manual da USEPA (1987), a fase de decantação pode requerer 2 a 3 dias para deposição do lodo e de 1 a 2 dias para decantar cada incremento de lodo adicionado, dependendo de sua característica. A fase final de secagem por evaporação irá depender das condições

climáticas após o desaguamento, e ao uso de algum dispositivo adicional como, por exemplo, aerador para misturar o lodo e quebrar a camada grossa que fica por cima.

O teor de ST que o lodo pode atingir dentro de 30 a 40 dias é de 40 a 50% para uma camada de lodo de 30cm, em boas condições climáticas.

3.3.3 *Leito de plantas (reeds bed)*

Segundo Metcalf e Eddy (2014), leitos de secagem de planta são similares aos sistemas *wetlands* que consistem em canais cheios de areia ou rocha para suportar uma vegetação emergente. A vegetação mais utilizada são as gramíneas *Phragmites Comminus*, conhecidas como juncos ou taboas. A principal vantagem desse tipo de leito é que ele promove uma importante degradação da matéria orgânica através da mineralização do lodo (CRESPO *apud* VANZETTO, 2012).

O caule e as raízes formam um caminho preferencial para percolação e drenagem do lodo. As folhas absorvem parte do líquido e liberam para atmosfera por meio da evapotranspiração. O oxigênio captado pela planta é introduzido no lodo líquido por meio das raízes e provoca uma proliferação de microrganismos que completam a estabilização da matéria orgânica.

O leito de secagem de planta é geralmente construído com várias camadas de pedras com diferentes granulometrias, seguido por camada de areia, conforme está ilustrado na Figura 15. As *Phragmites Comminus* são plantadas logo após 30cm de camada de pedras, abaixo da camada de areia. A primeira aplicação de lodo é feita depois que a planta estiver bem crescida.

As taxas de carga de lodo aplicadas em leitos de planta variam de 30 a 60kg/m²/ano.

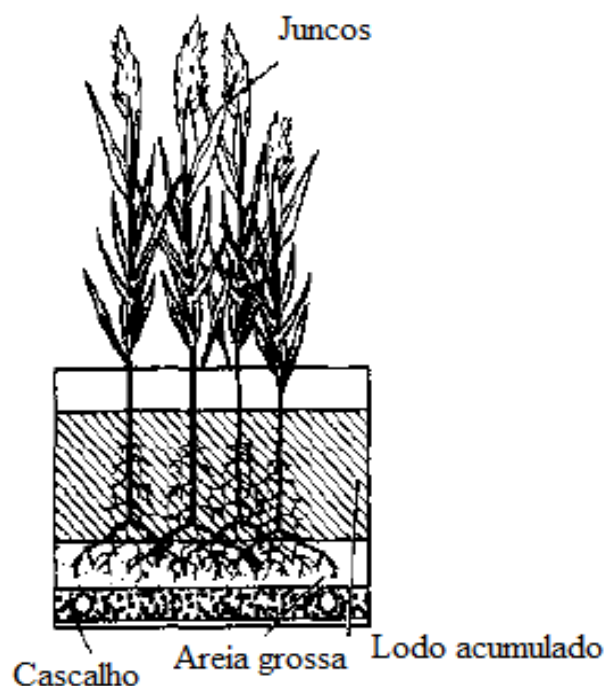


Figura 15 - Corte transversal de leito de planta.

(Fonte: Adaptado Metcalf; Eddy, 2014)

3.3.4 *Leito a vácuo assistido*

Esta tecnologia de desaguamento aplica uma pressão a vácuo abaixo de um meio artificial poroso e rígido, o qual recebe lodo condicionado. O vácuo aspira a água livre do lodo através de placas e, todo lodo sólido fica retido por cima formando uma camada de lodo uniforme. Segundo Turovsky e Mathai (2006 *apud* VANZETTO, 2012) a principal vantagem desse tipo de leito é uma área menor requerida, porque o desaguamento é mais rápido, e a desvantagem é a dependência de condicionamento químico e consumo de energia elétrica.

Assim como os demais leitos, o principal parâmetro de dimensionamento é a carga anual de produção de sólidos secos e o número de ciclos de operação. Uma carga de 10kg/m²/ciclo é o mais aceitável (USEPA, 1987). Em condições favoráveis, este sistema deságua lodo aeróbio digerido mais concentrado a 12% de ST em até 24 horas sem adição de polímero, e em 8 horas quando adicionado produtos químicos (WANG *et al*, 2007).

Os elementos estruturais de um leito a vácuo assistido geralmente são: uma estrutura suporte e paredes de concreto, sistema de coleta e drenagem, meios artificiais para filtração, sistema de dosagem de polímero, tubulação de distribuição de lodo, sistema de pressão a vácuo e bombas. Na Figura 16 está apresentado um exemplo de leito a vácuo assistido.

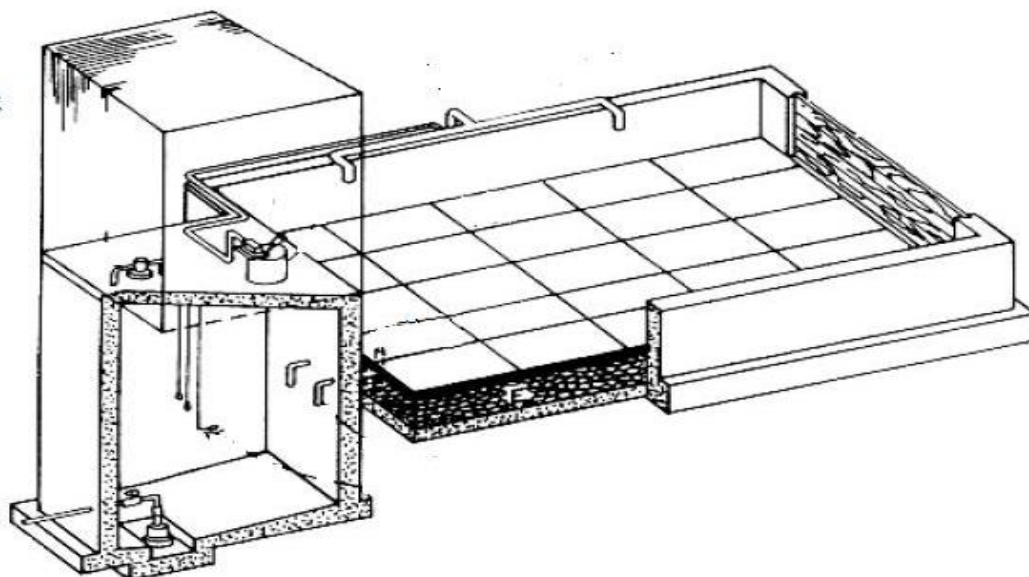


Figura 16 - Representação de um leito a vácuo assistido.
(Fonte: Metcalf; Eddy, 2014)

3.3.5 ***Leito de drenagem***

O leito de drenagem tem sido desenvolvido como alternativa de desaguamento natural de lodo desde os estudos de Cordeiro em 1993 (CORDEIRO, 2001). Sua proposta era de alteração física da estrutura dos leitos de secagem convencional para melhoria do desaguamento de lodo proveniente de estação de tratamento de água (ETA). A proposta final do estudo foi denominada Leito Modificado 2, desenvolvida nos estudos do Projeto PROSAB 2, tema IV (CORDEIRO, 2001). A pesquisa iniciou com a ideia de reduzir as camadas de areia e brita do leito e colocar manta geotêxtil sobre a areia. Com resultados satisfatórios, na segunda etapa foi removida toda camada de areia e utilizado apenas uma camada de brita 1 de 5cm e a manta geotêxtil. Essa evolução permitiu uma diminuição do tempo de drenagem bruscamente e então, o leito passou a ser chamado de leito de drenagem.

Após várias pesquisas com lodo de ETA, o leito de drenagem também passou a ser utilizado para lodo anaeróbio de ETE. Mortara (2011) avaliou o desaguamento de lodo anaeróbio condicionado com polímero em diferentes taxas de aplicação. Assim como os demais tipos de leito, as taxas de aplicação devem ser mais estudadas, mas segundo Mortara (2011) o leito de drenagem mantém as velocidades de secagem mesmo com taxas acima de 15kgST/m²/ciclo.

A estrutura do leito de drenagem basicamente consiste em: alvenaria e concreto para os tanques, camada de brita 1 e manta geotêxtil que são utilizados como meio filtrante, e o sistema de coleta e drenagem. A escolha da manta geotêxtil para cada tipo de lodo determinará a eficiência no desaguamento. Segundo Barroso (2007) além da manta atender os requisitos básicos da filtração, ela precisa manter a capacidade drenante e retenção das partículas eficientes. Para isso, é necessário que estas apresentem um coeficiente de permeabilidade elevado e uma distribuição de poros que sejam capazes de promover a drenagem da água.

A operação do leito de drenagem segue como os demais processos, preparo do lodo, desaguamento, secagem, remoção e limpeza. A manta geotêxtil assim como a areia tende a colmatar mais rápido com o tempo, reduzindo a capacidade drenante do meio poroso, o que ocasiona sua troca constante.

3.3.6 *Leito de bloco drenante (wedge wire)*

O leito de secagem *wedge wire* ou bloco drenante, como é chamado no Brasil, surgiu nos Estados Unidos por volta de 1970 e até pouco tempo atrás existia apenas 18 instalações (WANG *et al*, 2007). Na Inglaterra também tem sido utilizado para desaguamento de lodo industrial e municipal há mais de vinte anos. Segundo o manual da USEPA (1987) o leito *wedge wire* ou *wedgewater*, como também pode ser chamado, é similar ao sistema de leito à vácuo assistido devido a camada filtrante ser um meio artificial. O bloco drenante (*wedge wire*) é um painel que possui ranhuras em formato de cunha com espessuras variadas dependendo do fabricante, no entanto os primeiros painéis que surgiram eram de aproximadamente 0,25mm. Estes painéis que ficam sob um piso de concreto servem de suporte para o lodo e permitem a drenagem da água livre através das ranhuras, como está ilustrado na Figura 17. De acordo com o manual da USEPA (1987), o lodo é descartado no leito com a válvula de saída de drenagem fechada, ou seja, o lodo e a água livre permanecem no leito. Após todo leito ser preenchido de lodo, a válvula é parcialmente aberta para controle da vazão de drenagem por mais de duas horas. Após esta fase controlada para evitar perda de sólidos, a válvula é totalmente aberta e a torta de lodo permite a drenagem naturalmente. Este procedimento é feito para que o lodo na fase inicial se acomode sob o painel e forme mais uma zona de filtro, além de estabilizar o potencial de saturação de fluxo através do lodo e do bloco drenante (*wedge wire*).

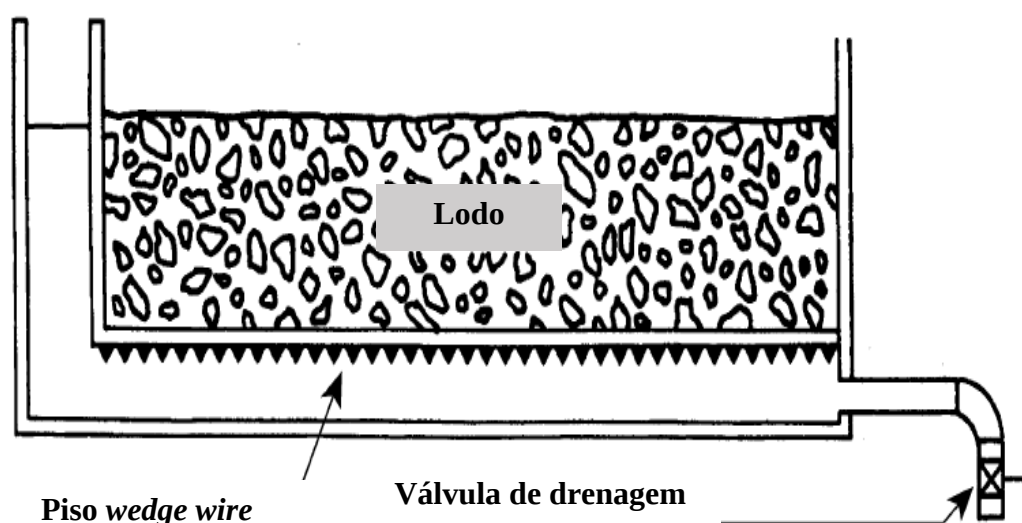


Figura 17 - Corte longitudinal de leito com piso de blocos drenantes (*wedge wire*).
(Fonte: USEPA, 1987)

De acordo com Wang *et al* (2007) as vantagens noticiadas sobre o leito de secagem com bloco drenante (*wedge wire*) são:

- Não colmata o meio filtrante;
- Drenagem constante e rápida;
- Maior taxa de aplicação de sólidos do que leito de areia;
- Fácil manutenção;
- Lodos difíceis de desaguar, como o aeróbio digerido, pode ser secado neste leito;
- Maior facilidade de remoção de lodo em comparação ao leito de areia.

Os primeiros blocos drenantes (*wedge wire*) foram feitos em aço inoxidável, mas atualmente são painéis de poliuretano. No Brasil, o bloco drenante é feito de polipropileno composto, como está ilustrado na Figura 18. Cada bloco mede 30 x 30cm e possui 5cm de altura, e segundo o fabricante as aberturas de formato cônico possuem espessura de 0,7mm e corresponde a 12% da área filtrante da peça (BRASWORLD, 2015). Os blocos drenantes são encaixados uns aos outros e então, a área do leito é formada apoiada em um fundo de concreto plano.



Figura 18 - Bloco drenante em polipropileno.
(Fonte: Brasworld, 2015)

De acordo com o manual da USEPA (1987), o critério de TAS de lodo em leito com piso de blocos drenantes (*wedge wire*) é desenvolvido em conjunto com o fabricante. Um teste de bancada ou unidade piloto pode ser usado para determinar a melhor TAS e a dosagem de polímero para cada tipo de lodo. A taxa de sólidos geralmente aplicada varia de 2 a 5kg/m² por ciclo operacional. O número de ciclos por ano varia dependendo dos processos da ETE e das condições climáticas locais. Em uma rotina de ciclo operacional de 24 horas, a taxa anual aplicada poderá exceder 1.600kg/m². Esta taxa anual excede a carga de aplicação em leitos de secagem convencional de areia. Dados de um fabricante americano propõem que o leito de blocos drenantes (*wedge wire*) possui capacidade para TAS de 3,6 a 9,8kgST/m² para lodo aeróbio, e de 4,8 a 27,8kgST/m² para lodo anaeróbio, dependendo do teor de sólidos inicial (GRAVITY FLOW SYSTEM).

Em leito de secagem com piso de blocos drenantes (*wedge wire*), o lodo digerido aerobicamente condicionado com polímero pode ser desaguado com 8 a 12% de sólidos após 24 horas, e lodo digerido anaerobicamente com 16 a 20%. O condicionamento com polímero é necessário para a maioria dos lodos. Sem o condicionamento, as partículas mais finas de lodo digerido aerobicamente passam pela abertura do bloco e é perdido com o filtrado ou acumulado no tubo coletor (USEPA, 1987).

Apesar de ser uma tecnologia antiga, existem poucos estudos sobre seu uso. Em 1992, *US Army Corps of Engineers Research Laboratory* (USACERL) fez um relatório comparando um leito de bloco drenante (*wedge wire*) e um leito de sistema a vácuo assistido. Através de pesquisa com diversos operadores de ETE que utilizavam os dois

tipos de leitos, a USACERL chegou à conclusão que o leito de bloco drenante fornece a mesma eficiência que o leito a vácuo assistido, mas com menores problemas operacionais e de manutenção.

No Brasil, o leito de secagem com piso de bloco drenante ainda é uma tecnologia recente. França (2012) foi o primeiro a testar em um leito piloto para desaguamento de lodo de tanques de aeração compartimentados na ETE Bom Retiro, distrito de Angatuba/SP. De acordo com França o sistema de leito de secagem piloto com o bloco drenante apresentou excelente desempenho para o desaguamento de lodo, porém a implementação em grande escala depende de uma análise de custo/benefício.

Almeida (2012) desenvolveu duas unidades piloto de leito com blocos drenantes e neles inseriu lodo aeróbio e anaeróbio provenientes de reatores de ETE's. As coletas foram realizadas num ciclo de 24 horas e analisadas quanto a sólidos suspensos totais, umidade da torta e captura de sólidos. Os resultados obtidos para umidade de torta variaram entre 80 e 90% e a captura de sólidos variou acima dos 90%.

Na Tabela 11 está apresentado o desempenho do leito com piso de blocos drenantes para diferentes tipos de lodo.

Tabela 11 - Desempenho de leito com piso de bloco drenante (*wedge wire*) para lodos condicionados.

Tipo de lodo	%ST no lodo de alimentação	%ST no lodo de desaguamento	Tempo de desaguamento	Captura de sólidos (%)
Primário	8,5	25	14 dias	99
Filtro biológico	2,9	8,8	20 horas	85
Lodo misto	3	10	12 dias	86
Lodo ativado	0,7	6,2	12 horas	94
Lodo adensado	2,5	8,1	4 horas	100

Fonte: Adaptado Wang *et al* (2007)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação do leito de secagem com piso de blocos drenantes a pesquisa foi dividida em três etapas. A Etapa 1 consistiu em monitoramentos realizados durante a operação de descartes de lodo aeróbio em escala real. Devido a fatores intervenientes que ocorreram durante as operações rotineiras da ETE, percebeu-se a necessidade de testar em escala reduzida para obter maior controle sobre as variáveis. Além disso, como o desaguamento de lodo depende do tipo e característica do lodo, para a Etapa 2 foram realizados descartes de lodo anaeróbio sem polímero em protótipo de leito com piso de blocos drenantes. E, para finalizar, a Etapa 3 consistiu em levantar dados operacionais de ETE's que possuem leito de secagem com piso de blocos drenantes em operação.

4.1 Etapa 1 - Escala real com lodo aeróbio

A Etapa 1 foi realizada em escala real na Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário de uma indústria de componentes eletroeletrônicos localizada em Itu/SP. O tratamento do esgoto da empresa é composto por tratamento preliminar, tratamento biológico por valo de oxidação (processo de lodos ativados de aeração prolongada) e decantador secundário (DS), e ainda possui tratamento terciário para fins de reuso composto por filtros e desinfecção através de luz ultravioleta e dosagem de hipoclorito de sódio em linha. A ETE trata uma vazão de aproximadamente 60m³/d de esgoto cujas algumas características estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados analíticos esgoto bruto na alimentação da ETE.

Parâmetros	Unidade	Resultados	Método de Referência
DBO	mg/L	330,0	SMEWW 5210 B (APHA; AWWA; WEF (2011))
DQO	mg/L	625,3	SMEWW 5210 B (APHA; AWWA; WEF (2011))
Óleos e Graxas	mg/L	122,4	SMEWW 5210 B (APHA; AWWA; WEF (2011))
Fósforo Total	mg/L	1,8	SMEWW 4500 (APHA; AWWA; WEF (2011))
Nitrato	mg/L	45,4	SMEWW 4500 (APHA; AWWA; WEF (2011))

Como a idade do lodo neste processo é mais alta, a estabilização do lodo ocorre dentro do próprio tanque de aeração, excluindo a necessidade de digestão do lodo após o DS. Também não há processo de adensamento antes do desaguamento. O lodo é descartado diretamente do fundo do DS, em seguida passa por condicionamento com aplicação de polímero em linha e floculação hidráulica, e então, segue para o leito de secagem com piso de bloco drenantes.

O polímero utilizado para o condicionamento do lodo é catiônico do tipo emulsão a 0,2% de Praestol K133L. A concentração de aplicação de polímero foi de 25ppm, determinado em ensaio *Jar Test* realizado pela empresa. Na Figura 19 está apresentada a característica que o lodo atingiu com ótimas condições de floculação obtido no *Jar Test*. É possível perceber a separação do sólido-líquido e a qualidade do clarificado.

Figura 19 - Ensaio *Jar Test* para determinação de polímero.

O leito de secagem da ETE é composto por: piso de concreto plano e paredes de alvenaria, meio de filtração do tipo bloco drenante, sistema de drenagem por ralos com inclinação para uma canaleta de coleta e válvulas de entrada e saída de lodo, conforme está apresentado na Figura 20 e na Figura 21. O líquido drenado do lodo é bombeado de volta para a entrada da ETE. O leito ainda conta com uma estrutura de cobertura plástica transparente tipo estufa agrícola, com cortinas laterais que permitem o fechamento em casos de chuva e ventania, se necessário.

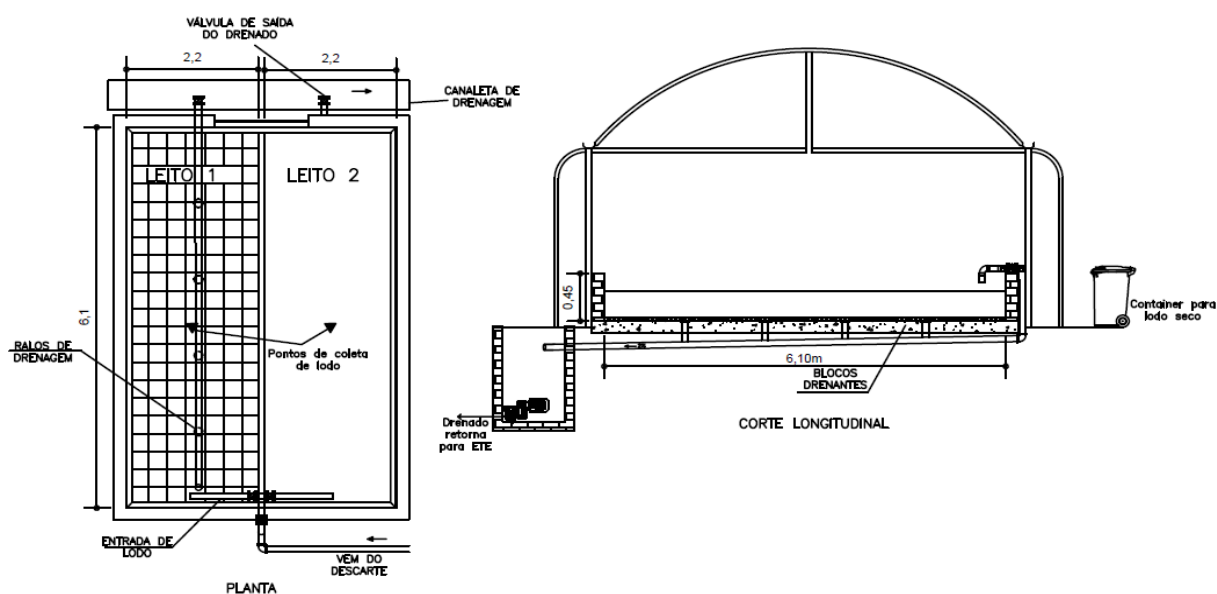


Figura 20 – Planta e Corte longitudinal do leito de secagem da ETE.



Figura 21 - Vista do leito de secagem.

Durante a Etapa 1 ocorreram 4 descartes (Teste 1, 2, 3 e 4) para acompanhamento e monitoramento em diferentes períodos do ano. O volume total de descarte operacional de lodo foi dividido em dois leitos de $13,42\text{m}^2$ cada ($2,20\text{m} \times 6,10\text{m}$), apresentado na Figura 22, sendo que $1/3$ do volume foi descartado no leito 1, e $2/3$ no leito 2, para analisar a diferença de desempenho com diferente altura de camada de lodo. O volume foi pré-determinado conforme a vazão da bomba de alimentação de $8,3\text{m}^3/\text{h}$ na frequência de 44Hz , sendo assim no leito 1 foi aplicado $7,6\text{m}^3$ e, $15,2\text{m}^3$ no leito 2.

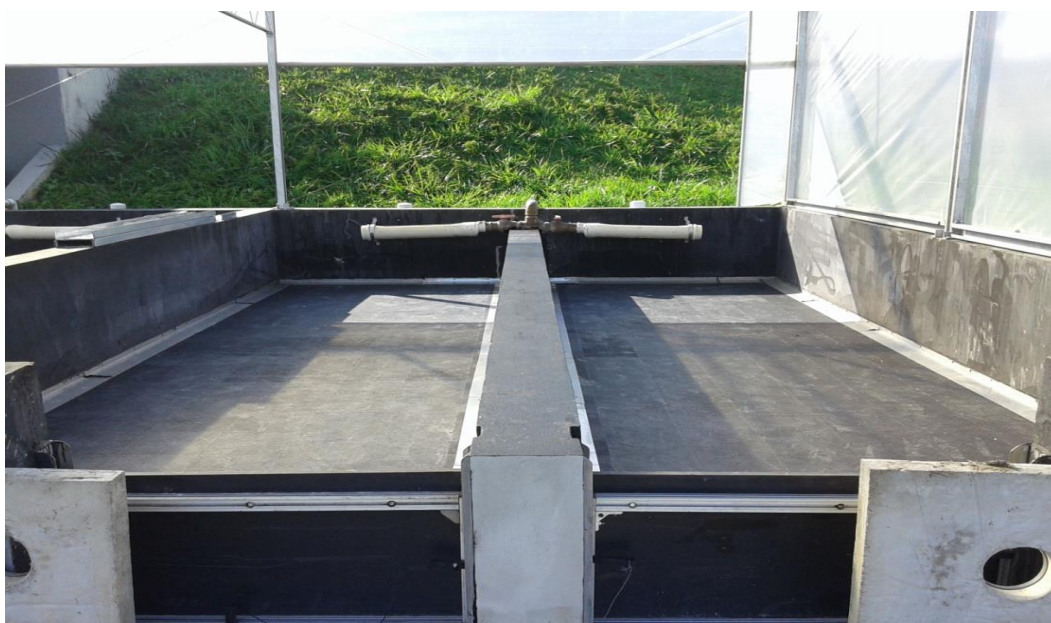


Figura 22 – Dois leitos de $13,42\text{m}^2$ utilizados no descarte.

Como a avaliação do desempenho do desaguamento foi realizado durante operações rotineiras da ETE em escala real, problemas operacionais do sistema afetaram os volumes de lodo aplicados nos Testes 3 e 4. Durante o desaguamento de lodo do Teste 3 foi notado entrada de ar na bomba de alimentação do polímero, afetando o desempenho e ocasionando uma má floculação do lodo. Isto causou liberação de menos volume água livre, prejudicando a eficiência da etapa de drenagem, aumentando a camada de lodo durante a alimentação no leito de forma mais rápida. Com isso foi necessário reduzir volume de lodo aplicado no leito 2 ($T3_{T2}$), aproximadamente para $12,4\text{m}^3$, para que não houvesse transbordamento. Por outro lado, o problema ocorrido durante o Teste 4 foi com o desempenho da bomba de descarte de lodo, que mesmo após aumentar a frequência da bomba para 60Hz , a mesma apresentou vazão de $2,5\text{m}^3/\text{h}$. Sendo assim, foi descartado $2,5\text{m}^3$ de lodo no leito 1 ($T4_{T1}$), e 5m^3 no leito 2 ($T4_{T2}$).

Portanto, foram geradas 8 variáveis, as quais estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Variáveis obtidas durante Etapa 1.

Leito	Teste	Estação	Volume (m ³)	Revolvimento de lodo manual 1 vez por semana	Uso de condicionantes	Problemas Operacionais
T1 _{T1}	1	Outono	7,6	Não	Sim	Não
T1 _{T2}	1	Outono	15,2	Não	Sim	Não
T2 _{T1}	2	Inverno	7,6	Sim	Sim	Não
T2 _{T2}	2	Inverno	15,2	Sim	Sim	Não
T3 _{T1}	3	Primavera	7,6	Sim	Sim	Baixo rendimento na bomba dosadora de polímero
T3 _{T2}	3	Primavera	12,4	Sim	Sim	Baixo rendimento na bomba dosadora de polímero
T4 _{T1}	4	Verão	2,5	Não	Sim	Baixo rendimento na bomba de descarte
T4 _{T2}	4	Verão	5,0	Não	Sim	Baixo rendimento na bomba de descarte

Os descartes nos dois leitos (1 e 2) não foram realizados simultaneamente, porém no mesmo dia, para que fossem avaliados durante o mesmo período de secagem e condições climáticas. O Teste 1 ocorreu no dia 13 de abril de 2015, época de outono no Brasil, e teve duração de 36 dias. Não houve revolvimento do lodo, ou seja, a forma que o lodo se distribuiu durante a alimentação no leito ficou até o final do período de secagem. O Teste 2 começou dia 14 de julho de 2015, estação de inverno, teve duração de 50 dias e houve revolvimento manual do lodo com rastelo uma vez por semana. O Teste 3 teve início no dia 28 de setembro de 2015 (primavera) com período de secagem de 36 dias, havendo revolvimento manual. Já o Teste 4 iniciou dia 13 de janeiro de 2016 (verão), teve duração de 22 dias, sem revolvimento. A duração de cada Teste foi influenciada pela rotina de operação de descarte da ETE e/ou pelo teor de sólidos final atingido.

O lodo bruto descartado foi caracterizado somente no Teste 1 para conhecimento da concentração inicial de sólidos totais no descarte. Devido a isso, a TAS pôde ser calculada apenas para o T1_{T1} e T1_{T2}. Na Tabela 14 está apresentado as análises do efluente bruto e tratado da ETE entre junho de 2015 e janeiro de 2016, as quais apresentaram variações como por exemplo nos meses Setembro e Novembro e, por este motivo a concentração de sólidos totais do lodo descartado não pôde ser considerada a mesma para os demais Testes.

No entanto, apesar de não ter o conhecimento da real concentração inicial de sólidos totais, a concentração média inicial encontrada no Teste 1 foi usada para estimar a redução de umidade na etapa de drenagem do desaguamento dos demais testes.

Tabela 14 - Característica do esgoto bruto e tratado da ETE.

Mês	Estação	Un.	DQO bruta	DQO após DS	SST no Valo de Oxidação
Jun/15	Outono	mg/L	625,3	5,9	2270,0
Jul/15	Inverno	mg/L	763,3	114,7	4300,0
Ago/15	Inverno	mg/L	755,0	42,0	4350,0
Set/15	Primavera	mg/L	920,4	62,1	820,0
Out/15	Primavera	mg/L	779,4	109,7	2910,0
Nov/15	Primavera	mg/L	1736,4	537,0	698,0
Dez/15	Verão	mg/L	628,8	155,6	3070,0
Jan/16	Verão	mg/L	795,4	123,40	3640,0

Para análise do desempenho durante a drenagem de lodo um dos itens avaliados foi a vazão de saída do drenado. Durante o descarte de lodo dos Testes 1 e 2 as vazões de saída foram obtidas nos tempos de 5, 15, 30, 60 e 110min, com o auxílio de um balde de 10L e um cronômetro.

Outro método usado para analisar a drenagem foi o percentual de redução de volume estimado através da medição da altura de camada de lodo. Ao final da alimentação de lodo no leito, com auxílio de uma régua, a altura de camada de lodo máxima atingida no centro do leito foi anotada. O mesmo foi feito 1 hora e 24 horas após o descarte para estimar o volume reduzido no leito.

Após 24 horas do descarte foi coletada amostra da torta de lodo para determinação do teor de sólidos totais (%ST), e a partir da concentração média do lodo de entrada foi possível estimar a redução de umidade atingida já na fase de drenagem do desaguamento.

Para análise da qualidade do clarificado após a drenagem, foram coletadas amostras do Teste 2 e analisado quanto a turbidez *in loco* com auxílio do turbidímetro Instrutherm TD-200, pelo método nefelométrico, e quanto aos sólidos em suspensão conforme o método 2540 da *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* - SMEWW (APHA; AWWA; WEF, 2011).

Já para a fase de secagem, o método de avaliação utilizado foi a determinação do teor de sólidos totais de acordo com o SMEWW 2540 (APHA; AWWA; WEF, 2011), durante todo o tempo de secagem. O lodo foi coletado sempre no mesmo ponto do leito, na parte

central da largura e comprimento. As coletas de lodo foram realizadas de duas a três vezes por semana para produzir a curva de secagem de lodo.

Como a secagem natural depende dos fatores que interferem na evaporação da água contida no lodo, a temperatura e umidade foram monitoradas durante o período de secagem com o auxílio de um termo-higrômetro que foi deixado dentro da estufa. Para conhecimento das condições climáticas no local, foram utilizados os dados disponibilizados no *site* Instituto Nacional de Metrologia (INMET) da Estação Automática de Sorocaba A713, que fica a 30km do local do teste, no município de Itu.

Ainda durante a Etapa 1 foi possível o registro fotográfico e acompanhamento de toda a rotina da operação de descarte de lodo, do preparo do polímero até a limpeza do leito, além dos intervenientes que afetam a eficiência no desaguamento, como por exemplo a floculação do lodo.

4.2 Etapa 2 – Escala piloto com lodo anaeróbio

Além da Etapa 1 ter apresentado intervenientes que não permitiram dados exatos de volume e taxa de aplicação de sólidos, os descartes foram realizados apenas com lodo aeróbio digerido aerobiamente e condicionado com polímero. De acordo com autores (METCALF; EDDY, 2014; USEPA, 1987; VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994), o desaguamento depende de vários fatores, sendo o principal deles o tipo de lodo. Então, a Etapa 2 visou obter maior controle dos testes para dados mais precisos e, ainda avaliar o desempenho do bloco drenante com o lodo anaeróbio digerido sem aplicação de polímero, visto que no Brasil há uma grande tendência de utilização de reatores tipo UASB para o tratamento de efluentes devido às condições climáticas serem favoráveis.

Em parceria com a UFSCAR (Universidade Federal de São Carlos), a Etapa 2 foi realizada na ETE Monjolinho, em São Carlos/SP. A ETE operada pelo SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) de São Carlos trata atualmente 636L/s. Na Figura 23 está apresentado o fluxograma do sistema de tratamento que é composto por tratamento preliminar, tratamento biológico com reatores UASB, tratamento físico-químico através da coagulação e flotação, desinfecção com radiação ultravioleta e pós-aeração por escada hidráulica.

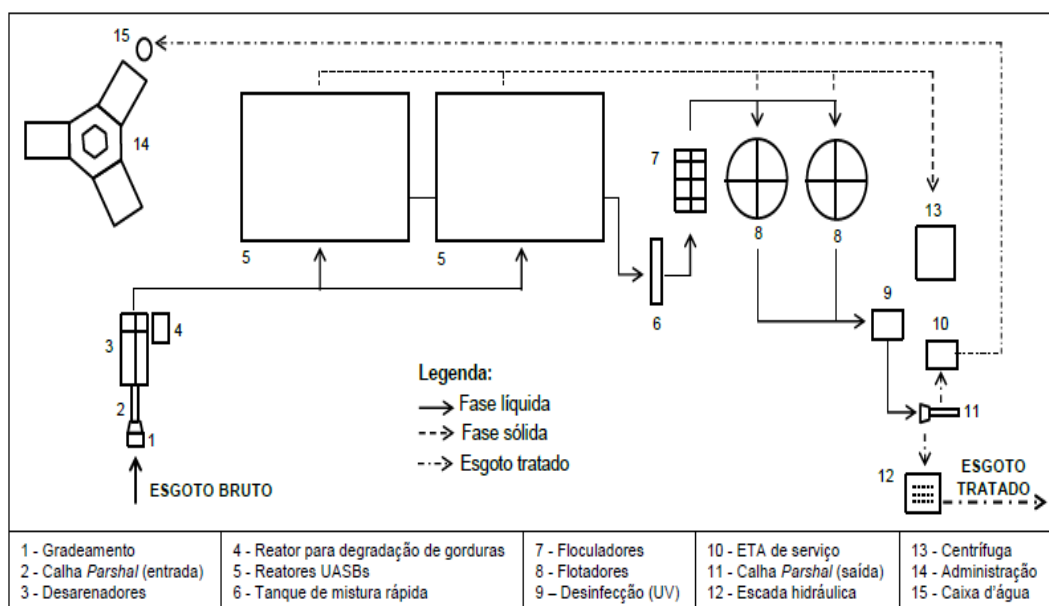


Figura 23 - Fluxograma da ETE Monjolinho.

(Fonte: Fajardo, 2014).

O lodo para os testes foi coletado na saída de um dos reatores UASB, na primeira válvula com altura de 1,40m da base do reator, para obter o lodo mais concentrado.

Um leito piloto foi construído para o teste com medidas internas de 90cm x 90cm por 28cm de altura, com o total de 9 blocos drenantes. Em um dos lados do leito foi colocado um registro para que a vazão de drenagem fosse controlada.

O volume de lodo desaguado foi determinado a partir da altura de camada de lodo de 20cm acima do piso de bloco drenante, ou seja, 25cm no total. Assim, o volume total descartado foi de aproximadamente 202,5L.

O lodo foi descartado diretamente do fundo do reator para o piloto com auxílio de uma mangueira com engate no registro do reator, sem adição de condicionantes, então era sabido que não haveria uma separação de sólido-líquido a ponto de liberar água livre de forma eficiente, como acontece quando se usa polímeros. Devido a isso, a operação ocorreu como é indicado no manual USEPA (1987). Durante a alimentação do lodo, o registro de drenagem permaneceu fechado, e após o piloto ser preenchido de lodo até a altura de 20cm acima do bloco drenante, foi estabelecido um tempo de repouso para ocorrer a decantação do sólido e formar uma camada de lodo mais concentrado no fundo para agir também como meio filtrante da água, e consequentemente garantir uma melhor eficiência na qualidade do drenado e captura de sólidos. O tempo de repouso de 20min foi estipulado a partir do primeiro ensaio após ser possível notar uma clarificação na superfície do lodo. O leito foi levemente inclinado, para que a drenagem ocorresse mais facilmente

através do registro de saída em uma das extremidades, conforme está apresentado na Figura 24.



Figura 24 – Leito piloto com inclinação para escoamento através do registro.

Após o tempo de repouso, o registro da saída de drenagem foi aberto para o controle da qualidade da drenagem e a partir do 1min foi medida a vazão com auxílio de um *becker* de 500L e cronometro. Também foram coletadas amostras do drenado para caracterização da qualidade e, medido altura reduzida da camada de lodo com auxílio de uma régua para estimar redução de volume durante a etapa de drenagem do desaguamento. Na Tabela 15 estão apresentados os parâmetros de controle e os tempos de coleta de dados durante o desaguamento.

Tabela 15 - Parâmetros de controle durante o desaguamento.

Controle / Tempo (min)	1	11	31	41	51	61	71	81	91	101
Vazão	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Coleta de amostra	x	x	x		x			x		x
Altura		x	x	x	x	x	x	x	x	x

A partir dos dados de vazão de drenagem foi possível reproduzir a curva de drenagem no tempo.

As amostras coletadas do drenado foram analisadas segundo os padrões SMEWW com o método 2130 para turbidez, método 2120B para cor aparente, e método 2540 para sólidos em suspensão (APHA; AWWA; WEF, 2011).

Amostra do lodo bruto descartado também foi coletada para determinação de teor de sólidos totais e sólidos em suspensão conforme a SMEWW 2540 (APHA; AWWA; WEF, 2011).

Como o leito piloto estava inclinado, a redução de volume de lodo foi calculada a partir do volume do trapézio através das dimensões do leito e das alturas de camada de lodo medidas a cada instante no lado da parede do registro e na parede oposta. Após a drenagem, o leito voltou a ficar em base plana para a etapa de secagem e foi determinado a altura de camada de lodo inicial da etapa de secagem.

Para acompanhamento da secagem de lodo foram coletadas três amostras da torta de lodo após 24 horas do descarte (alimentação de lodo no leito), e mais cinco amostras em triplicata durante todo o período de secagem. As médias para o teor de sólidos totais foi relacionado com o tempo de secagem para reproduzir a curva de secagem.

Foram realizados 3 Testes com o lodo anaeróbio em escala piloto. O TP 1 iniciou dia 10 de maio de 2016, estação de outono no Brasil. O TP 2 ocorreu dia 27 de agosto de 2016, estação de inverno. E por fim, o TP 3 iniciou dia 19 de novembro, época de primavera. No primeiro teste, o TP 1, foi instalado uma cobertura sobre o leito piloto para proteger contra as chuvas, no entanto o mesmo não aguentou e cedeu, então durante o TP 2 e TP 3 o leito ficou descoberto.

Durante o período de secagem informações sobre as condições climáticas como temperatura e umidade do ar, radiação solar, velocidade do vento e precipitação foram extraídas do *site* do Instituto Nacional Meteorológico (INMET) da Estação Automática de São Carlos A711 para relacionar a influência no processo de secagem natural do lodo.

4.3 Etapa 3 – Levantamento de dados de leito de secagem com piso de blocos drenantes em operação.

Foi levantado junto ao fabricante de blocos drenantes, os locais onde já haviam leito de secagem com piso de blocos drenantes em operação para enviar um questionário aos operadores e obter a análise crítica do sistema em termos operacionais.

Através da experiência obtida durante o acompanhamento da Etapa 1, foi preparado um questionário, o qual se encontra no Anexo C, e enviado para alguns operadores de ETE. Além do relatório do leito de secagem monitorado durante a Etapa 1, foram obtidos mais dois relatórios de leito de secagem com piso de blocos drenantes em operação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Etapa 1 - Escala real com lodo aeróbio

Nos itens 5.1.1 ao 5.1.5 serão apresentados os resultados obtidos durante o acompanhamento de operação de descarte em escala real de lodo aeróbio condicionado com polímero, em leito de secagem com piso de blocos drenantes.

5.1.1 *Taxa de aplicação de sólidos (TAS)*

A concentração de ST no lodo desaguado foi analisado apenas no Teste 1 e apresentou uma média de 6.200mg/L, ou seja, o lodo contém um teor de sólidos de 0,6%, dentro da faixa esperada para lodos ativados, podendo variar de 0,5 – 2,5% (METCALF; EDDY, 2014). As concentrações para os demais Testes não puderam ser consideradas as mesmas para calcular a taxa de aplicação de sólidos (TAS) devido às variações das características de entrada de esgoto apresentadas na Tabela 14. Essa variação da característica do esgoto bruto é um dos motivos que justifica a dificuldade em se dimensionar um leito de secagem somente através da TAS, fixando o valor da mesma. Sendo assim, a TAS no descarte de lodo do Teste 1 foi determinado conforme a Equação 23 e Equação 24.

$$M = \frac{V \cdot [ST]}{1000}$$

Equação 23

$$TAS = \frac{M}{A}$$

Equação 24

Onde:

M = massa de sólidos (kg);

V = volume de lodo (m^3);

$[ST]$ = concentração de sólidos totais (g/m^3);

A = área do leito (m^2);

TAS = taxa de aplicação de sólidos ($kgST/m^2$).

As taxas de aplicação de sólidos encontradas para os testes $T1_{T1}$ e $T1_{T2}$ foram de 3,5 $kgST/m^2$ e 7,0 $kgST/m^2$, respectivamente. Estes valores ficaram dentro da faixa de 3,6 a 9,8 $kgST/m^2$ por ciclo de operação para lodo aeróbio que deve ser aplicado conforme indicado pelo fabricante de meio artificial *wedge wire* GRAVITY FLOW SYSTEM, e abaixo do máximo indicado pela NBR 12209 (ABNT, 1992) de 15 $kgST/m^2$ para leitos de secagem convencional.

5.1.2 ***Desaguamento: fase de drenagem do lodo***

A drenagem da água livre acontece instantaneamente, pois a configuração do leito permite que a válvula de drenagem fique aberta, e segundo os operadores além da operação ser mais rápida, a água clarificada drenada obtém o mesmo resultado. Na Tabela 16 estão apresentadas as medidas das alturas de camada de lodo atingidas para os quatro Testes. A 3ª coluna representa a altura de camada de lodo que teria no leito caso as válvulas de saída ficassem fechadas enquanto ocorresse a alimentação do leito, ou seja, sem drenagem instantânea. Como não é o caso da operação desta ETE, a redução de volume de lodo é significativa desde o início do descarte.

Como pode ser observado na Tabela 16, a redução de volume para $T1_{T1}$ foi de 40% no término da alimentação, enquanto que $T1_{T2}$, $T2_{T1}$ e $T2_{T2}$ reduziram 60% de volume, e após 1h do descarte, a redução foi acima de 70% para todos. Vale lembrar que durante o descarte dos Testes 1 e 2, obteve-se uma operação eficiente na floculação, e isto causou uma separação na camada de lodo no leito, ficando na camada inferior o sólido e na superior a água livre, conforme pode ser visualizado na Figura 25. Na Figura 26 está apresentada a camada de lodo após 1h do encerramento do $T1_{T1}$ e, é possível visualizar a marca quando o lodo atingiu a altura máxima conforme a indicação. Por outro lado, o lodo descartado durante todo o Teste 3 que não apresentou uma boa floculação, liberou menos água livre e, conseqüentemente menos volume de lodo drenado após o descarte, no caso

52% para o T3_{T1}. Na Figura 27 pode ser observado que não ocorreu uma separação eficiente de água livre e sólido do lodo desaguado do Teste 3.

Tabela 16 - Carga hidráulica: altura de camada de lodo.

Teste	Volume de lodo (m³)	Altura da camada de lodo (cm)			Redução de volume (%)		Altura após 1 dia (cm)	Redução de volume após 1 dia (%)
		Estimativa sem drenagem	Máxima atingida durante o enchimento	1h após o enchimento de lodo no leito	Após enchimento de lodo no leito	1h após o enchimento de lodo no leito		
T1 _{T1}	7,6	57	34	16	40	72	5	91
T1 _{T2}	15,2	113	45	34	60	70	10	89
T2 _{T1}	7,6	57	23	15	60	74	6	89
T2 _{T2}	15,2	113	44,5	25	60	78	12	89
T3 _{T1}	7,6	57	43	25	25	56	16	72
T3 _{T2}	12,4	92	43,5	35	52	62	26	77
T4 _{T1}	2,5	37	7	7	81	81	6	84
T4 _{T2}	5,0	74	11	10	85	87	8	89

O leito do teste T4_{T1} teve apenas metade da área do leito preenchida por lodo, ou seja, 6,72m² devido ao menor volume descartado. Por este motivo, a redução de volume após 1h do descarte foi a mesma durante a alimentação, toda a água já tinha sido drenada. O volume do T4_{T2} preencheu toda a área, mas ainda não o suficiente para que houvesse a formação de camada de água livre por cima da camada de lodo sólido, e por isso obteve apenas 3% a mais na redução após 1h do descarte.

Ao analisar o volume reduzido após 24 horas do descarte, com exceção do Teste 3 que obteve resultado inferior devido à má floculação do lodo, o percentual médio de redução de volume de lodo foi de 88,5%.



Figura 25 - Separação do lodo durante o descarte no Teste 1: por baixo camada sólida e água livre por cima.

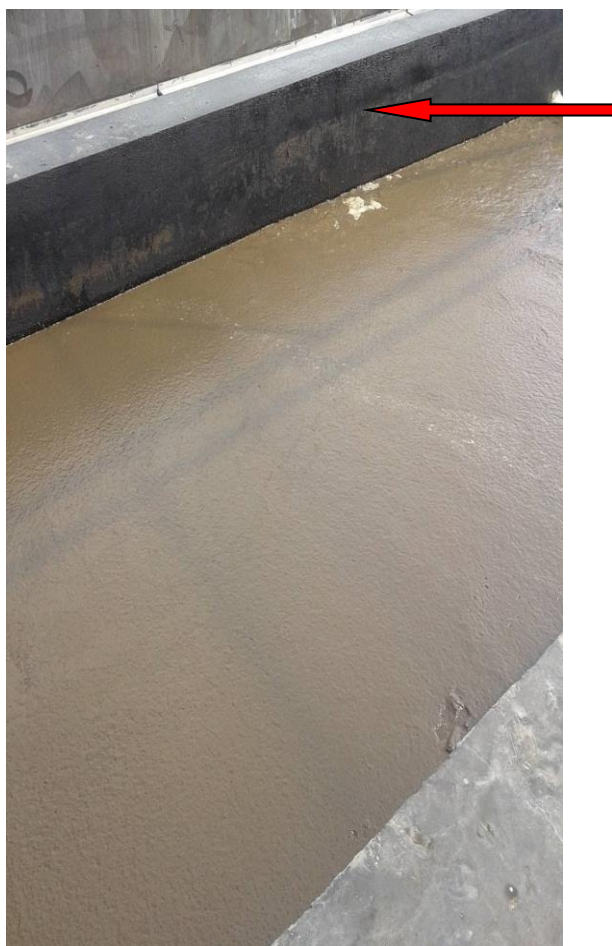


Figura 26 – Lodo no Teste 1 após 1h do descarte e a marca da altura de lodo atingida.



Figura 27 - Lodo desaguado mal flocculado no Teste 3, pouca liberação de água livre.

Para comparar o desaguamento de lodo aeróbio com outros tipos de leitos de secagem, será considerada uma duração do ciclo de descarte de 30 dias, ou seja, 12 ciclos por ano. Ao utilizar a TAS obtida no Teste 1, então tem-se uma carga de aplicação total de $42\text{kgST/m}^2\cdot\text{ano}$ para $T1_{T1}$ e $84\text{kgST/m}^2\cdot\text{ano}$ para $T1_{T2}$, e carga hidráulica inicial de 59cm e 113cm para $T1_{T1}$ e $T1_{T2}$, respectivamente.

Troesch *et al* (2009) observou que o leito de secagem com camada de filtração composto de areia e planta (*reed bed*), quando aplicado taxa de $36\text{kgST/m}^2\cdot\text{ano}$, 78% do volume é drenado dentro de 24 horas com uma taxa média de $1,4\text{L/min.m}^2$. Já em escala piloto, Troesch *et al* (2009) aplicou taxa de $26\text{kgST/m}^2\cdot\text{ano}$ e carga hidráulica de 30cm e notou que, 64% do volume de lodo foi drenado em 12 horas. O mesmo aconteceu em seu leito piloto com meio filtrante só de areia. No entanto, o desaguamento de lodo aeróbio em leito com piso de blocos drenantes foi mais rápido, mesmo com TAS e cargas hidráulicas mais altas.

Radaideh *et al* (2010) avaliou o desaguamento de 5L de lodo digerido por aeração estendida em uma área de $0,04\text{m}^2$ e obteve em 4 horas uma redução de 40% de volume em leitos de areia. Ao comparar o $T1_{T1}$ com o estudo de Radaideh *et al* (2010), pode-se dizer que um volume aplicado de $617,5\text{L/m}^2$ no leito com piso de blocos drenantes reduziu 70% do volume em 1 hora, contra 10% de redução para uma aplicação de 125L/m^2 no leito de areia. Como reportado pela USEPA (1987), até 75% do volume de lodo condicionado pode ser removido na fase de drenagem, que leva de 3 a 5 dias para ser completada. No caso dos Testes 1 e 2 a fase foi praticamente completada em 1 hora.

Ainda para avaliação da eficiência no desaguamento, durante o T1_{T1}, T1_{T2}, T2_{T1} e T2_{T2} foi medido a vazão de drenagem no tempo. Na Figura 28 e na Figura 29 estão apresentadas a variação de vazão de drenagem para o T1_{T1}, T1_{T2} e T2_{T1}, T2_{T2}, respectivamente.

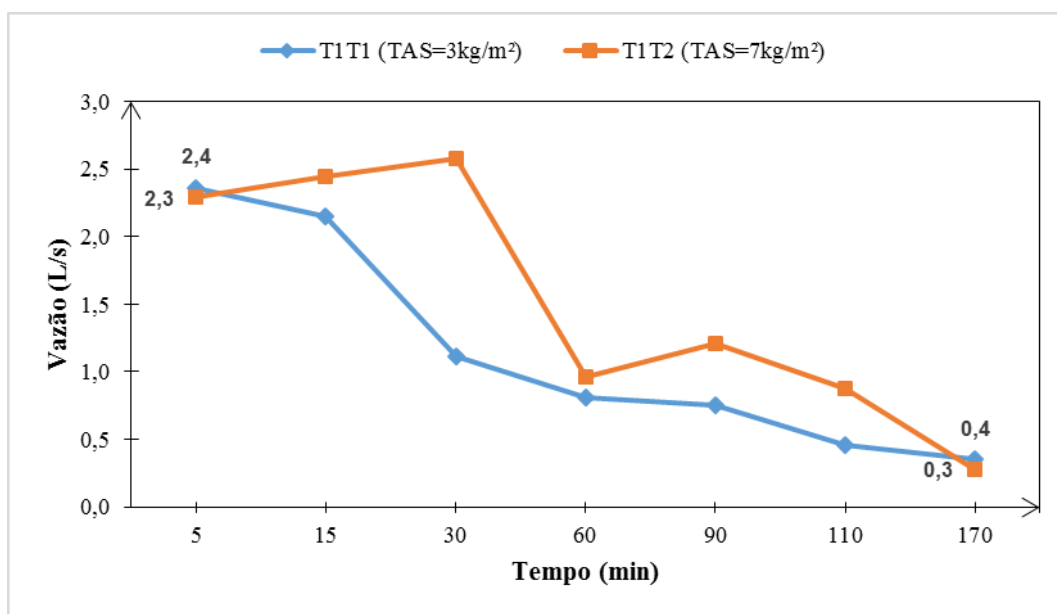


Figura 28 – Variação de vazão de drenagem no tempo para T1_{T1} e T1_{T2}.

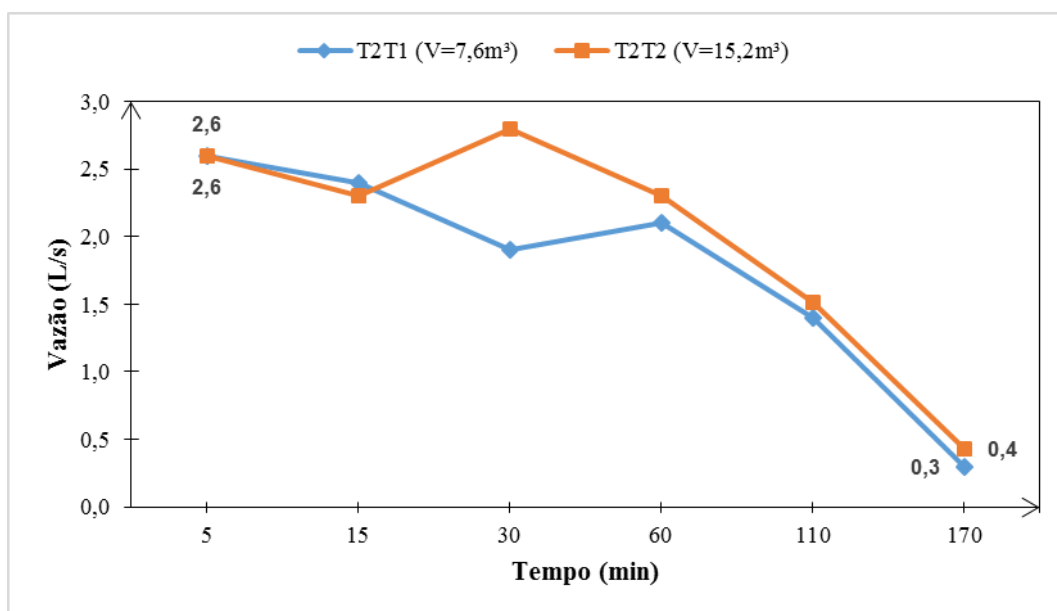


Figura 29 – Variação de vazão de drenagem no tempo para T2_{T1} e T2_{T2}.

Durante os primeiros 20min do Teste 1, o lodo se concentra próximo à entrada, em seguida a água empurra o lodo, o qual se espalha por toda área do leito. Após 30min, a área do leito é toda preenchida e a altura de camada do lodo começa a subir, mesmo com a drenagem ocorrendo. Nesta fase do desaguamento acontece dois processos de separação do

lodo, a sedimentação e a filtração. A parte sólida do lodo se deposita sob o bloco drenante, que serve também como uma camada de filtração da água que fica por cima, e com isso reduz a passagem de água pelas aberturas diminuindo a taxa de desaguamento. Como pode ser observada na Figura 28, nos primeiros 15min de alimentação do leito a vazão de drenagem se aproxima da vazão de entrada de lodo de $8,3\text{m}^3/\text{h}$ ($2,3\text{L/s}$), apresentando uma eficiência na remoção de água livre. A partir de 30min da alimentação, a vazão de drenagem do $T1_{T1}$ decresce, com todo leito preenchido por lodo.

Segundo Skinner *et al* (2015) a taxa de desaguamento ou permeabilidade pode ser determinada pela redução do tempo (t) *versus* o volume de água filtrada ao quadrado (V^2). Apesar de toda área do leito no $T1_{T2}$ também estar preenchida em 30min de descarte, ocorreu uma desuniformidade na camada de lodo formada embaixo, com camadas mais baixas de lodo sólido no final do leito, o qual não foi relacionado com nenhum fenômeno, provavelmente devido algum desnível do leito. Essa camada menor de lodo sólido, permitiu uma coluna d'água formada por cima mais alta, o que indica uma pressão de coluna d'água maior, e segundo Skinner *et al* (2015), o aumento de pressão causa um aumento no volume de filtração em menor tempo. Esta informação poderia ser analisada coletando o volume de água filtrada, que varia de forma quadrática com o tempo de filtração durante a fase de filtração ou formação de torta de lodo em pressão constante. A plotagem do decréscimo do t (tempo) x V^2 (volume drenado) é seguido por uma região logarítmica de primeira ordem, na qual a torta de lodo se comprime ou se torna uniforme na concentração de sólidos, chamada de fase de expressão, que permite determinar a extensão do desaguamento (SKINNER *et al*, 2015). O formato da curva da Figura 28 confirma a afirmação que a filtração de lodo de esgoto não é linear e a fase de filtração seguida pela fase de expressão representa 80% do tempo do processo de desaguamento. Após 1 hora do encerramento do descarte, a vazão de drenagem decresce ainda mais ao valor de $1,26\text{m}^3/\text{h}$ no leito do $T1_{T1}$ e $1,00\text{ m}^3/\text{h}$ no leito do $T1_{T2}$, pois grande parte do volume de água livre já havia sido drenada. Este resultado é devido ao condicionamento do lodo que permite a remoção de água mais rápida, principalmente no começo do ciclo de filtração (USEPA, 1987).

O teste $T2_{T1}$ e $T2_{T2}$ foi similar ao $T1_{T1}$ e $T1_{T2}$, como pode ser observado na Figura 29, pois todos tiveram uma boa operação de floculação do lodo. No início do descarte a vazão de drenagem se igualou a vazão de alimentação de lodo. Assim como no $T1_{T2}$, o $T2_{T2}$ obteve um aumento na drenagem em relação à vazão de entrada, o que sugere que a coluna de água formada acima da camada de lodo aumentou a pressão. Conforme o leito vai se

preenchendo, a camada de lodo inferior vai aumentando e a vazão de drenagem diminui, como previsto. Apesar da camada de água ser alta sob o lodo, ou seja, maior pressão, essa redução de drenagem é causada pela característica de compressibilidade do lodo (SKINNER *et al*, 2015).

Após 24h do descarte não foi medido a vazão de drenagem, no entanto foi observada uma vazão muita baixa, pois gerava apenas pingos d'água na saída do tubo de drenagem. Barroso (2007), a partir de várias pesquisas estabeleceu como fim da fase do desaguamento quando a vazão de saída atingir 0,04L/min.

Outra forma de avaliação da eficiência na etapa do desaguamento por métodos de filtração é análise da qualidade do drenado. Enquanto que a torta de lodo é analisada quanto ao teor de sólidos totais (%ST), o clarificado é analisado quanto a sólidos em suspensão (SST) e turbidez, que é a redução de transparência devido a materiais em suspensão. Ademais, a partir do SST e volume drenado da parte líquida do lodo é possível encontrar a eficiência de captura de sólidos do meio filtrante do leito, porém não foi possível realizar, pois como se tratava de uma escala real, torna-se dificultoso a coleta do volume total drenado.

A coleta e análise de turbidez e SST foi realizada apenas para o T2_{T1} devido a disponibilidade de uso dos equipamentos e itens necessários no momento do ensaio, cujos resultados encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 - Qualidade do drenado T2_{T1}.

Tempo de drenagem (min)	Turbidez (NTU)	SST (mg/L)
5	7,37	15
15	4,84	5,5
30	4,24	5,5

Almeida (2012) encontrou valores de 40 e 60 mg/L SST no drenado de lodo aeróbio condicionado com polímero em seus testes pilotos com blocos drenantes, e a eficiência de captura de sólidos apresentou em média 95%, valor igual aos encontrados para equipamentos mecânicos como centrífugas e filtro prensa. Troesch *et al* (2009) analisou o desaguamento e secagem em leitos de planta (*reed bed*), coletou o clarificado após a drenagem e encontrou 8,5mg/L de SST. Estes valores satisfatórios são possíveis em centrífugas e no leito com piso de blocos drenantes principalmente ao fato do uso de condicionantes para uma boa floculação do lodo.

Santos *et al* (2014) utilizou um piloto de leito de drenagem constituído de brita e manta geotêxtil para avaliar a drenagem e secagem de lodo proveniente ETA com concentração de 1,7% ST. Foi coletado e analisado a turbidez nos tempos de 15, 30, 45 e 90min de tempo drenado. Para uma TAS de 3,5kg/m², a mesma utilizado no T1_{T1}, a variação da turbidez para os 3 tipos de mantas testadas no tempo de 15min foi de 80 a 100 NTU, e no tempo de 30min caiu de forma significativa com valores abaixo de 5 NTU, relacionado à obstrução dos poros da manta segundo os autores, e consequentemente uma aproximação em termos de permissividade e fluxo de água.

5.1.3 ***Desaguamento: fase de secagem do lodo***

Um dia após o descarte é caracterizado como fim da fase de drenagem do desaguamento e o início da fase de secagem de lodo. Nos Testes 1, 2 e 4 não foram registradas as vazões de saída do drenado no dia seguinte porque já não se notava saída de água de forma significativa pelo tubo de drenagem, com exceção do Teste 3 que teve problema com a floculação, o qual ainda ocorreu drenagem após 24h. Contudo, foi considerada a altura de camada de lodo atingida um dia depois do descarte como sendo a camada inicial da fase de secagem. Segundo Mortara (2011) quanto maior a TAS, maior a espessura da camada após a drenagem, e consequentemente maior dificuldade na perda de umidade. Além disso, o melhor modelo matemático para dimensionamento de leitos de secagem considera a altura de camada inicial de lodo e o percentual de água drenada determinantes no processo de secagem (SAMUDIO *apud* MORTARA, 2011).

Como pôde ser observado anteriormente na Tabela 16 foram obtidas diferentes alturas de camada de lodo. Para o Teste 1 e 2 os quais obtiveram maior eficiência em redução de volume (de 89 a 91%), a camada inicial de lodo foram aproximados, sendo 5 e 6cm para T1_{T1} e T2_{T1}, respectivamente, e 10 e 12cm para T2_{T1} e T2_{T2}, respectivamente. Com menos volume drenado durante T3_{T1} e T3_{T2} a camada inicial de lodo foi bem mais alta, 16 e 26cm, respectivamente, mesmo com o fato do T3_{T2} ter sido aplicado menor volume de lodo no leito (12,4m³) comparado ao T1_{T2} e T2_{T2} (15,2m³). Já os testes T4_{T1} e T4_{T2} tiveram camadas de lodo de 6 e 8cm, respectivamente, devido ao menor volume de lodo descartado, 2,5 e 5,0 m³, respectivamente.

Na Figura 30 está apresentado a curva de secagem de lodo do T1_{T1} e T1_{T2}. Na operação deste teste não foi realizado revolvimento do lodo, o que justifica a observação de uma secagem mais rápida na camada superior do lodo e umidade maior na camada

inferior. Para efeito de análise a amostra coletada era homogeneizada, porém nunca em proporções iguais de lodo mais seco e lodo mais úmido. Este procedimento pode explicar o fato do teor de sólidos no T1_{T1} e T1_{T2} não ter um aumento contínuo, como por exemplo, do 14º dia de secagem para o dia 16º no leito T1_{T1}, onde deveria se observar um aumento do teor de sólido, houve redução, sem ter ocorrido adição de água.

Como pode ser observado na Figura 30, até o 4º dia de secagem o teor de ST para o T1_{T1} e T1_{T2} foi similar, entre 6 e 7%. A partir da segunda semana, 9 dias após o descarte, há uma mudança no perfil da secagem, uma tendência de secagem mais rápida no T1_{T1} com menos lodo aplicado. Por meio da Figura 30, é possível observar que durante os 15 primeiros dias, a redução de umidade é mais lenta e houve pouca diferença entre o T1_{T1} e T1_{T2}, ambos apresentaram em torno de 12% ST. A partir do 20º dia o lodo perde umidade com uma velocidade maior e a diferença de teor de ST entre os leitos também aumenta. O lodo do leito T1_{T1} atingiu teor de umidade de 95,3% com 36 dias de secagem, enquanto que no mesmo período o lodo do T1_{T2} obteve teor de sólidos de 60,3%.

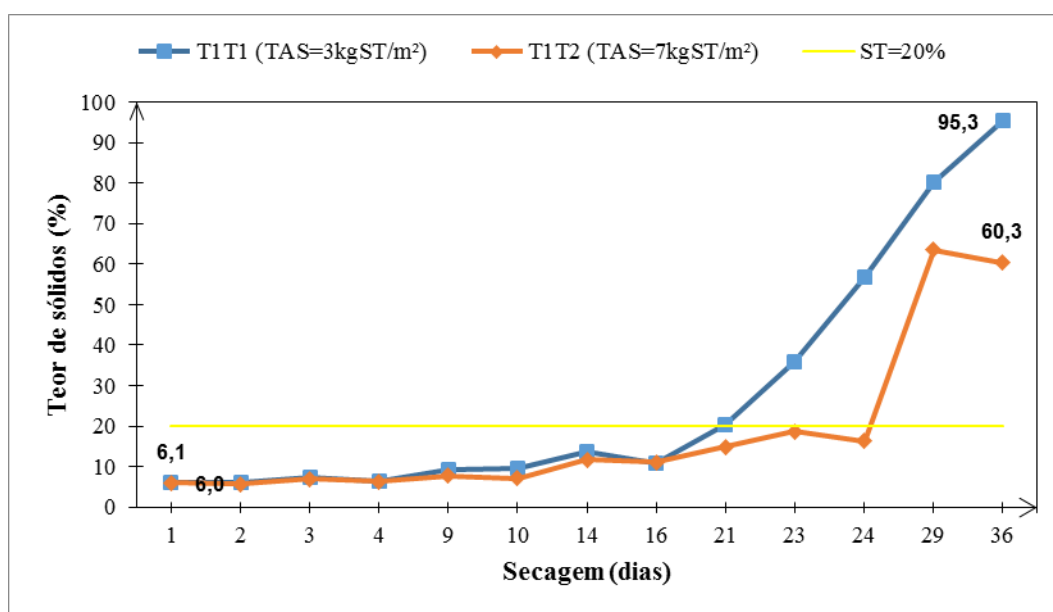


Figura 30 - Curva de secagem de lodo Teste 1, sem revolvimento e problemas operacionais, estação de outono na região do interior de São Paulo.

A curva de secagem para o T2_{T1} e T2_{T2}, com revolvimento está apresentada na Figura 31. Como pode ser observado, o T2_{T1} e T2_{T2} apresentou uma curva semelhante ao T1_{T1} e T1_{T2} até 27 dias de secagem. Com 6 dias de secagem, as duas taxas aplicadas tiveram praticamente o mesmo teor de ST, partindo de 5 até 9%. A partir do 7º dia, inclusive quando ocorreu o primeiro revolvimento, as curvas de cada leito começaram a se distanciar. Mais uma vez, até os 15 primeiros dias tanto o T2_{T1} quanto T2_{T2} apresentou

aproximadamente 12% ST, e a secagem para ambos os leitos foram baixas, mesmo com o revolvimento, e após o 20º dia a velocidade de secagem aumenta, assim como a diferença entre o teor de ST.

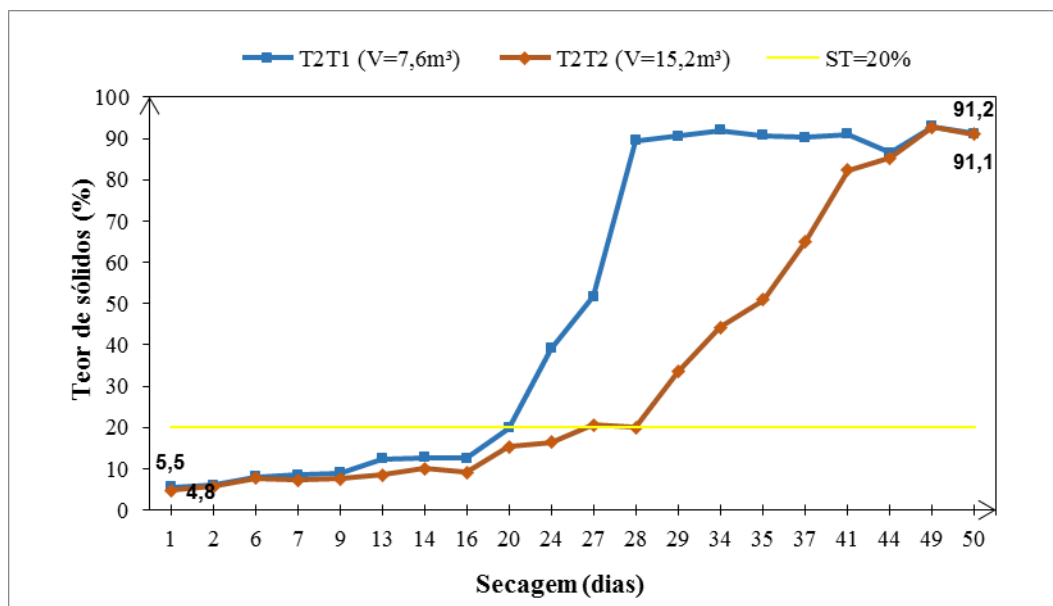


Figura 31 - Curva de secagem de lodo Teste 2, com revolvimento, sem problemas operacionais, estação de inverno na região do interior de São Paulo.

Como durante o T2_{T1} e T2_{T2} o período de secagem foi maior, foi possível notar quando o lodo atinge sua umidade de equilíbrio. Neste período de secagem o lodo do T2_{T1} atingiu teor de sólidos em torno de 90 – 91% a partir do 28º dia de secagem e estabilizou como pode ser observado na Figura 31, mantendo-se constante até o 41º dia. Entre os dias 41º e 44º ocorreu precipitação, ou seja, a umidade relativa do ar aumentou, e com isso aumentou também o teor de umidade do lodo. De acordo com David (2012), um material muito seco, com teor de umidade superior àquele correspondente à sua umidade de equilíbrio, ao ser exposto às condições ambientais pode absorver a umidade do ar. Após o período de chuva o lodo voltou para 91% de ST. O lodo do T2_{T2} atingiu sua umidade de equilíbrio com 48 dias.

Na Figura 32 está apresentada a curva de secagem para o Teste 3. Como mencionado anteriormente, devido à má floculação o percentual de redução de volume do lodo durante a drenagem foi menor para T3_{T1} e T3_{T2}, ou seja, pior desempenho comparado aos demais testes e consequentemente um pior rendimento no tempo de secagem.

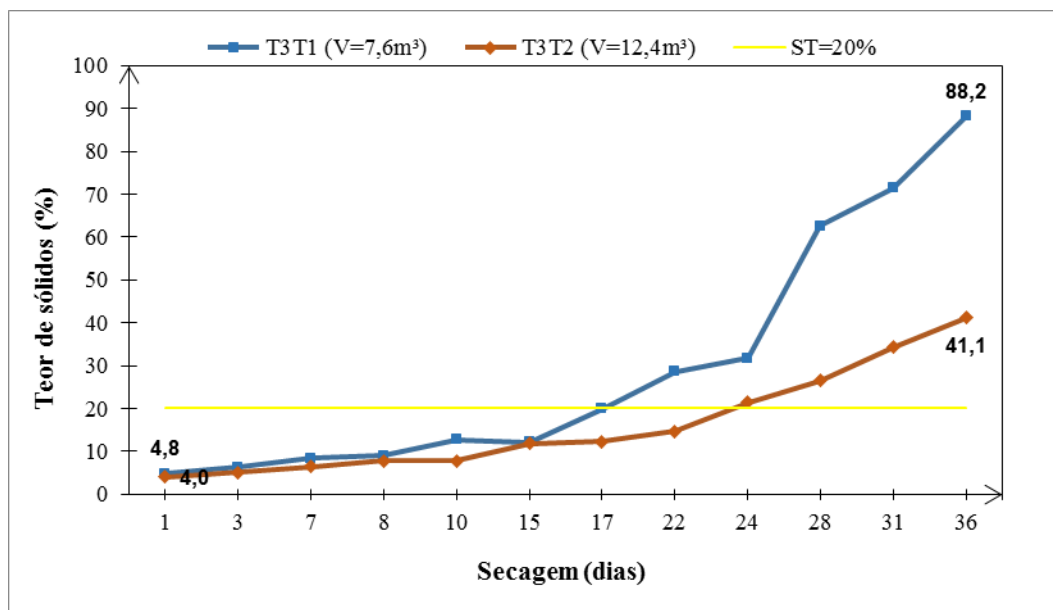


Figura 32 - Curva de secagem de lodo Teste 3, com revolvimento e problemas operacionais, estação da primavera na região do interior de São Paulo.

No dia seguinte, o lodo apresentou menor %ST comparado ao Teste 1 e 2, atingindo o valor de 6% só três dias depois, ou seja, pode ser considerado que a drenagem encerrou somente após 3 dias. A partir daí as curvas para o lodo T3_{T1} e T3_{T2} seguiu como o comportamento apresentado nos Testes 1 e 2. Após 15 dias atingiram a mesma concentração do Teste 1 e 2 em torno de 12%, porém com 3 dias de secagem a menos se considerar o teor de sólidos inicial de 6%. Isto pode ter ocorrido devido às condições climatológicas, temperaturas mais altas e umidades mais baixas, as quais serão apresentadas no Item 5.1.4. A partir do 15º dia a curva de secagem do T3_{T1}, leito com menos lodo, também começou a distanciar do T3_{T2}. No entanto, com o mesmo tempo de duração do Teste 1, 36 dias de secagem, o lodo T3_{T1} atingiu 88,2% ST, enquanto o T1_{T1} atingiu 95,3% ST e, o T3_{T2} alcançou 41,1% ST contra os 60,3% ST do T1_{T2}. Isto pode ser explicado pelo fato das alturas de camadas iniciais de lodo do Teste 3 ter sido mais altas. O leito T1_{T1} e T1_{T2} iniciou o período de secagem com camadas de 5 e 10cm respectivamente, contra 16 e 26cm para o T3_{T1} e T3_{T2}, respectivamente.

Na Figura 33 está apresentado a curva de secagem para o Teste 4. Como foi descartado volumes menores, era esperado que os tempos de secagem para os lodos T4_{T1} e T4_{T2} fossem mais curtos para atingir alto %ST.

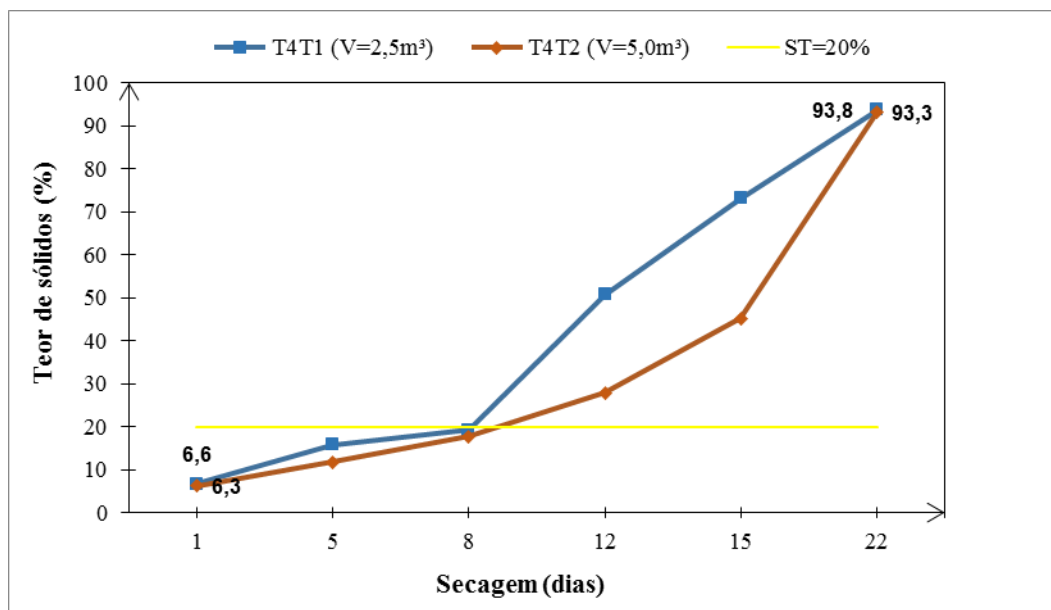


Figura 33 - Curva de secagem de lodo Teste 4, sem revolvimento e com problemas operacionais, estação do verão na região do interior de São Paulo.

O lodo do T4_{T1} e T4_{T2} após um dia do descarte também apresentou em torno de 6% ST. Os formatos das curvas também foram similares aos demais testes, com exceção da secagem ter sido em menos tempo. Nos testes anteriores demorava-se em torno de 15 dias para atingir 12% ST, durante o Teste 4 ocorreu em menos de 5 dias para o T4_{T1} e 5 dias para o T4_{T2}. Até o 8º dia de secagem as curvas T4_{T1} e T4_{T2} estavam na mesma velocidade de secagem e a partir deste dia, houve aceleração mais uma vez na velocidade de secagem no leito com menos lodo aplicado, o T4_{T1}. Outra diferença apresentada em relação aos demais testes realizados, é que os dois lodos T4_{T1} e T4_{T2} atingiram teor de sólidos acima de 93% praticamente ao mesmo tempo. Isto pode ser explicado devido ao fato de terem alturas de camadas iniciais de lodo próximas, 6 e 8cm respectivamente.

É possível afirmar que a condição climática também favoreceu a secagem de T4_{T1} ao comparar com T2_{T1}, pois os dois iniciaram com 6cm de altura de camada de lodo, no entanto T2_{T1} aconteceu no inverno e T4_{T1} no verão. Na Figura 34 está apresentada a comparação com as duas curvas de secagem. Como pode ser observado na Figura 34 o T4_{T1} atingiu 20%ST com menos da metade do tempo que o T2_{T1}, mesmo sendo o mesmo tipo de lodo e altura inicial de camada de lodo na etapa de secagem. Isto pode ser explicado devido às condições climáticas mais favoráveis durante o período de secagem do T4_{T1}. O T2_{T1} ocorreu na estação de inverno e o T4_{T1} ocorreu durante o verão. Mais informações sobre as condições climáticas dos testes estão apresentadas no item 5.1.4.

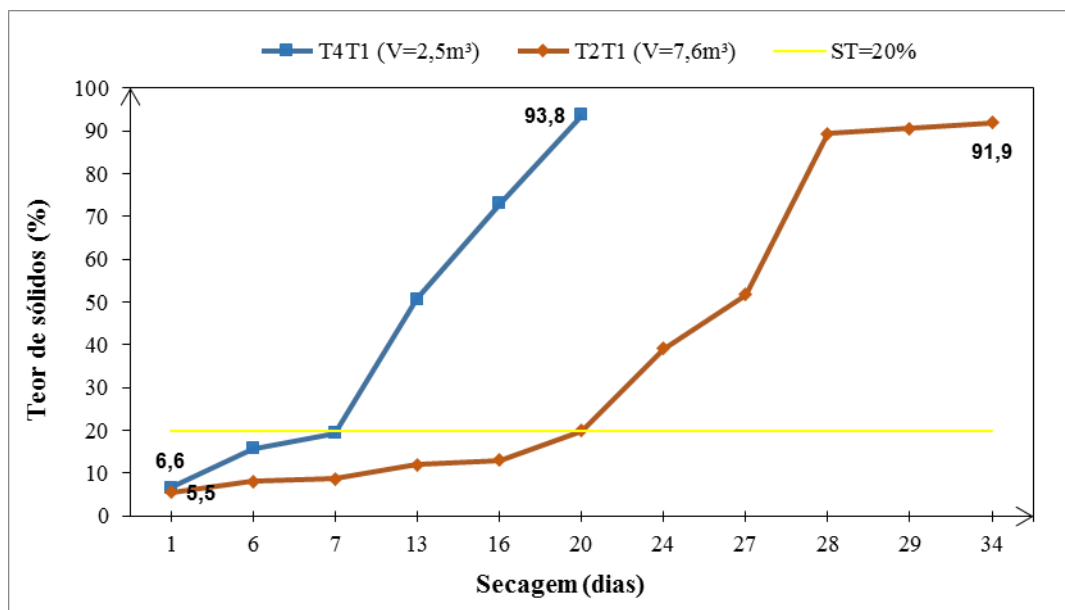


Figura 34 - Comparação da secagem de lodo para altura inicial de 6cm de camada de lodo.

Para comparação com outros tipos de leitos, durante o ciclo de operação de desaguamento de lodo aeróbio em escala real no leito de plantas (*reed bed*) utilizado por Troesch *et al* (2009), o lodo atingiu no dia seguinte ao descarte $8\pm 4\%$ de ST na camada superior do lodo. Após o final do ciclo de alimentação/secagem no total de 16 semanas, o lodo atingiu 30% de ST no verão, enquanto no inverno atingiu a 17%. O T2T1 que teve o ciclo máximo de 50 dias na época mais crítica, no inverno, durou 7 semanas e atingiu maior %ST do que o encontrado por Troesch *et al* (2010), acima de 90% ST. No entanto, isso não se deve apenas ao tipo de meio filtrante do leito, mas também pelas condições climáticas do inverno no Brasil e Turquia serem diferentes. Enquanto Brasil possui clima tropical, a Turquia apresenta clima do tipo temperado.

Mathioudakis (2009) aplicou uma camada de 20 a 25cm de lodo aeróbio a 85% de umidade em planta de secagem solar e reduziu para 6% de umidade em 12 dias no verão. No outono, as temperaturas chegaram até 2°C e a redução foi para 10% de umidade em 32 dias, mas vale ressaltar que a secagem iniciou com 15% de ST. Salihoglu *et al* (2007) aplicou lodo aeróbio após desaguamento mecânico em filtro de esteira e iniciou a secagem de lodo a 20% ST com camada de 25cm, o qual atingiu 35% de ST em 15 dias no verão e em 30 dias no inverno da Turquia.

Até os 15 primeiros dias de secagem o teor de sólidos para os testes T1T1, T1T2, T2T1, T2T2, T3T1, e T3T2 foram próximas, em torno de 12%, o que indica que neste período, com umidade do lodo alta, a secagem em leito com piso de blocos drenantes independe da altura de camada de lodo ou TAS, da baixa variação na temperatura e da ação do

revolvimento. A partir do 20º dia o lodo com menor TAS, T1_{T1} (20% ST) e T2_{T1} (20% ST), têm vantagem na secagem em relação ao T1_{T2} (16% ST) e T2_{T2} (15% ST). O mesmo aconteceu no Teste 3 e 4, porém em menos tempo, 17 dias para o Teste 3 que pode estar relacionado às condições climáticas mais favoráveis para a secagem, e 8 dias para o Teste 4 que além das condições mais favoráveis da estação verão, o volume e altura de camada de lodo foram mais baixos.

Ao analisar as curvas ainda é possível observar que após o lodo atingir 20% ST sua secagem acelera, aumentando a curva exponencialmente. Por exemplo, o T1_{T1} e T2_{T1} demoraram 20 dias para aumentar de 6% para 20% ST, e depois aproximadamente 10 dias para aumentar de 20% para 90% ST.

Se relacionar períodos ao invés de dias, nota-se que os 4 Testes passaram por duas fases de secagem. Na Tabela 18 está apresentada uma análise das velocidades de secagem. A partir dos dados é possível afirmar que a segunda fase de secagem possui maior velocidade e aceleração de secagem do que a primeira, sendo que a primeira fase é mais longa que a segunda. Para os leitos T1_{T1}, T2_{T1}, e T3_{T1} que obtiveram o mesmo volume de lodo, só o T1_{T1} e T2_{T1} tiveram velocidade de secagem semelhante, independente das condições climáticas e da ação do revolvimento. O fato que justifica uma velocidade maior para T3_{T1} é que o tempo para atingir 20%ST na 1ª fase foi menor, 17 dias contra 20 dias para os outros dois Testes, porém com acelerações praticamente iguais. Já nos leitos T1_{T2}, T2_{T2} e T3_{T2} as velocidades para a primeira fase ficaram próximas, mesmo para o T3_{T2} que teve menor volume descartado, mas em contrapartida teve maior altura de camada de lodo. Para os 3 primeiros Testes percebe-se que para um mesmo tipo de lodo a primeira fase de secagem é independente do volume e altura de camada de lodo, e dependente do tipo e da umidade inicial do lodo, pois todos tiveram valores próximos. Mas ao analisar os testes T4_{T1} e T4_{T2}, que iniciaram a secagem com o mesmo teor de umidade em torno de 94%, a primeira fase de secagem é dependente também das condições climáticas, pois o Teste 4 ocorreu em janeiro, época de temperaturas mais altas e maior radiação solar. Para a 2ª fase de secagem a variação de velocidade é maior, não sendo possível relacionar no primeiro momento o que mais influencia.

Tabela 18 - Velocidade e aceleração de secagem.

Teste	Leito	Volume Descartado (m ³)	Altura de camada inicial da etapa de secagem (cm)	Período de secagem			
				1º- 20º dia		A partir do 21º dia	
				V ₁ (aumento %ST/d)	a ₁ (aumento %ST/d ²)	V ₂ (aumento %ST/d)	a ₂ (aumento %ST/d ²)
1	T1T1	7,6	5	0,70	0,04	4,70	0,25
	T1T2	15,2	10	0,45	0,02	2,80	0,15
2	T2T1	7,6	6	0,75	0,04	7,00	0,60
	T2T2	15,2	12	0,55	0,03	1,83	0,13
3	T3T1	7,6	16	1,13	0,05	4,20	0,22
	T3T2	12,4	26	0,51	0,02	1,90	0,10
4	T2T2	2,5	6	1,80	0,25	5,30	0,25
	T2T2	5	8	1,60	0,22	5,40	0,27

Para comparar com os descartes realizados é possível representar o modelo da curva de secagem da Figura 8 para o Teste 1, o qual foi medido o teor inicial de sólidos. Considerando uma densidade de lodo de 1000kg/m³ e o teor de sólido de 0,6%, a quantidade em massa de sólido do T1T₁ foi de 45,6kg e para T1T₂ foi de 91,2kg. Utilizando os valores de umidade da Figura 30 e aplicando a Equação 9, obtêm-se a cinética de secagem, as quais estão apresentadas na Figura 35 e na Figura 36.

Como pode ser observada, a fase de adaptação AB da Figura 8, seguida da fase constante, a qual mantém o fluxo de evaporação constante não existe nas curvas da Figura 35 e Figura 36, porque essa umidade já tinha sido removida em etapa anterior, na drenagem. Para as mesmas condições de secagem, a duração desse período de fase constante é afetada pela origem do lodo (LÉONARD *apud* BENNAMOUN, 2012). Aplicar o revolvimento também pode afetar a duração dessa fase. Conforme já mencionado (PERRY *apud* DAVID, 2012), a velocidade de secagem no período constante independe do mecanismo interno de fluxo do líquido através dos sólidos e, depende de três fatores externos: coeficiente de transferência de calor e massa, área da superfície exposta ao meio de secagem, diferença de temperatura e umidade entre o meio de secagem e a superfície úmida do sólido. De acordo com Metcalf & Eddy (2014) a fase de secagem constante seria o de maior duração caso também ocorresse por secagem térmica, pois se equivale ao volume removido na fase de drenagem, cuja a maior parte de água é removida nessa fase. De fato, os testes confirmam a maior redução de volume d'água nessa fase de drenagem, em torno de 90%.

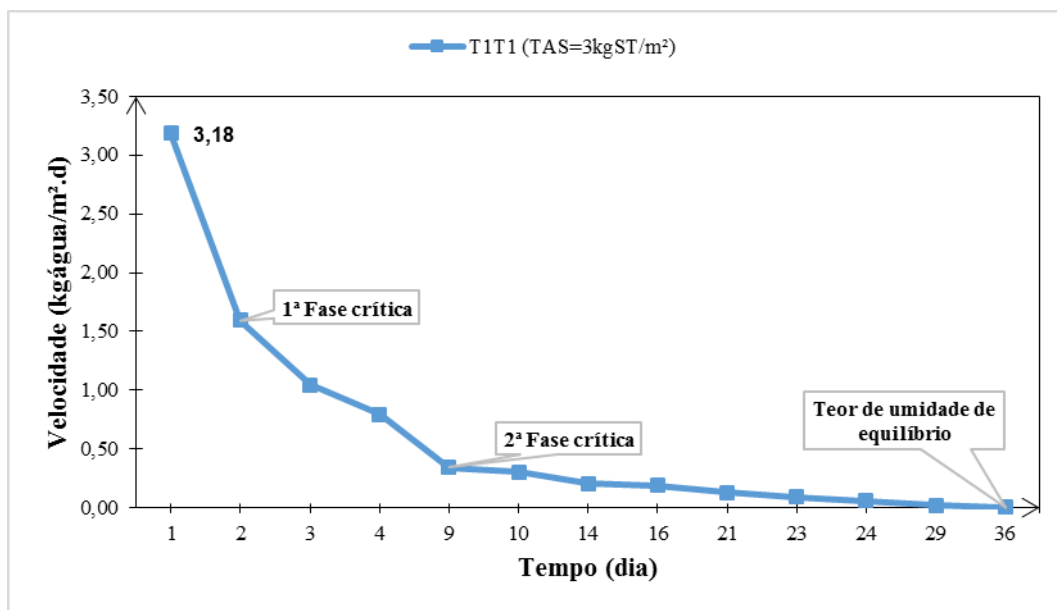


Figura 35 - Curva de velocidade de secagem T1T1.

A fase de secagem com taxa decrescente ocorre quando a maior parte da água livre foi removida e a taxa de secagem começa a ser controlada pela difusão da água presente no interior das partículas de lodo para a superfície. No caso do presente teste, essa fase iniciou a partir de 24h do descarte. O fluxo de evaporação parte do máximo valor a zero, onde se aproxima do teor de umidade de equilíbrio com o meio secante. O teor de umidade no período de transição entre a fase de taxa constante e taxa decrescente é chamada de teor de umidade crítica (METCALF; EDDY, 2014). O lodo descartado apresentou umidade crítica em torno de 94% (6%ST) para os quatro Testes.

O primeiro trecho da fase de secagem com taxa decrescente é reto e o ponto que liga ao segundo trecho decrescente é a primeira fase crítica, chamado de estado funicular. A umidade do lodo atingida no final desta fase para os quatro Testes foi de aproximadamente 80%, em 48h de secagem conforme estão apresentados na Figura 35 e Figura 36.

Com a continuidade do processo, a secagem atinge o estado pendular, que é quando ocorre a segunda fase crítica. A velocidade de secagem no estado pendular é independente da velocidade do ar e a temperatura tende a aproximar-se a temperatura do ar de secagem.

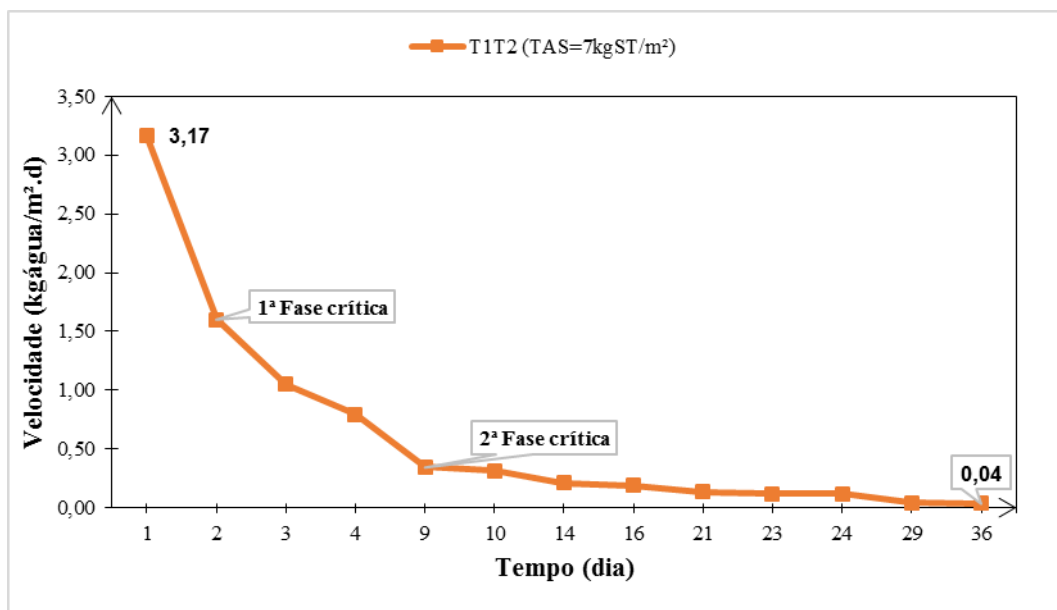


Figura 36 - Curva de velocidade de secagem T1T2.

Conforme as explicações dos autores citados (PERRY; FOUST *apud* DAVID, 2012; BENNAMOUN, 2012) e a ilustração da Figura 35, Figura 36, bem como da Figura 31, Figura 32 e Figura 33, que representam os Testes 2, 3 e 4 em outras estações do ano, é possível relacionar que para a primeira fase de taxa decrescente, a velocidade de secagem depende do tipo de lodo, pois os 3 testes com volumes aproximados obtiveram curvas e velocidade de secagem semelhantes como apresentado na Tabela 18. Já durante a segunda fase de taxa decrescente as condições externas, principalmente as condições climáticas, são mais significantes, uma vez que foi nesta fase que para o mesmo tipo de lodo obteve-se diferentes velocidades de secagem.

Outra observação a partir dos dados é que para o mesmo tipo de lodo a umidade de equilíbrio, conseqüentemente a umidade máxima que o lodo atinge no período de secagem, depende principalmente da umidade relativa do ar. Foi o que aconteceu com o T1T1 que atingiu teor de sólidos em torno de 95% quando a velocidade de secagem chegou a 0 kg água/m².h e o T2T1 atingiu 91%. Nos demais testes não foi possível afirmar que o lodo chegou ao seu teor de umidade de equilíbrio, no entanto todos atingiram altos valores de ST, de 60-95%. Estes valores dificilmente são obtidos por outros métodos de desaguamento, apenas por secadores térmicos mecânicos (METCALF; EDDY, 2014; VON SPERLING *et al*, 2007b).

Quanto ao aspecto do lodo, durante os quatro Testes foi possível observar os dois fenômenos que acontecem durante o processo de secagem, rachadura e o encolhimento do lodo, os quais estão mostrados na Figura 37 e Figura 38.



Figura 37 - Aspecto do lodo do T1_{T1} com 9 dias de secagem: fenômeno rachadura.



Figura 38 - Lodo do T4_{T1} com 10 dias de secagem: fenômeno encolhimento.

5.1.4 *Condições climáticas*

Foram quatro acompanhamentos de operação de descarte de lodo em escala real, cada um em uma estação climática do ano: Teste 1 (outono), Teste 2 (inverno), Teste 3 (primavera) e Teste 4 (verão). No Brasil, por ser um país caracterizado como tropical,

possui uma temperatura média do ar em todos os meses do ano superior a 18°C, não tem estação invernal e tem precipitação anual superior à evapotranspiração potencial anual. Na Tabela 19 estão apresentados os resultados médio, máximo e mínimo para a temperatura dentro do leito durante os quatro Testes. No Anexo I está apresentado as anotações de temperatura e umidade dentro do leito acompanhado diariamente nos testes e os resultados obtidos através do *site* INMET (2016).

Tabela 19 - Temperatura interna média, máxima e mínima.

Teste	Estação do ano	Duração (dias)	Média (°C)	Máxima (°C)	Mínima (°C)
1	outono	36	28,5	39,9	23,4
2	inverno	50	29,2	35,6	16,4
3	primavera	36	34,9	43,4	21,6
4	verão	22	42,0	47,5	35,3

Na Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42 estão ilustradas os dados de temperatura ambiente para os períodos do Teste 1, 2, 3 e 4, respectivamente. É possível observar que a temperatura ficou mais alta dentro do leito ao comparar com os registros das temperaturas da estação meteorológica automática A713 (INMET, 2016). Por exemplo, a média da temperatura durante o Teste 1 foi de 28,5°C e ao analisar o gráfico da Figura 39, nota-se que apenas dois dias aconteceram picos de quase 30°C. Em geral a média da temperatura interna obteve 8°C a mais que a externa. Isto foi possível devido ao uso cobertura transparente tipo estufa que aumenta a temperatura em relação ao ambiente externo.

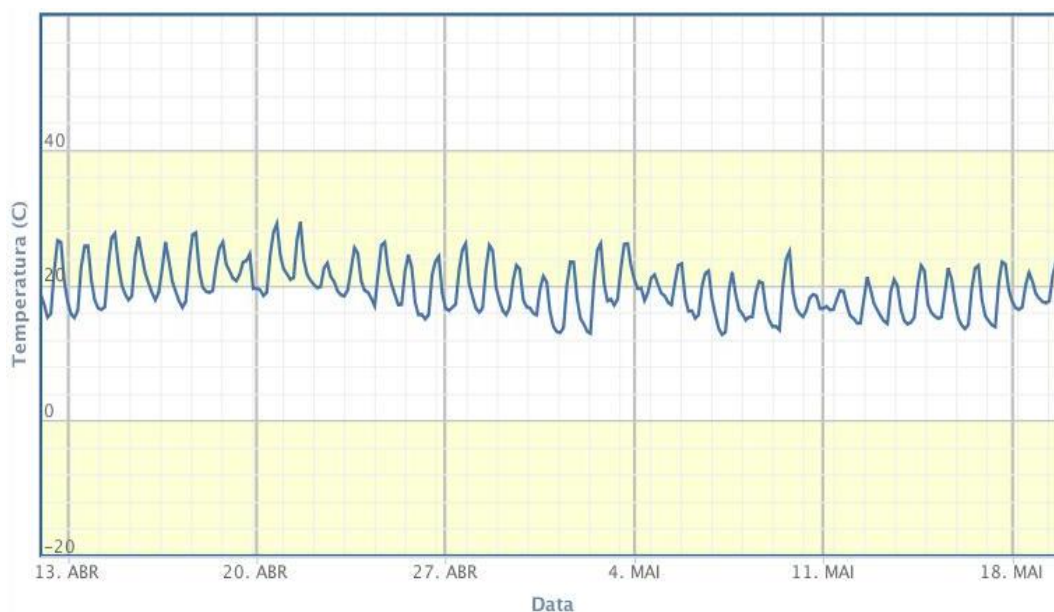


Figura 39 - Temperatura diária durante o Teste 1.

(Fonte: INMET, 2016)

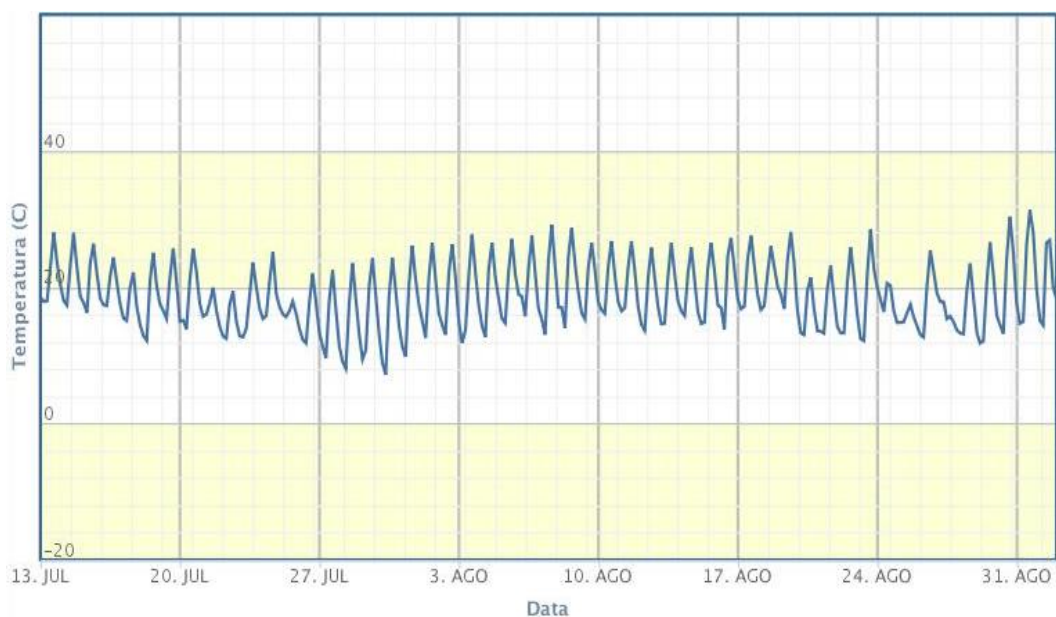


Figura 40 - Temperatura média diária durante Teste 2.
(Fonte: INMET, 2016)

Para os Testes 3 e 4, primavera e verão respectivamente, a temperatura média máxima dentro do leito passaram de 40°C, enquanto que a temperatura ambiente diária registrada pela estação A713 não chegou perto de 40°C em nenhum dia durante o período analisado, conforme está ilustrado na Figura 41 e Figura 42.

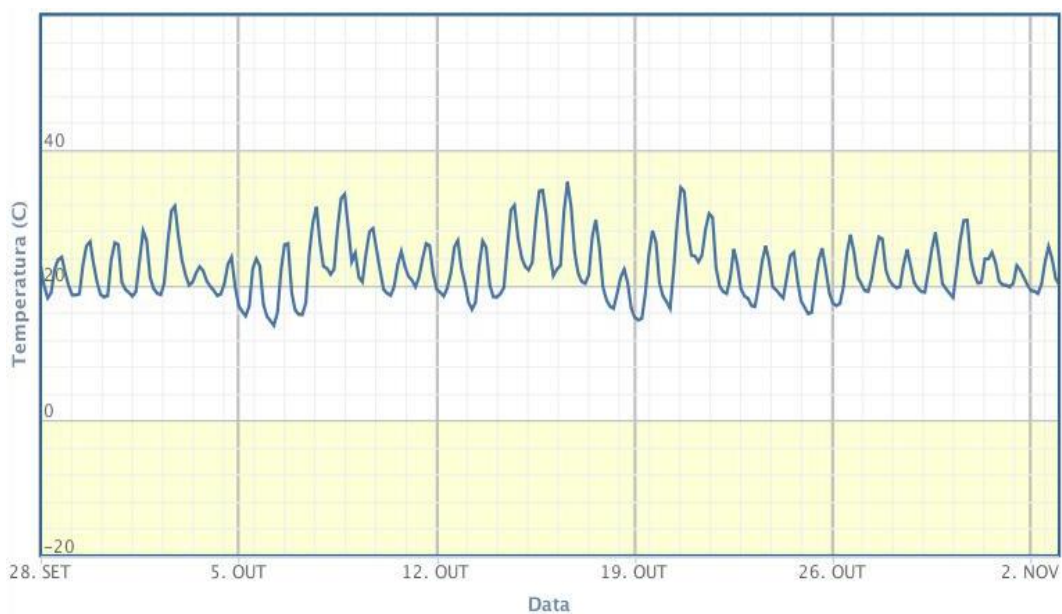


Figura 41 - Temperatura média diária durante Teste 3.
(Fonte: INMET, 2016)

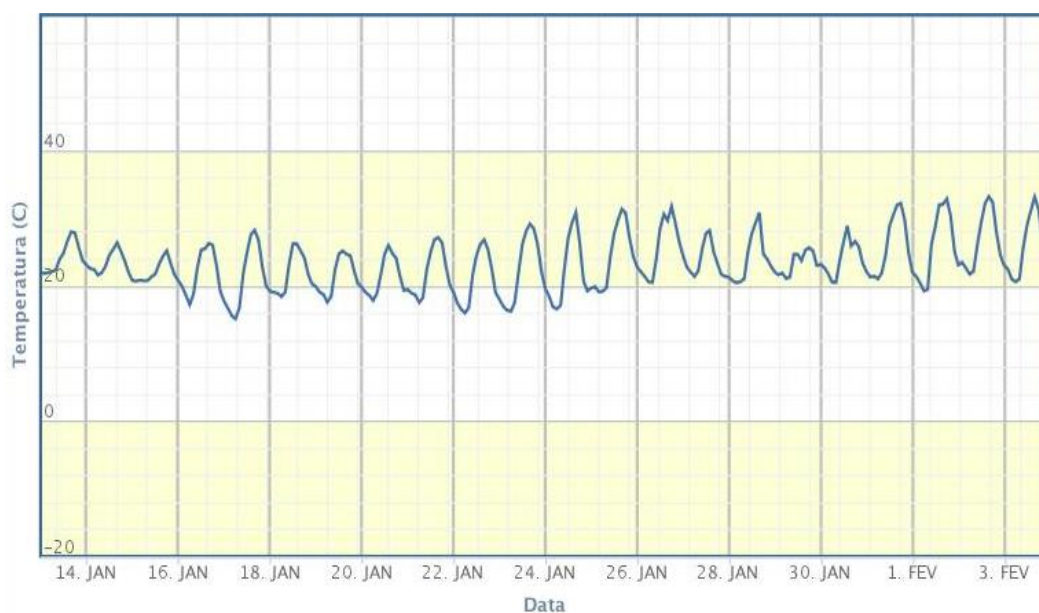


Figura 42 - Temperatura média diária durante o Teste 4.
(Fonte: INMET, 2016)

Comparini (2001) foi um dos primeiros a desenvolver um estudo com secagem de lodo utilizando estufa agrícola na ETE de Franca/SP. A pesquisa aconteceu em três ciclos para abranger diferentes climas do ano e a utilização da estufa mostrou-se eficiente apresentando temperaturas do meio interno sempre superior ao meio externo. Salihoglu *apud* Souza (2012) desenvolveu uma planta na ETE de Bursa na Turquia com cobertura tipo estufa o qual permitiu gerar uma diferença média entre a temperatura interna e externa de 11% a mais.

Na Tabela 20 estão apresentados os resultados médio, máximo e mínimo para umidade interna do leito. Ocorreram dias que o termo-higrômetro registrou umidade de 0% nos Testes 3 e 4, estes valores foram desprezados. Assim como a temperatura, a umidade interna do leito também foi diferente devido ao efeito estufa da cobertura plástica transparente, em média 12% a menos que a umidade relativa do ar externa. A Figura 43, Figura 44, Figura 45 e Figura 46 ilustram a umidade registrada pela estação A713 durante os Testes 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Segundo Andreoli *et al* (2001) a elevação da temperatura e consequentemente aumento da evaporação resultam no aumento da umidade relativa, que pode ser reduzida com a renovação do ar deixando as cortinas laterais da estufa abertas. Andreoli *et al* (2001) encontrou diferença de umidade interna de aproximadamente 10% a menos que a umidade externa.

Tabela 20 - Umidade interna média, máxima e mínima.

Teste	Estação do ano	Duração (dias)	Média (°C)	Máxima (°C)	Mínima (°C)
1	outono	36	57	85	23
2	inverno	50	41	100	23
3	primavera	36	42	100	20
4	verão	22	32	48	25



Figura 43 - Umidade média diária durante o Teste 1.
(Fonte: INMET, 2016)

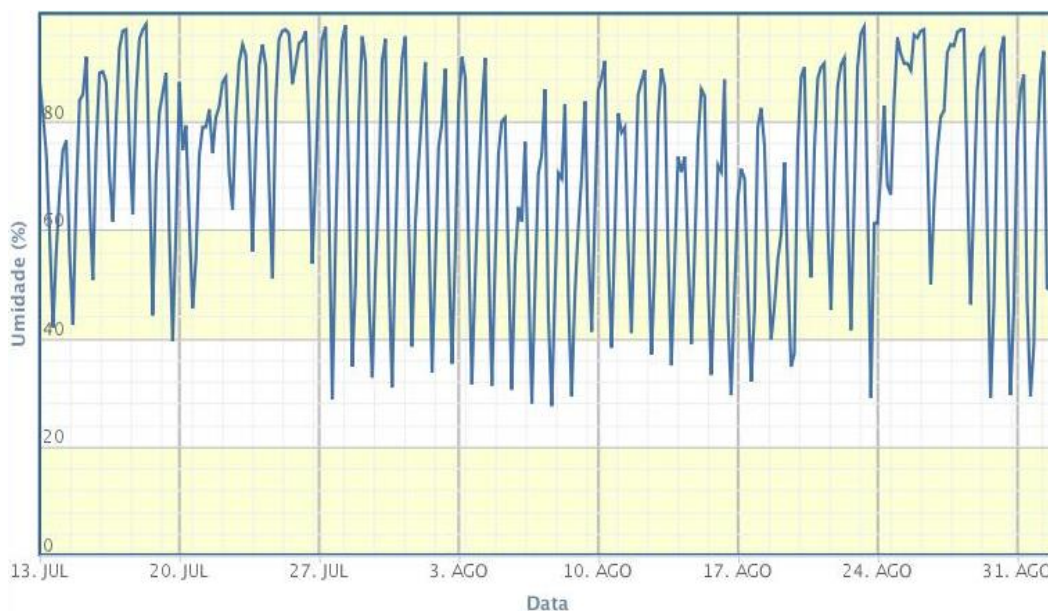


Figura 44 - Umidade média diária durante o Teste 2.
(Fonte: INMET, 2016)

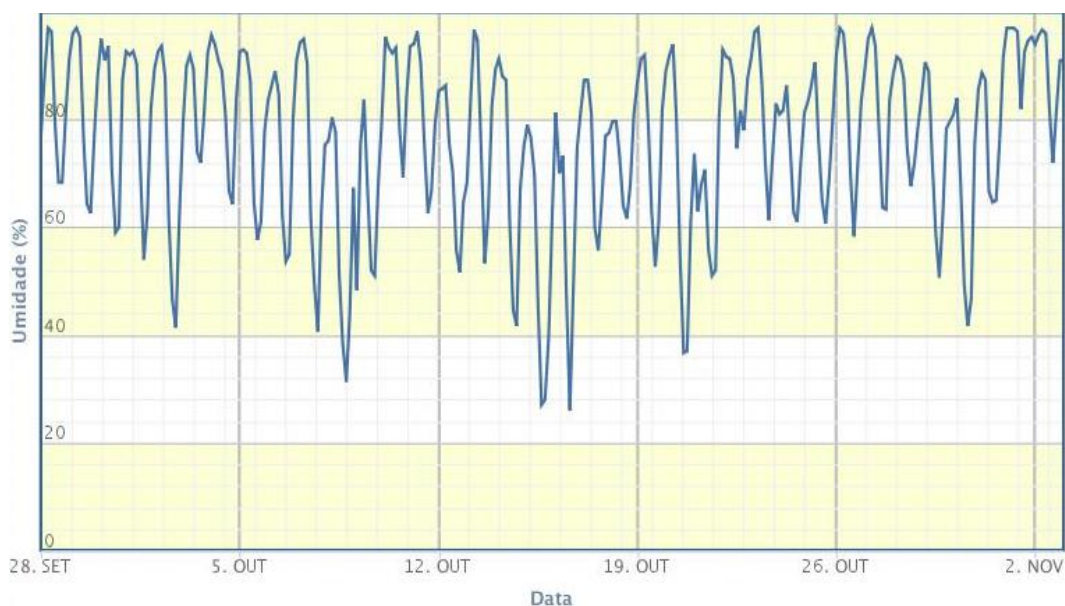


Figura 45 - Umidade média diária durante o Teste 3.
(Fonte: INMET, 2016)

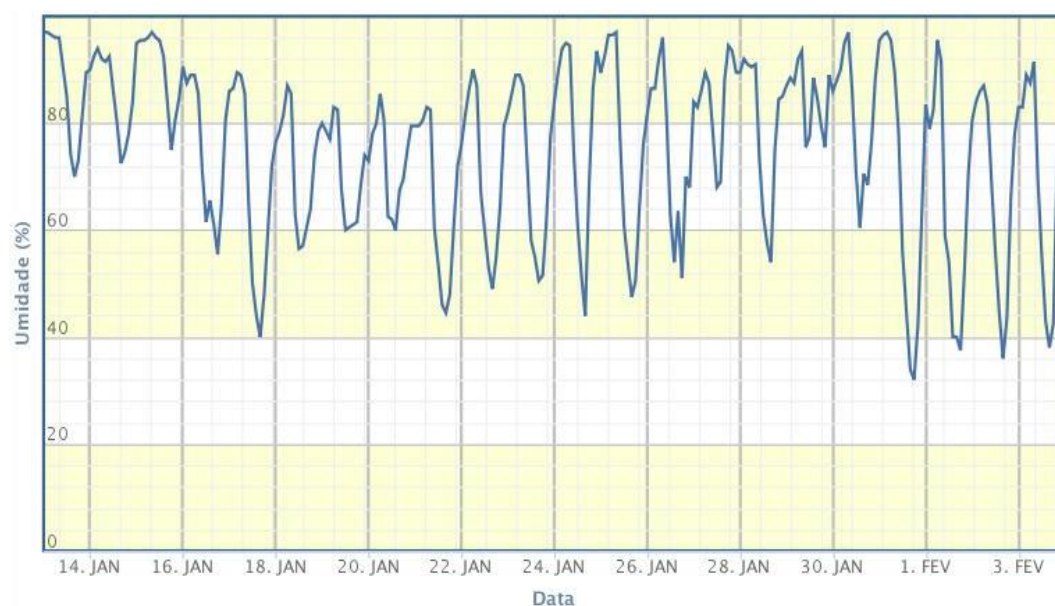


Figura 46 - Umidade média diária durante o Teste 4.
(Fonte: INMET, 2016)

Segundo Samudio (1993, *apud* MORTARA, 2011) a evaporação é a perda de água na forma de vapor do lodo para o ar, e ocorre devido ao gradiente de umidade que existe na interface com o ar. Os fatores externos que influenciam na velocidade do processo de evaporação são principalmente a temperatura, radiação solar e umidade ambiente, do nível d'água no lodo e do tipo de ligação entre a água e sólidos.

Melo (2006) acompanhou a radiação solar emitida durante 3 meses em Campina Grande e associou com a umidade de lodo para determinar a influência da radiação na

evaporação de lodo. Como consequência da baixa radiação ocasionada pela nebulosidade do mês de junho, a produtividade de secagem em relação aos meses anteriores é menor, pois a evaporação depende principalmente da energia recebida pela superfície do lodo.

A umidade de equilíbrio para lodo anaeróbico no estudo de Melo (2006), no caso de condições climáticas de Campina Grande ocorreu com lodo a 5%. A partir do estacionamento da massa que indica o fim da secagem, a energia solar será aproveitada apenas para higienização do lodo.

Para termos de conhecimento, durante o período do estudo foi enviado à um laboratório terceirizado pela empresa onde foi realizado o acompanhamento desta Etapa 1, amostras de lodo úmido com 94% após o desaguamento e lodo seco com 9% de umidade para analisar quanto a coliformes totais. O lodo úmido continha 931.800NMP/gST (número mais provável por grama de sólido total), e o lodo seco reduziu para 98NMP/gST. Este resultado confirma que a radiação solar além de ter a função na secagem do lodo, também atua como higienização e estabilização.

Salihoglu *et al* (2007) encontrou uma relação linear entre a radiação solar e o teor de ST durante o processo de secagem durante a primavera, verão, inverno e outono em leitos de secagem coberto na Turquia. Para um aumento de teor de ST de 20 para 35% é necessário no mínimo um valor acumulado de radiação de 40.000W/m^{-2} em todas as estações do ano. Quanto maior a temperatura do ar, maior a taxa de transferência de calor do ar para o lodo e maior a velocidade de secagem (SAMUDIO, 1993 *apud* MORTARA, 2011). A Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50 apresentam a radiação diária medidas na estação A713 durante o período dos respectivos Testes 1, 2, 3 e 4. Como pode ser observado, a radiação durante o inverno (Teste 2) foi a mais baixa com a maioria dos registros abaixo de 2000kJ.m^{-2} , o que era esperado no inverno devido a nebulosidade e menor período com luz solar, apesar de ter obtido temperatura média mais alta que no outono (Teste 1). Durante o período dos Testes 3 (primavera) e 4 (verão) as radiações foram maiores, com valores atingindo acima de 3000kJ/m^{-2} .

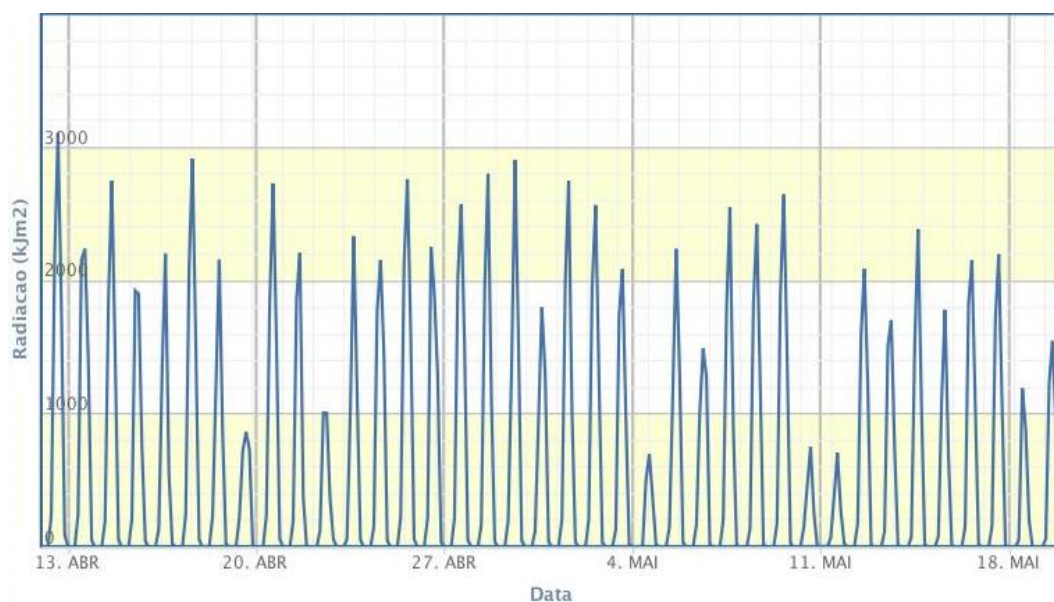


Figura 47 – Radiação diária durante o Teste 1.
(Fonte: INMET, 2016)

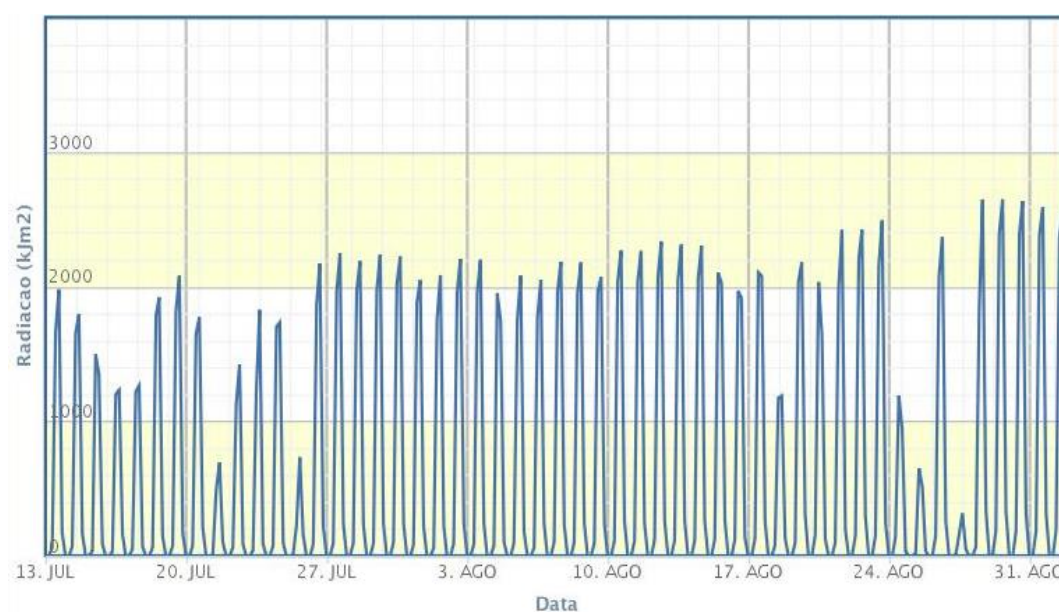


Figura 48 - Radiação diária durante o Teste 2.
(Fonte: INMET, 2016)

Com relação a cobertura transparente com aberturas laterais obteve-se somente vantagens. Melo (2006) avaliou leitos com coberturas transparente, os quais proporcionou eficiência na secagem igual aos leitos descobertos durante a estiagem, com a vantagem de que nos períodos chuvosos não ser necessário maior tempo de exposição para secagem, pois não há incorporação de água no lodo, afetando principalmente a secagem de lodos com umidade superior a 65%.



Figura 49 - Radiação diária durante o Teste 3.
(Fonte: INMET, 2015)

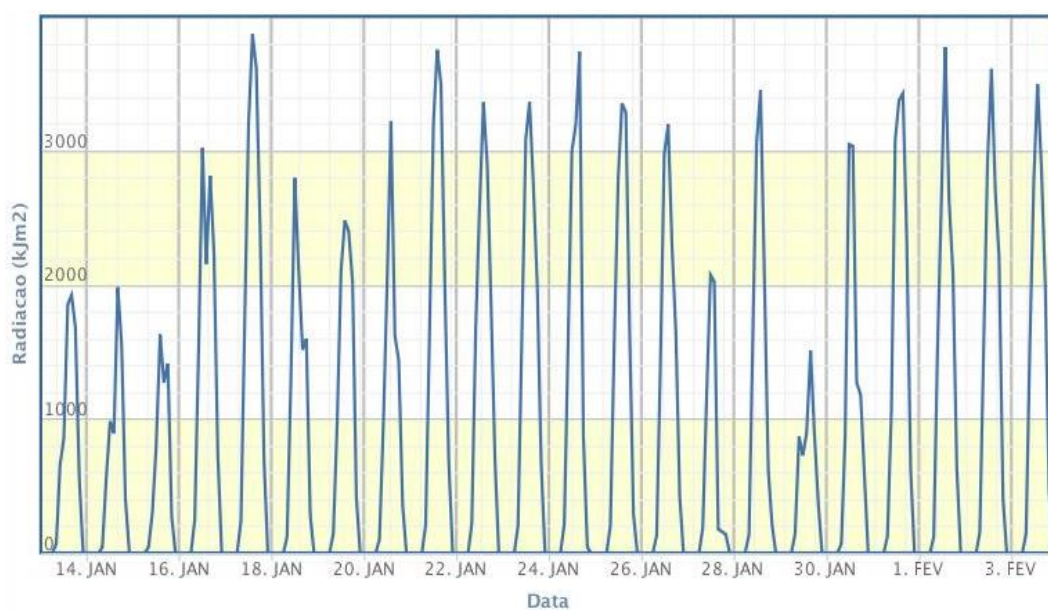


Figura 50 - Radiação diária durante o Teste 4.
(Fonte: INMET, 2016)

Ferreira (2001) monitorou a secagem de leitos cobertos e descobertos e também avaliou a desinfecção e higienização de lodo anaeróbio. Em período sem precipitação, a redução de umidade e de patógenos no lodo foi aproximadamente a mesma para os dois tipos de leito. A elevação da temperatura e consequentemente o aumento da evaporação resultaram no aumento da umidade relativa, que foi reduzida com o manejo da estufa através da abertura das cortinas laterais objetivando a renovação do ar. Da mesma forma que aconteceu durante os quatros Testes, as cortinas da estufa permaneceram abertas

permitindo essa troca de ar e ventilação, sendo abaixadas apenas em dias com forte precipitação. Ferreira (2001) ainda avaliou a solarização, que é quando a cobertura plástica do lodo fica diretamente sobre o lodo sem aberturas para ventilação. A temperatura atingida no lodo foi superior ao leito descoberto, porém a umidade do lodo também foi maior por não permitir a perda de água através da evaporação.

Já Lima (2010) acompanhou diariamente durante o dia todo, as temperaturas externas e internas ao leito com cobertura tipo estufa, que além de causar aumento de temperatura interna, também a conservou durante mais tempo com temperaturas mais altas, mesmo com variações externas no decorrer do dia.

Ainda sobre o estudo de Comparini (2001), o pesquisador alcançou lodo com 88,55% de ST em 70 dias de secagem com temperatura média dentro da estufa de 26,6° C, e no segundo teste usando os mesmos procedimentos operacionais, o mesmo teor de sólidos foi atingido entre 35 e 42 dias, com temperaturas médias de 29,4°C.

De acordo com Vanzetto (2012) a evaporação é mais rápida quando a temperatura é alta, a umidade do ar é baixa e há ventilação para renovação adequada do ar. Desta forma as condições climatológicas mais favoráveis para a secagem do lodo foram durante os Testes 3 e 4 conforme apresentam os dados da Tabela 19 e Tabela 20, e os registros das radiações da estação A713 (INMET, 2016). A cobertura plástica transparente com aberturas apresenta-se um dispositivo adicional essencial aos leitos de secagem durante todo o ano.

5.2 Etapa 2 - Escala piloto com lodo anaeróbio

Nos itens 5.2.1 ao 5.2.3 serão apresentados os resultados obtidos durante os testes realizados com lodo anaeróbio digerido sem polímero em leito piloto com piso de blocos drenantes.

5.2.1 *Taxa de aplicação de sólidos (TAS)*

Como já mencionado, a TAS é uma das variáveis determinantes de projeto que influencia na remoção de umidade através dos leitos de secagem. A partir do resultado da concentração de sólidos totais e da área do piloto de 0,81m², a TAS foi calculada para cada teste e estão apresentadas na Tabela 21.

Como pode ser observado na Tabela 21, ocorreu uma variação na concentração de sólidos no lodo do reator UASB. Apesar de o UASB ser considerado um processo que suporta maior variabilidade do efluente de entrada, ainda pode haver alterações ao longo do ano devido à característica do esgoto gerado.

Tabela 21 - Taxa de aplicação de sólidos.

Teste	Volume (L)	Concentração [ST] (%)	TAS (kgST/m ²)
TP 1	202,5	1,2	3
TP 2	202,5	2,8	7
TP 3	202,5	4,4	11

Diante disso é importante considerar dados da concentração de sólidos ao longo de um ano, se possível vários anos, para projetar um leito de secagem que atenda tanto a TAS mínima quanto a máxima, otimizando de uma forma econômica para o investimento do projeto.

Segundo a sugestão de TAS para lodo anaeróbio do fabricante de piso *wedge wire* GRAVITY FLOW SYSTEM, o TP 1 estaria abaixo do mínimo indicado de 4,8kgST/m², e analisando por este sentido, o leito estaria superdimensionado para lodo anaeróbio. No entanto, o volume descartado para os 3 Testes foi o mesmo, o que fortalece a necessidade de ao projetar, não considerar apenas a TAS máxima de 15kgST/m² da NBR 122009, mas também outras variáveis.

5.2.2 ***Desaguamento: fase drenagem do lodo***

Para avaliação da drenagem, um dos parâmetros analisados foi a vazão no registro de saída da água drenada. Na Figura 51 está apresentada a curva de variação da vazão para os Testes TP 1, TP 2 e TP 3. Como pode ser observado na Figura 51, o TP 1 sofreu instabilidades na vazão, sem uma redução exponencial chegando a uma constante como aconteceu no TP 2 e TP 3. A curva para TP 1 apresentou similaridade com as curvas de vazão de drenagem para os testes T1_{T1} e T1_{T2} em escala real com lodo aeróbio, que pode estar relacionado a uma menor concentração de sólidos no lodo. O lodo do TP 1 obteve 1,2% ST e o lodo aeróbio dos testes em escala real, 0,6% ST.

Por outro lado, o TP 2 e TP 3 com maior concentração de sólidos de 2,8% e 4,4% respectivamente, apresentaram curvas de vazão de drenagem praticamente iguais, com exceção nos 30min iniciais, onde o TP 2 apresentou maior vazão em relação ao TP 3. Isso

sugere que, quanto maior concentração de sólidos no lodo para uma mesma carga hidráulica, maior a camada de lodo sólido formada no fundo, que agirá como meio filtrante, e com isso maior caminho para filtração.

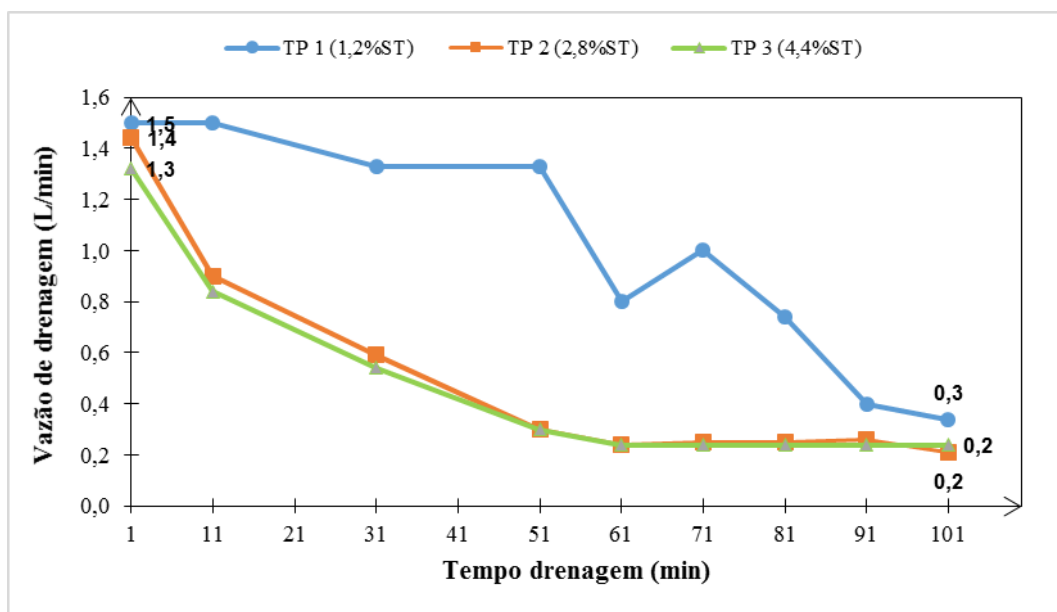


Figura 51 - Variação de vazão de drenagem no tempo para TP 1, TP 2 e TP 3.

Mortara (2011) em seu estudo de desaguamento de lodo anaeróbio em leitos de drenagem com manta geotêxtil mediu o fluxo de água em L/s.m² na drenagem. O fluxo inicial para lodo condicionado com polímero foi de 48L/min.m², enquanto que em lodo sem polímero ficou abaixo de 6,3L/min.m². Os resultados indicam que o fluxo inicial de água é alterado pela utilização de condicionantes. Logo, se utilizar previamente condicionamento no lodo anaeróbio para descarte em leito com piso de blocos drenantes, também poderá haver um aumento na vazão de drenagem.

O volume descartado de lodo de aproximadamente 202,5L representou uma altura de camada hidráulica de 20cm acima do piso de bloco drenante. Na Figura 52, Figura 53 e Figura 54 estão apresentadas as curvas de redução de volume durante a drenagem.

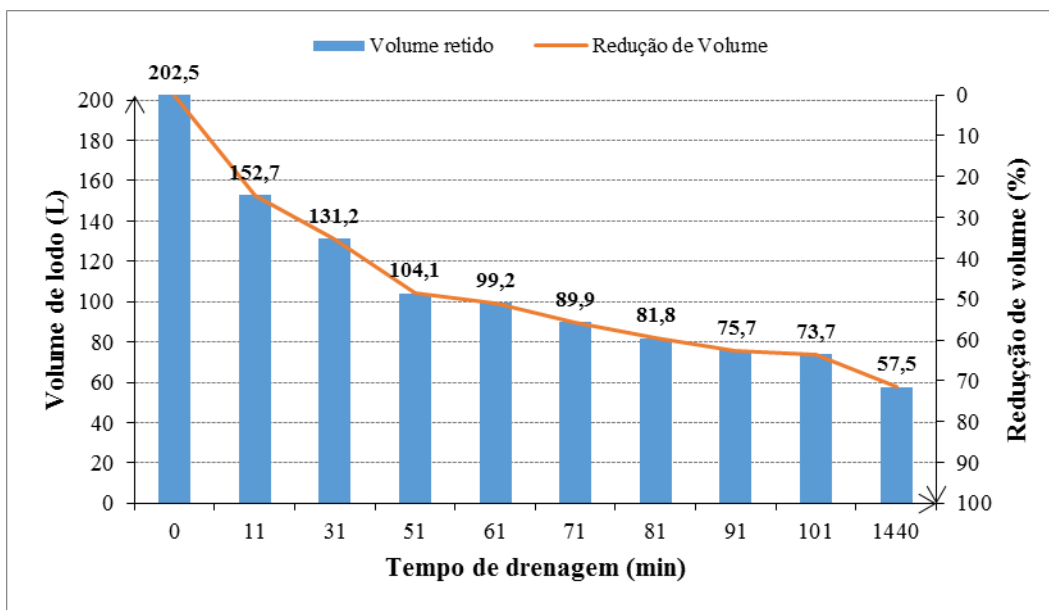


Figura 52 - Redução de volume durante o desaguamento do TP 1.

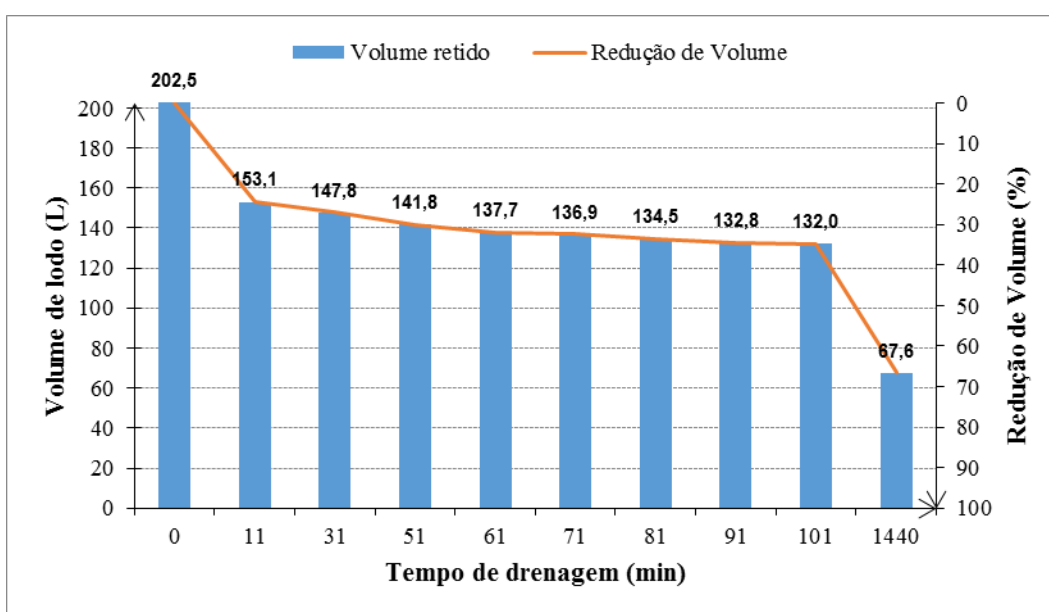


Figura 53 - Redução de volume durante o desaguamento do TP 2.

Ao compará-las percebe-se uma similaridade no volume de lodo reduzido em 24h (1140min) entre os três Testes, acima de 70% para o TP 1 e, quase 70% para o TP 2 e o TP 3. Em 11min de drenagem os três Testes também apresentaram praticamente a mesma redução de volume, quase que 30%, independente da concentração inicial de sólidos do lodo no descarte. Isto pode ser explicado, devido ao fato dos três iniciarem a etapa de desaguamento com a mesma carga hidráulica de 20cm acima dos blocos drenantes. Além disso, dentro dos 30% de volume reduzido está o volume de lodo que ultrapassou o bloco

drenante no início do descarte de todos os ensaios, ou seja, a camada de 5cm abaixo do bloco drenante, representando 40,5L de lodo.

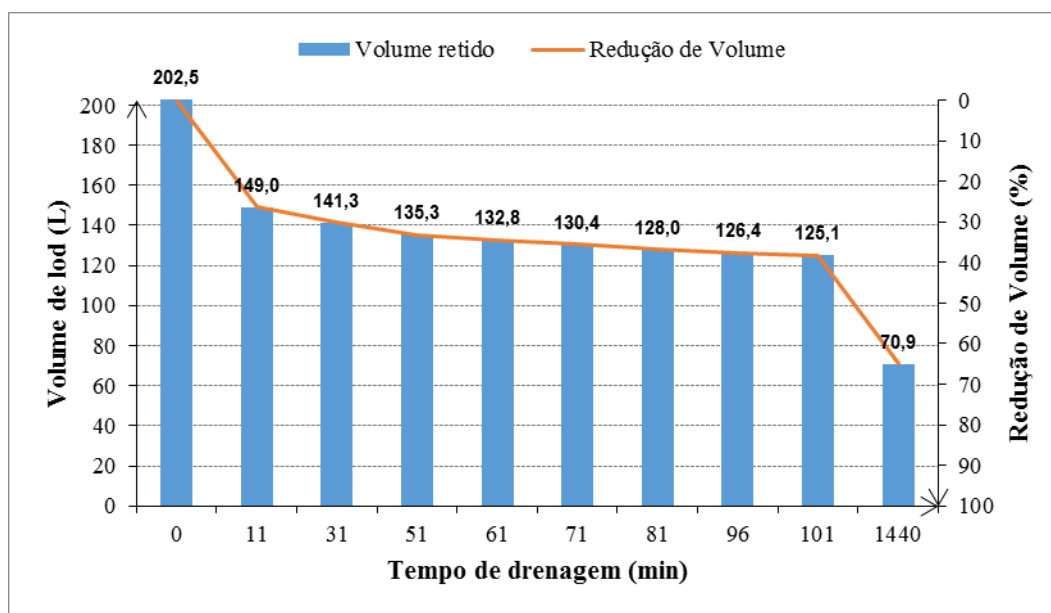


Figura 54 - Redução de volume durante o desaguamento do TP 3.

No entanto, o TP 2 e o TP 3 sofreram estabilização entre 11 e 101 min, reduzindo entre 35% e 38% de volume de lodo, ou seja, manteve-se no leito em torno de 65% do volume total em 1h e 40min de drenagem. Em contrapartida, o TP 1 sofreu redução de volume de forma crescente com o tempo e atingiu mais de 60% em redução de volume de lodo no mesmo tempo de 1h e 40min. Este fato também é justificado através da concentração inicial de sólidos contido do lodo bruto. O lodo do TP 1 continha menos sólidos, em torno de 98,8% de água, contra, 97,2% para o TP 2, e 95,6% para o TP 3. Como o teor inicial de sólidos totais do lodo nos ensaios TP 2 e TP 3 são mais elevados, 2,8% e 4,4%, respectivamente, a camada decantada durante o período de descanso foi mais alta, tornando o caminho de filtração da água maior, ou seja, a drenagem foi mais lenta o que explica a menor redução de volume no mesmo tempo.

Por outro lado, ao analisar a redução de volume após 1440min do descarte, ou seja, em 24h a redução para os três ensaios foi cerca de 72% para TP 1, 67% para TP 2 e, 65% para TP 3. Isto indica que, para a duração da drenagem de um dia em leito com piso de blocos drenantes, a TAS não influencia significativamente a redução de volume para um mesmo tipo de lodo e operação de descarte. Ao comparar com descartes de lodo aeróbio condicionado com polímero da Etapa 1, a redução de volume lodo após 1 hora do descarte foi em torno de 70%, e após 24h foi em torno de 90% para lodo com concentração menor

de 0,6%. No entanto, a drenagem mais rápida se deve além do piso de blocos drenantes, à floculação do lodo, que permitiu a liberação de mais água livre.

Após 24h do descarte foi caracterizado como fim da drenagem e para avaliar a eficiência do processo foi medida a altura de camada de lodo final e determinado o teor de sólidos do lodo, os quais estão apresentados na Tabela 22. Na Figura 55 está apresentado ao lado esquerdo o leito piloto com camada de lodo de 20cm e à direita, a camada de lodo de 6,5cm após 24h do descarte, ambos do TP 1.

Tabela 22 - Altura de camada e umidade de lodo após a drenagem.

Teste	Volume (L)	Altura de camada inicial (cm)	% ST inicial	Altura de camada final (cm)	% ST final
TP 1	202,5	20	1,2	6,5	13,9
TP 2	202,5	20	2,8	7,7	14,4
TP 3	202,5	20	4,4	8,5	13,04

Como pode ser observado na Tabela 22, quanto maior a concentração de sólidos no lodo ou TAS, maior a camada de lodo após o desaguamento. Por outro lado, em relação a redução de umidade de lodo percebe-se que para um mesmo tipo de lodo mesmo variando a concentração de sólidos, a redução de umidade após a drenagem é aproximada.



Figura 55 - Altura de camada de lodo após alimentação no leito piloto e após 24h do descarte do TP 1.

É possível comparar o ensaio TP 2 e TP 3 com o estudo de Mortara (2011) em leito de drenagem de manta geotêxtil quando aplicou lodo anaeróbio com e sem polímero,

ambos proveniente de reator UASB. Na Tabela 23 estão apresentados os resultados a comparação.

Tabela 23 - Comparação do desaguamento de lodo em leito com piso de bloco drenante e leito com manta

	Ensaio TP 2	Ensaio TP 3	Ensaio E9 (Mortara, 2011)	Ensaio E8 (Mortara, 2011)
TAS (kgST/m²)	7	11	13,6	12,8
Polímero	Não	Não	Não	Sim
Altura de camada inicial de lodo (cm)	20	20	50	45
Altura de camada final de lodo (cm)	7,7	8,5	20	9
Redução de volume (%)	61,5	57,5	60	80
Teor inicial de ST (%)	2,8	4,4	2,4	2,3
Teor ST após drenagem (%)	14,4	13	11,8	13,1
Aumento de %ST (vezes)	≈5	≈3	≈5	≈6

Ao analisar os dados da Tabela 23, onde TP 3 e E9 possuem TAS aproximadas, o leito com manta geotêxtil obteve maior drenagem em relação ao leito de bloco drenantes por conta da maior TAS e maior redução de volume após 1 dia do descarte reduzindo 60% de altura de camada de lodo para E9, contra 57,5% no TP 3. Mas ao verificar o teor de sólidos e a altura de camada de lodo inicial, nota-se que para obter maior TAS foi necessário maior volume de lodo.

Por outro lado, ao comparar TP 2 e E9, os quais possuem teor inicial de sólidos aproximados, verifica que a situação se inverte, a redução na drenagem foi maior para TP 2 com 61,5% contra os 60% do E9.

Em relação a redução de umidade em análise geral, a diferença não foi significativa, já que possuem a mesma característica de lodo proveniente de reator UASB. No entanto, ao comparar TP 3 e E9, justifica-se a maior redução de umidade no TP 3 por conta da maior %ST do lodo inicial, em contrapartida, a comparação entre o TP 2 e E9 mesmo com %ST inicial próxima, fica por conta da TAS e camada de lodo do TP 2 serem menores do que o E9. Estas diferenças entre as variáveis ainda não confirmam a melhor alternativa para o desaguamento, o mesmo acontece ao se projetar um sistema sem considerar estas e outras variáveis.

Já ao analisar o teste E9 com o E8 ambos realizados por Mortara (2011), nota-se uma eficiência maior na drenagem quando se utiliza polímero para condicionar o lodo, pois reduziu 80% de altura de camada de lodo após 1 dia do descarte, e ainda aumentou a %ST final. Se considerar o uso de polímero na operação com leito com piso de blocos drenantes, também haverá maior eficiência na etapa da drenagem.

Em relação à qualidade da água do lodo drenado, a Figura 56 apresenta a turbidez obtida durante o desaguamento para o TP 1, TP 2 e TP 3.

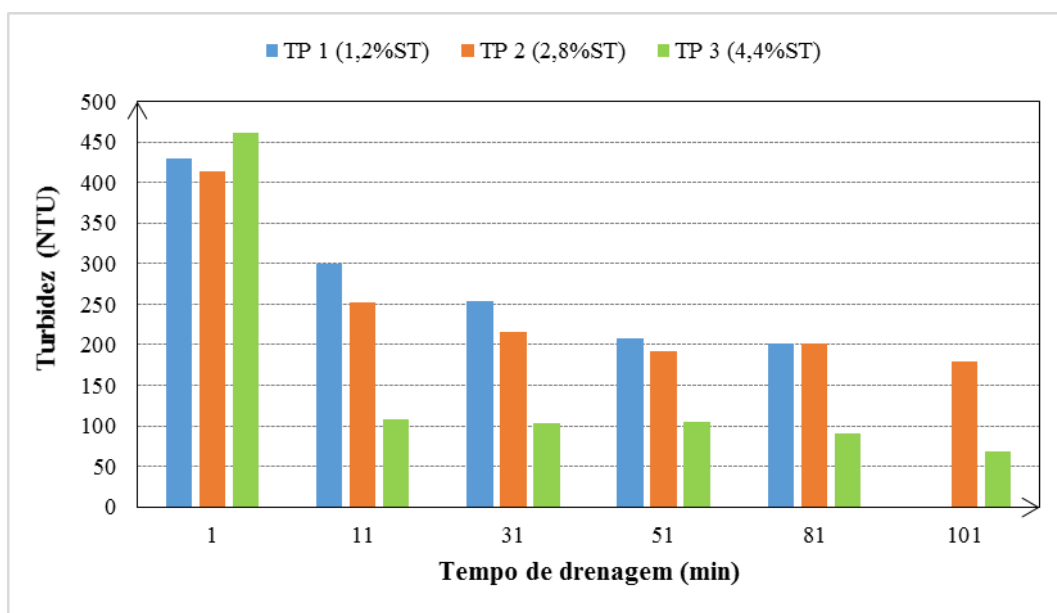


Figura 56 - Turbidez do drenado durante o desaguamento do TP 1, TP 2 e TP 3.

Como pode ser observada na Figura 56, a qualidade do drenado também foi afetada pela concentração de sólidos no lodo bruto descartado, e consequentemente pela TAS. No primeiro de drenagem, a água drenada obteve alto valor de turbidez, acima de 400NTU para os três Testes. Esta água nos momentos iniciais é o volume de água que atravessou o meio filtrante no início de alimentação de lodo no leito. Como o lodo não foi condicionado e no início não havia camada de lodo para contribuir na filtração, parte do volume inicial, em torno de 40,5L, acabou passando pelas aberturas de 0,7mm do bloco drenante.

No tempo de 11min, a qualidade do drenado para turbidez melhorou 30% para o TP 1 com TAS de 3kgST/m², quase 40% para o TP 2 com TAS de 7kgST/m² e 76% para o TP 3 com TAS de 11kgST/m². O melhor desempenho para o TP 3 se deve ao fato da concentração de sólidos inicial ser maior, com aspecto de lodo menos líquido e maior camada inferior de sólido formada durante a alimentação de lodo no leito. A partir de 11min o TP 3 já havia atingido uma estabilização na qualidade do drenado, enquanto TP 1 e TP 2 obtiveram qualidade do drenável estável somente a partir de 51min.

Apesar do drenado do TP 3 ter reduzido 85% na leitura da turbidez entre 1 e 101min da drenagem, o valor em 101min de 69NTU ainda é muito alto comparado a qualidade do drenado de lodo condicionado com polímero. Quando comparado com leito de drenagem com o meio filtrante de manta geotêxtil, Mortara (2011) obteve em média 64NTU de

turbidez no drenado para lodo anaeróbio sem polímero, aplicando uma TAS de 13,6kgST/m² e teor de sólido inicial de 2,4%, e em média 12NTU para o lodo anaeróbio condicionado com polímero aplicando TAS 12,8kgST/m² e teor de sólido inicial de 2,3%.. Estes resultados corroboram maior eficiência no desaguamento quando o lodo é condicionado. Nos testes de escala real desta pesquisa com o lodo aeróbio condicionado, o drenado do leito com piso de blocos drenantes apresentou turbidez de 10NTU a partir de 5min de drenagem.

A qualidade do drenado também foi caracterizado quanto aos sólidos em suspensão e cor aparente, conforme estão apresentados na Figura 57 e Figura 58, respectivamente.

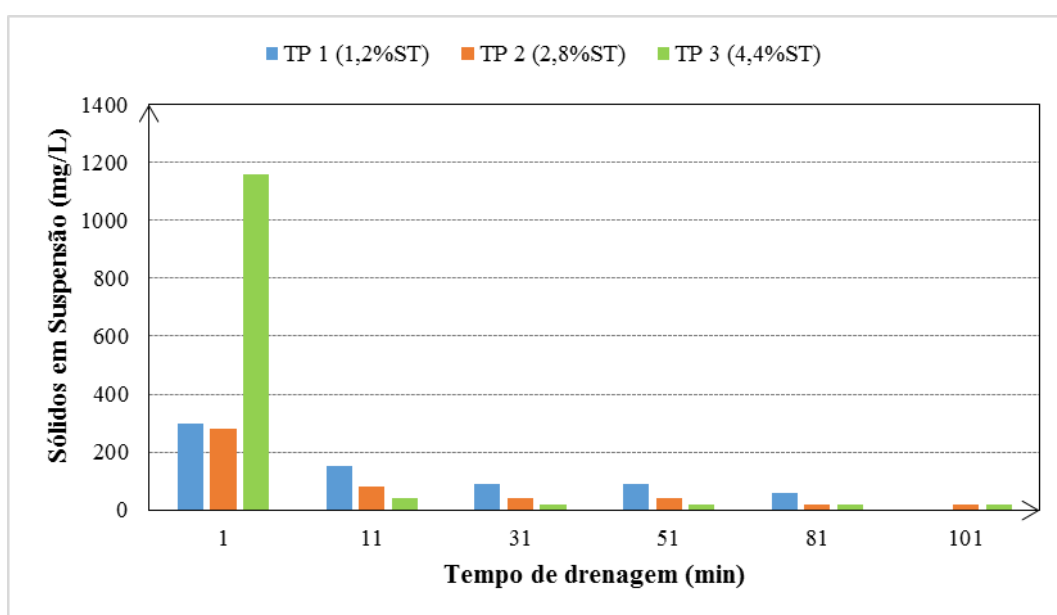


Figura 57 - Sólidos em suspensão na água drenada do TP 1, TP 2 e TP 3.

Como pode ser observado na Figura 57, assim como ocorreu para a turbidez, a água coletada em 1min de drenagem também apresentou pior qualidade em relação aos sólidos em suspensão. Inclusive para realizar o ensaio conforme a metodologia SMEWW 2540 (APHA; AWWA; WEF, 2011), a amostra precisou ser diluída em 10 vezes. Com exceção do drenado do TP 3 em 1min, o drenado do TP 1 apresentou maior escape de sólidos em todos os momentos analisados. Isto se deve ao fato do lodo ser menos concentrado, provavelmente com partículas menores, o qual obteria melhor resultado se o mesmo fosse condicionado com polímero. Também pode ser observado através da Figura 57, que após 1min, parte da água que supostamente atravessou os blocos drenantes nos momentos

iniciais de alimentação de lodo foi drenada, e devido a camada sólida de lodo que age como meio filtrante a qualidade melhora e se torna estável.

Em relação a cor aparente, além dos sólidos em suspensão presentes, os sólidos dissolvidos também compõem a leitura. Isto pode explicar o fato que, hora o lodo mais concentrado obtém maior resultado para cor, hora o lodo menos concentrado, conforme pode ser observado na Figura 58. No entanto, a cor aparente da qualidade do drenado também pode ser influenciada pelo uso ou não de polímero.

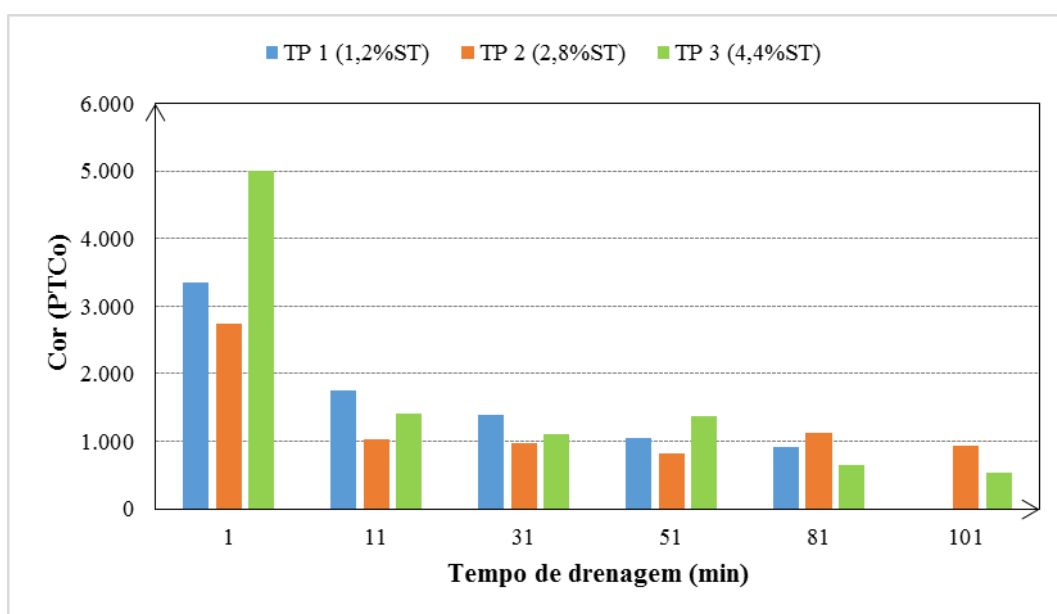


Figura 58 - Cor aparente na água drenada do TP 1, TP 2 e TP 3.

Na Figura 59 estão apresentadas as amostras da água drenada do lodo do TP 1 na parte superior, coletadas nos tempos de 1, 11, 31, 51 e 81min, e do lodo do TP 3 na parte inferior, coletadas nos tempos 1, 11, 31, 51, 81 e 101min. Já na Figura 60 está ilustrada a diferença do aspecto lodo retido no leito piloto e da água drenada do lodo.

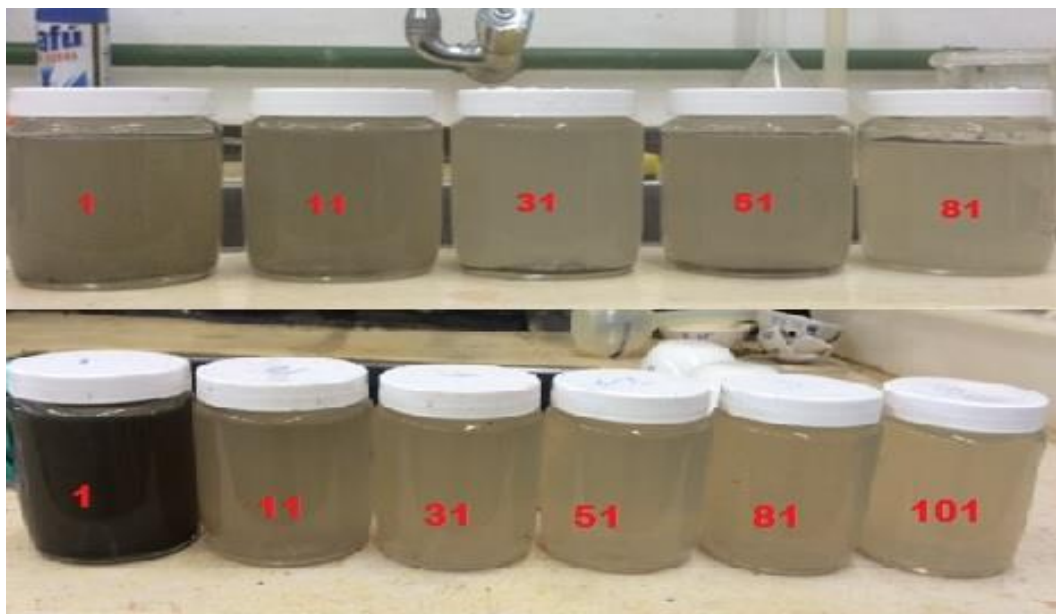


Figura 59 - Amostras da água do lodo drenada do TP 1 e TP 3 conforme o tempo de drenagem.



Figura 60 – Diferença entre o lodo retido e a água do lodo drenada.

5.2.3 ***Desaguamento: fase de secagem do lodo***

A partir dos dados de teor de sólido total e o tempo de secagem foi possível reproduzir a curva de secagem para os ensaios TP 1, TP 2 e TP 3 que estão ilustradas na Figura 61.

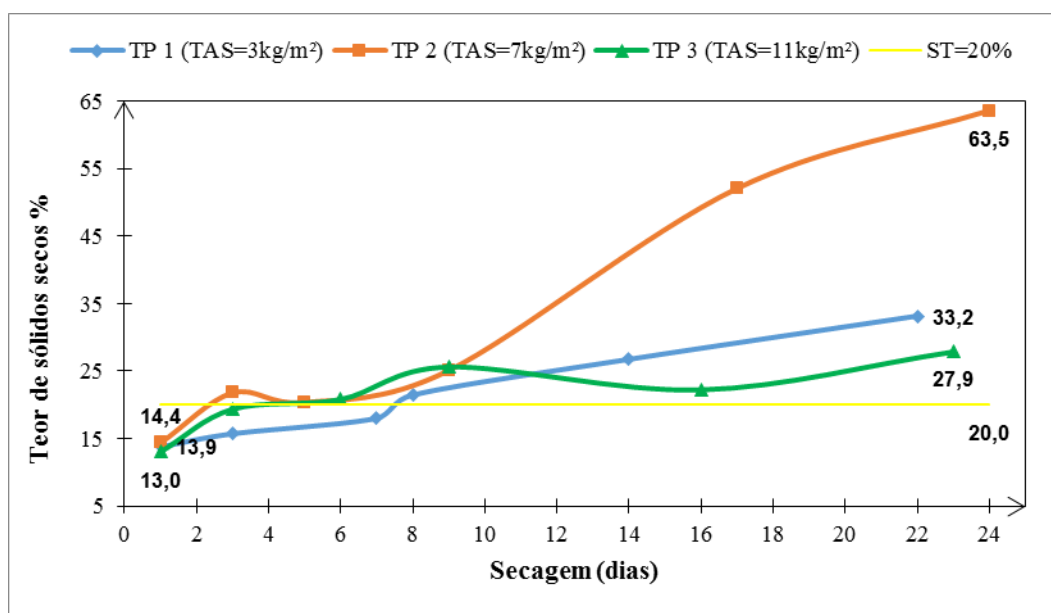


Figura 61 - Curva de secagem do TP 1, TP 2 e TP 3.

Após o primeiro dia do descarte iniciou-se a etapa de secagem, onde o teor de ST inicial ficou aproximado para os três ensaios, 13,9% para TP 1, 14,4% para o TP 2, e 13,0% para o TP 3. Nota-se que apesar do teor de ST do lodo bruto do TP 3 ter sido quase quatro vezes maior, e o TP 2 mais que duas vezes o valor do TP 1, 4,4%, 2,8% e 1,2%, respectivamente, após a drenagem o resultado na redução de umidade foi praticamente a mesma, visto que o tipo de lodo e a camada hidráulica inicial foram as mesmas. Outra similaridade entre os três ensaios durante a secagem foi o teor de ST atingido acima de 20%ST em menos de 10 dias, independente das condições climáticas e do teor inicial de ST.

No entanto, dentro praticamente do mesmo período de secagem, os valores para o teor de ST final foram diferentes. O TP 1 atingiu 33,2%ST, o TP 2 atingiu 63,5%ST e o TP 3 atingiu 27,9% ST. Como o lodo de descarte dos três ensaios passou pelo mesmo processo, anaeróbio digerido em reator UASB sem polímero e, partiram para secagem natural praticamente com o mesmo teor de ST e altura de camada de lodo, a diferença do teor de ST final se deve neste caso às condições climáticas. Na Tabela 24 está apresentado as condições climáticas média e acumulada para os três períodos de secagem.

Tabela 24 - Condições climáticas durante o TP 1, TP 2 e TP 3.

Teste	Estação	Período (dias)	Temperatura Média (°C)	Umidade Média (%)	Vel. Vento (m/s)	Radiação Média (kJ/m ²)	Radiação Acumulada* (kJ/m ²)	Precipitação Acumulada* (mm)
TP 1	Outono	22	17,9	85	1,50	13.620,7	334.207,5	151,2
TP 2	Inverno	24	20,5	66,5	1,75	20.098,5	451.002,0	39,6
TP 3	Primavera	23	21,8	77,2	1,75	19.240,3	503.523,0	202,2

*acumulado no período de teste

Como pode ser observado na Tabela 24, mesmo que o TP 2 ocorreu ainda durante o inverno, as condições climáticas foram as mais favoráveis para a secagem pois, a umidade relativa do ar média foi menor, a radiação solar média foi maior causando aumento de temperatura, e ainda ocorreu menos chuva durante o período de secagem. Durante o TP 1 o leito era coberto, conforme mostra a Figura 62, mas ainda assim a precipitação do período ocasionou aumento na umidade, e a nebulosidade diminui a radiação solar e a temperatura do ar.



Figura 62 - Detalhe da cobertura transparente improvisada durante o TP 1.

Por outro lado, ao comparar o período de secagem entre o TP 1 e o TP 3, as condições climáticas foram mais favoráveis durante o TP 3 com maior radiação solar, maior temperatura e menor umidade do ar, porém a falta de cobertura do leito prejudicou a evolução da secagem, pois acumulou umidade no lodo devido a precipitação que no TP 3 foi a maior, 202,2mm.

Na Figura 63 está apresentado a evolução da secagem para os três ensaios e os valores médios diários para temperatura e umidade do ar.

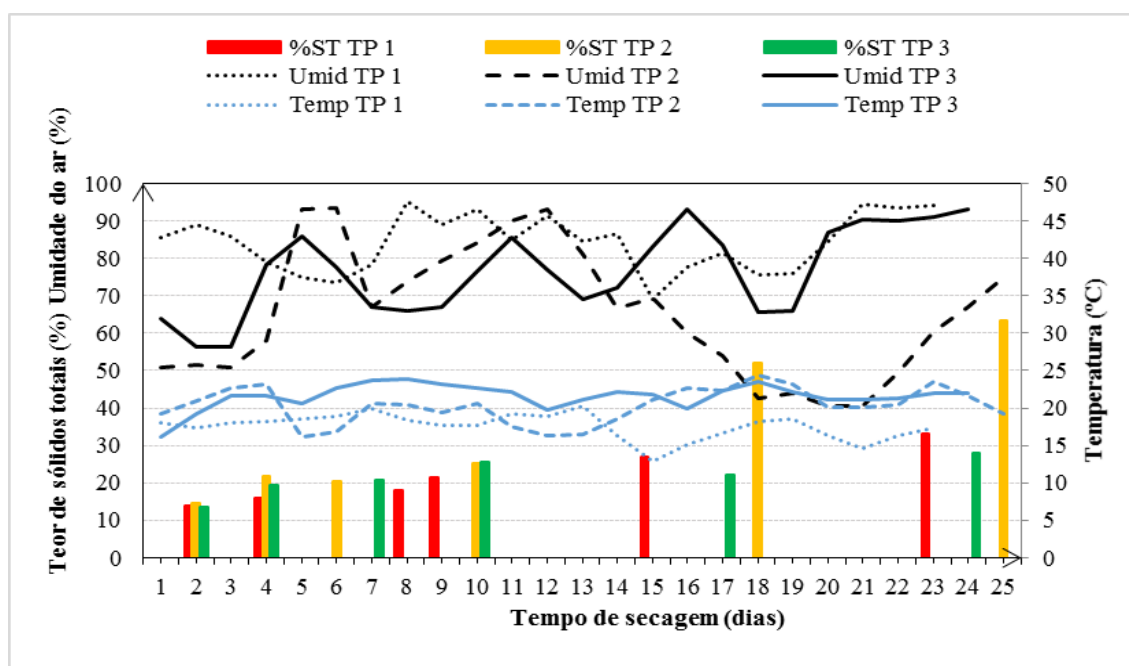


Figura 63 – Evolução da secagem e a influência da temperatura e umidade do ar.

Ao observar a Figura 63 é possível afirmar que ocorreu menor variação na temperatura do ar entre os três períodos comparado com a variação da umidade do ar. O desvio padrão da temperatura para TP 1, TP 2 e TP 3 foi de 1,7, 2,4 e 1,7, respectivamente, enquanto o desvio padrão para umidade foi de 7,6, 17,3 e 11,5, respectivamente. Através da Figura 63 percebe-se que até os 10 primeiros dias de secagem o teor de ST para os três ensaios estavam próximos, acima de 20%, e a partir do 15º dia a secagem do lodo do TP 3 acelerou devido à queda drástica na umidade relativa do ar.

Ao comparar com os resultados obtidos por Mortara (2011), o leito com piso de blocos drenantes apresentou vantagem na secagem comparado ao leito de drenagem com manta geotêxtil. O teor de sólidos final encontrado por Mortara (2011) em 20 dias de secagem foi de 23,7%, para TAS de 13,6% iniciando a etapa de secagem com quase 12%ST. Segundo Mortara (2011), o período de secagem foi entre fevereiro e março de

2011, estação de verão no Brasil, o que caracteriza alta temperatura e radiação solar. O TP 3 o qual ocorreu durante estação da primavera, poderia ter encerrado a etapa de secagem em 9 dias com 25,7%ST, valor próximo ou até acima do atingido por sistemas mecânicos de desaguamento que usam condicionantes.

Santos *et al* (2017) avaliou o efeito da secagem em leito convencional sobre as características microbiológicas e físico-químicas de lodo anaeróbio coletados em dois pontos de um reator UASB. Para a amostra de lodo com teor inicial de sólidos de 5,39% em 30 dias de secagem atingiu 24,22%, e no período final de 90 dias atingiu 59,42%ST. Já a amostra de lodo com teor inicial de sólidos de 1,46% atingiu em 30 dias 30,02%ST e em 90 dias, 77,06%ST. Segundo Santos *et al* (2017), o período analisado foi entre os meses de agosto e janeiro.

Ao comparar o desempenho da secagem de lodo anaeróbio e lodo aeróbio em leito com piso de blocos drenantes é possível afirmar que as cinéticas de secagem são similares, pois a curva de secagem do lodo anaeróbio obteve formato similar ao do lodo aeróbio, onde a velocidade da primeira fase de secagem é menor comparado a velocidade de secagem da segunda fase de secagem. Essa transição para ambos os lodos ocorreu após o lodo atingir 20%ST. No entanto, nota-se que o lodo anaeróbio atinge 20%ST em muito menos tempo, em torno de três dias, comparado ao lodo aeróbio, entre quinze e vinte dias. A vantagem da secagem mais rápida do lodo anaeróbio na primeira fase se deve à maior redução de umidade na drenagem de lodo. Em contrapartida, o lodo aeróbio possui melhor desempenho de secagem na segunda fase, pois atingiu valores mais altos no teor de sólidos final. Outra forma de comparar a secagem dos dois tipos de lodo é através do fluxo de massa de umidade que deixa o sólido por unidade de área de exposição ao meio de seca por unidade de tempo, expressa em $\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$. Na Figura 64 está apresentado a cinética de secagem para o TP 1, TP 2 e TP 3.

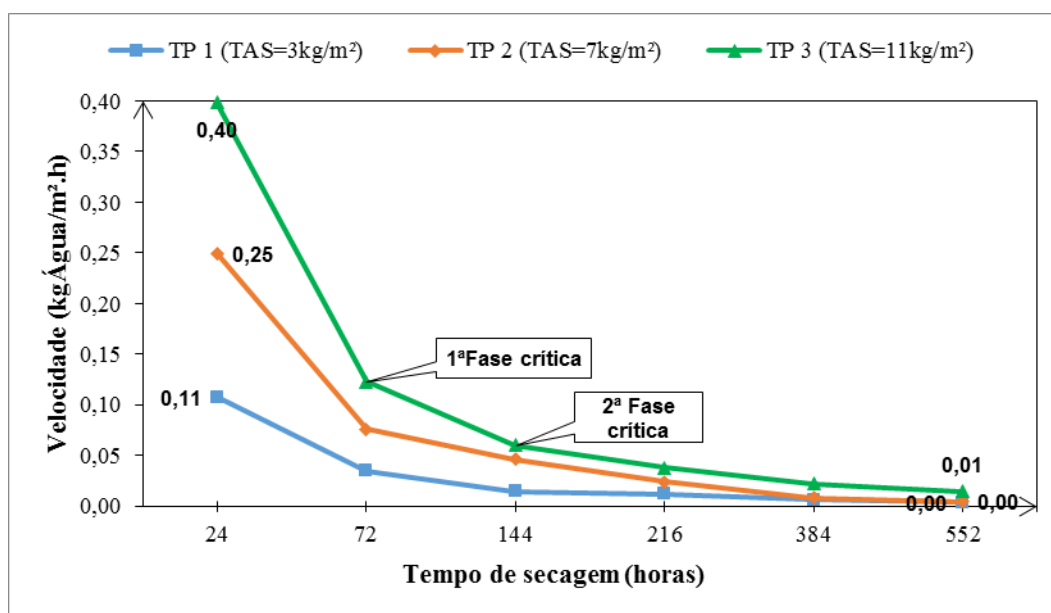


Figura 64 - Cinética de secagem para TP 1, TP 2 e TP 3.

Como pode ser observado as curvas para os três ensaios manteve o mesmo formato, devido o tipo de lodo ser o mesmo. No entanto, a perda de água inicial foi proporcional a massa de lodo, consequentemente proporcional ao teor inicial de ST no lodo bruto, uma vez que o volume foi o mesmo para os três, assim quanto maior a %ST inicial maior é o ponto de partida da velocidade de secagem. A medida que o lodo vai perdendo umidade, a velocidade de secagem sofre um decréscimo atingindo zero quando o lodo alcança sua umidade de equilíbrio. Através da Figura 64 é possível afirmar que o lodo do TP 1 e o TP 2 atingiram a umidade de equilíbrio, em 33,2%ST para TP 1, e 63,5%ST para TP 2, naquelas condições de secagem. Por outro lado, a secagem do TP 3 poderia ser otimizada aumentando o tempo de secagem até estar mais próximo da sua umidade de equilíbrio.

Para lodo aeróbio, a umidade de equilíbrio encontrada para condições de secagem foi com teor de sólidos final acima de 90%ST, ou seja, o lodo aeróbio atinge valores mais altos de teor de sólidos em leito de secagem com piso de blocos drenantes do que o lodo anaeróbio. Além da condição de secagem do meio, a umidade de equilíbrio varia com o tipo de lodo, o qual segundo Ruiz *et al* (2007) está relacionado principalmente com a quantidade de matéria orgânica presente no mesmo, quanto maior o teor de matéria orgânica, maior a capacidade de secagem, pois a condutância de transferência de água e a compressibilidade do lodo são mais altas.

Outra característica do lodo o qual está relacionado com o teor de matéria orgânica é o seu encolhimento na secagem. Assim como ocorreu com o lodo aeróbio, durante o período de secagem, o lodo anaeróbio também altera o seu aspecto. Na Figura 65 está

apresentada o lodo com 1 dia de secagem, aspecto pastoso de cor escura característica do lodo anaeróbio. Na Figura 66 está apresentado o lodo com 14 dias de secagem, formadas várias rachaduras ou fissuras, coloração mais clara. E por fim, na Figura 67 está apresentado o lodo com aspecto granular ou encolhido, mais seco, cor mais clara na camada mais exposta do que as camadas inferiores com 22 dias de secagem.



Figura 65 – Aspecto pastoso do lodo com 1 dia de secagem durante o TP 1.



Figura 66 - Aspecto do lodo com rachaduras com 14 dias de secagem durante o TP 1.



Figura 67 - Aspecto granular do lodo com 22 dias de secagem durante o TP 1.

5.3 Etapa 3 - Levantamento de dados de leito de secagem com piso de blocos drenantes em operação.

Na Tabela 25 estão apresentados os dados compilados dos questionários respondidos de três operadores de ETE que contém leito de secagem com piso de blocos drenantes.

Tabela 25 - Informações sobre leitos de secagem com piso de blocos drenantes em operação.

Localidade e Característica da Planta						
ETE	Cidade	Capacidade (m³/d)	Processo de Tratamento de Esgoto Sanitário	Processo de Digestão de lodo	Método de Destinação de lodo	Método de remoção de lodo no leito
A	Itu	60	Aeróbio	Aeróbio	Aterro	Manual
B	Ubatuba	4.492,8	Aeróbio	Aeróbio	Aterro	Manual
C	Camaçari	148.800	Aeróbio	Aeróbio	Fazenda de lodo	Manual
Característica do lodo						
ETE	%ST do lodo bruto	%ST final desejado	%ST final alcançado	Volume de lodo seco	Adição de produto químico?	Dosagem
A	<1	>90%	>90%	7m³ a cada 3 meses	Polímero	25 ppm
B	-	-	-	4000 ton/mês	Polímero	-
C	1 – 1,5	-	-	15 ton/d	Polímero	50 – 400 ppm
Sistema de Desaguamento						
ETE	Nº de leitos	Tamanho dos leitos	Ciclo operacional	Tipo de exposição	Taxa de carregamento	Método de limpeza
A	3	26,23m²	2/mês	Cobertura transparente	-	Rastelo/Pressão de água
B	13	37,5m²	2/mês	Cobertura transparente	-	Pressão de água
C	1	7m²	-	Céu aberto	22kg/m²	Pressão de água

continua

continuação

Desempenho no Desaguamento						
ETE	Camada inicial de lodo	Camada final de lodo	Número de bateladas	Tempo de drenagem	Tempo de secagem	Tempo total de desaguamento
A	10 – 15 cm	5 – 8 cm	1	2 – 4 horas	7 a 15 dias	8 – 16 dias
B	20 cm	2 cm	1	1 hora	8 dias	9 dias
C	41 cm	15 cm	1	2 – 3 dias	27 -28 dias	30 dias

O primeiro relatório recebido (A) foi do responsável pela mesma ETE utilizada no monitoramento da Etapa 1, em Itu. Conforme o relatório recebido, o leito de secagem possui três células de 26m² cada uma e é descartado em torno de 8m³ de lodo aeróbio condicionado a cada quinze dias.

Segundo o responsável, após a implantação do leito de secagem com piso de blocos drenantes, os custos de transporte e disposição de lodo caíram muito, pois antes o lodo era destinado sem desaguamento algum. Atualmente eles destinam aproximadamente 7m³ de lodo seco com mais de 90% de sólidos totais a cada três meses. Isso foi possível devido o leito ter sido dimensionado conforme as recomendações de projeto para um leito convencional, o que se tornou superdimensionado para o sistema, por ser leito com piso de blocos drenantes. Então, como há disponibilidade de espaço e tempo a cada descarte quinzenal, o lodo permanece no leito até secar ao seu máximo, e isso fez com que o volume diminuísse significativamente. Outra vantagem importante destacada pelo responsável da ETE foi a facilidade para remoção de lodo seco e limpeza do leito. Na Figura 68 está apresentado o leito de secagem da ETE da indústria de componentes eletrônicos e o questionário respondido encontra-se no Anexo C.



Figura 68 - Descarte de lodo aeróbio e amostra da água drenada nos blocos drenantes.

O segundo relatório (B) foi do responsável por uma ETE de Ubatuba. O método de tratamento de esgoto sanitário da ETE é de lodos ativados por batelada e trata em torno de 4.500m³/d. Segundo o responsável, o leito de secagem foi construído em 1999 como leito convencional de areia. Devido a problemas com drenagem lenta e colmatção constante do meio filtrante, a concessionária resolveu testar e adaptar o leito com os pisos de blocos drenantes. As camadas de tijolo e areia foram removidas do leito convencional, foi colocado uma malha de ferro sobre a camada de brita e os blocos drenantes apoiados sobre esta malha. Assim foi possível aproveitar o mesmo sistema de coleta de drenagem do leito existente. Conforme o relatório, a drenagem do lodo tornou muito mais rápida e consequentemente a secagem também. Na Figura 69 está apresentado o leito de secagem da ETE e o questionário respondido no Anexo C.

O terceiro relatório (C) foi de um leito piloto com piso de blocos drenantes construído a fim de validação de tecnologia na ETE em Camaçari/BA operada por uma concessionária privada.

Segundo o responsável pelos testes, o lodo descartado foi do tipo aeróbio com teor de sólidos em torno de 1,5% e a taxa de aplicação foi de 22kgST/m², ou seja, maior do que o recomendado pela NBR 12209 (ABNT, 2011). Conforme o relatório os problemas encontrados durante os testes foram: um bloco quebrado devido ao uso da pá na limpeza, passagem de sólidos pelos blocos quando não se atingia uma boa floculação com polímero e ainda, acúmulo de lodo embaixo dos blocos que foi identificado como erro de projeto na inclinação do mesmo e, após a correção, a drenagem ocorreu perfeitamente sem acúmulo

de lodo. Segundo o responsável, a vantagem do sistema foi o teor de sólidos final alcançado e a economia de energia comparado ao uso de centrífugas. Na Figura 70 está apresentado o leito piloto na ETE em Camaçari.



Figura 69 - Leito de secagem adaptado com piso de blocos drenantes na ETE em Ubatuba.



Figura 70 - Leito piloto com piso de blocos drenantes na ETE em Camaçari.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Principal

O trabalho realizado e apresentado revisou as etapas para um correto gerenciamento de lodo de ETE com ênfase no desaguamento natural por leitos de secagem. O meio filtrante estudado foi o do tipo bloco drenante (*wedge wire*), tecnologia pouco explorada.

Os resultados da Etapa 1 do trabalho foram obtidos através de um acompanhamento de operação de ciclos de descarte e secagem de lodo em escala real. Apesar de algumas variáveis não terem sido repetidas para todos os descartes, como por exemplo, a medição de vazão de descarte e a caracterização do drenado, o monitoramento pôde contribuir apresentando variações, influências, e problemas que ocorrem em escala real, como por exemplo as variações das condições climáticas e os problemas mecânicos nas bombas.

Para lodo aeróbio condicionado com polímero, o leito de secagem com piso de blocos drenantes se mostrou eficiente em fornecer uma drenagem rápida, praticamente instantânea quando lodo está bem floculado e, constante, com um drenado bem clarificado.

Apesar da secagem do lodo ser dependente do tipo de lodo e condições climatológicas, o piso de bloco drenante se mostrou eficiente, principalmente na operação como um todo, pois permite uma boa distribuição do lodo, atingir altas concentrações de ST, e retém menos umidade porque a água drena totalmente de forma mais rápida.

Os resultados da Etapa 2 obtidos a partir de ensaios em escala piloto de leito com piso de blocos drenantes com lodo anaeróbio também se mostraram satisfatórios, apesar de ter apresentado uma drenagem mais lenta e qualidade da água drenada inferior quando comparado com lodo aeróbio condicionado com polímero.

Em relação a secagem, a falta de existência da cobertura no leito piloto confirmou a importância deste adicional nos projetos de leito, pois a incorporação de água devido às chuvas atrapalha a secagem, como ocorreu no TP 3.

Ao analisar o comportamento da secagem dos dois tipos de lodo, percebe-se uma diferença ao observar as curvas de secagem. Entretanto, houve uma coincidência entre eles na etapa de drenagem. Na Etapa 1, a variação de vazão no descarte não alterou significativamente o teor de sólidos totais após 24h, os testes ficaram em torno de 6%ST. E na Etapa 2, fixando a vazão e variando o teor inicial de sólidos totais e consequentemente a TAS, após 24h do descarte também não houve alteração significativa de teor de sólidos totais entres os testes, todos apresentaram em torno de 13 a 14%ST.

Ao analisar a opinião dos responsáveis por leitos com piso de blocos drenantes em operação apresentados na Etapa 3, é possível afirmar que há vantagens na sua utilização comparado ao leito convencional devido ao melhor desempenho na drenagem e secagem e, também, pela maior facilidade de limpeza e baixa manutenção.

6.2 Específicas

Baseado no trabalho realizado com os leitos de secagem com piso de blocos drenantes, concluiu-se na Etapa 1 que:

- A redução de volume durante o descarte de lodo aeróbio quando atinge ótima floculação pode chegar a 60%, após 1h reduz em 70%, e após 24h em 90% do volume inicial.
- Lodo aeróbio condicionado com polímero nas condições apresentadas atinge teor de sólidos em torno de 6% após a fase de drenagem;
- É possível aplicar cargas hidráulicas mais altas comparadas a outros tipos de leitos quando a válvula de saída permanecer aberta e o lodo estiver floculado;
- O volume de lodo drenado é maior no início, quando possui maior pressão de camada d'água formada;
- A água drenada apresenta baixa turbidez e SST quando descarta lodo aeróbio condicionado com polímero com desempenho similar a desaguamentos mecânicos;
- A secagem do lodo ocorre em 2 fases, sendo que na 1ª fase o volume e altura de camada aplicado não altera a velocidade de secagem, dependendo apenas de fatores intrínsecos do lodo, por outro lado na 2ª fase, a altura de camada de lodo após a drenagem altera a velocidade de secagem;
- Fatores extrínsecos como temperatura, umidade e radiação alteram a velocidade de secagem durante a 2ª fase de secagem, ou a partir da 2ª fase crítica de umidade;

- A umidade do lodo durante a transição de taxa decrescente constante e taxa decrescente é de 80%, ou 20%ST para lodo aeróbio digerido condicionado;
- Nos 15 primeiros dias de secagem a maior perda de umidade ocorre na drenagem, em que o teor de sólido total passa de 0,6% para 6% em média (10 vezes mais), com exceção para o Teste 3 que o lodo não flocculou bem;
- A umidade máxima que o lodo pode atingir, conhecida como umidade de equilíbrio, depende da umidade do ar do ambiente de secagem para um mesmo tipo de lodo;
- Revolvimento do lodo promove uma curva gradual constante, porém não acelera significativamente a secagem quando comparado os Testes 1 (sem revolvimento) e 2 (com revolvimento).
- A estufa além de proteger o lodo da chuva, aumenta a temperatura e reduz a umidade interna ao leito, o que é favorável na secagem do lodo;
- A secagem depende de um bom desaguamento, que por ora depende de uma boa operação no sistema de condicionamento.

Em relação a Etapa 2 com testes piloto com lodo anaeróbio, concluiu-se que:

- Maior estabilidade na vazão de drenagem quando o lodo é mais concentrado;
- A redução de volume após 24h do descarte é em torno de 70% para o lodo anaeróbio sem polímero, independente da concentração inicial de sólidos;
- A redução no momento do descarte de lodo é dependente da concentração de sólidos no lodo, quanto maior a concentração mais lenta a drenagem;
- A camada de lodo sedimentado formado sob o piso de bloco drenante contribui para uma melhor qualidade da água drenada quando não se usa polímero;
- A secagem de lodo anaeróbio apresenta uma secagem mais rápida durante a 1ª fase de taxa de velocidade decrescente do que o lodo aeróbio;
- Por outro lado, o lodo anaeróbio atinge teor de sólidos final menor do que o lodo aeróbio.
- As condições climáticas, principalmente quando o leito não possui cobertura transparente, é determinante no processo de secagem natural, afetando a eficiência do sistema.

6.3 Recomendações

A partir dos resultados obtidos e discussões, para obter maiores conclusões recomenda-se:

- Realizar teste de bancada para ser possível medir a taxa de desaguamento ($t \times V^2$);
- Medir a qualidade do drenado quanto a SST para lodo aeróbio condicionado e o volume drenado para conhecer a eficiência de captura de sólidos;
- Realizar análise do teor de sólidos inicial para determinação da taxa de aplicação de sólidos em todos os ensaios de lodo aeróbio;
- Condicionar o lodo anaeróbio e comparar a melhoria da eficiência durante a fase de drenagem do desaguamento;
- Caracterizar o lodo quanto a quantidade de matéria orgânica e relacionar com o desempenho na secagem.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. de Q. **Análise de processo alternativo Wedge-Wire para desaguamento de lodo de estação de tratamento de esgotos domésticos**. Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2012. 29p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22° ed. Washington. 2005.

ANDREOLI *et al.* **Desidratação de Lodo de Esgotos**. In: ANDREOLI, C.V. (coord). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro. ABES. 2001. Cap III. pag 57-86.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10664**: Águas - determinação de resíduos (sólidos) – Método gravimétrico – Método de ensaio. Brasília 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário. Brasília 2011.

BARROSO, M. M. **Influência das micro e macropropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas no desaguamento por Leito de Drenagem**. 2007. 249 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), São Carlos, 2007.

BENAMOUN, L. **Solar drying of wastewater sludge: a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16° ed. Elsevier, 2012. Pág. 1061-1073.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 9.605, de 13 de fevereiro de 1998**. Brasília, DF, Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm>. Acesso em: 28 de agosto de 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Brasília, DF, Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 28 de agosto de 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21 da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>>. Acesso em: 24 de abril de 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **PLANSAB – Plano Nacional de Saneamento Básico**. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/AECBF8E2/Plansab_Versao_Consehos_Nacionais_020520131.pdf>. Acesso em: 24 de abril de 2017.

BRASIL. Assembleia Executiva. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Brasília, DF, Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em: 28 de agosto de 2016.

BRASIL. **Resolução CONAMA N.º 375 de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2006a, 32 p.

BRASWORLD. **Imagem bloco drenante**. Disponível em: <<http://www.brasworld.net/site/secagem-de-lodo/bloco-drenante/>>. Acesso em: 30 de julho de 2015.

COMPARINI, J.B.; **Estudo do decaimento de patógenos em bio sólidos estocados em valas e em bio sólidos submetidos à secagem em estufa agrícola**. Tese Doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. 278p.

CORDEIRO, J. S. **Processamento de lodos de estação de tratamento de água**. In: ANDREOLI, C.V. (coord). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro. ABES. 2001. Cap V. pag 119-142.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. Dissertação Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica USP, São Paulo. 2002. 163p.

FAJARDO, P. A; **Proposta de instrumentos para a realização de análise ambiental inicial em ETEs à luz da NBR ISO 14001:2004: O caso da ETE Monjolinho, São Carlos-SP**. Dissertação Mestrado em Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP. 2014. 231p.

FERREIRA, A. C. **Monitoramento da secagem e desinfecção de lodo anaeróbico em leito de secagem com uso de estufa plástica e biogás**. Dissertação Mestrado em Agronomia. Universidade Federal do Paraná. 2001. 112p.

FERNANDES, F; SOUZA, S. G. **Estabilização de lodo de esgoto**. In: ANDREOLI, C.V. (coord). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro. ABES. 2001. Cap II. pag 29-27.

FRANÇA, J. T. L. **Remoção de lodo de lagoa facultativa: Avaliação quantitativa e qualificativa do lodo acumulado e seu acondicionamento em Bag.** Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010, 169p.

FRANÇA, J. T. L. **Avaliação do desempenho da modificação de um sistema de tratamento de esgoto composto por tanque séptico e filtro anaeróbio por um modelo de aeração compartimentada.** Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012, 254p.

GRAVITY FLOW SYSTEM. GFS Wedgewater Filter Bed. Disponível em: <<http://www.gravityflow.com/>>. Acesso em: 10 de abril de 2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2013/default.shtm>. Acesso em: 28 agosto de 2016.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em: 10 de outubro de 2016 e 03 de janeiro de 2017.

JORDÃO, E. P; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 7º edição. Rio de Janeiro. ABES, 2014. 1050p.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto.** Tese Doutorado em Engenharia Hidráulica. Universidade de São Paulo – USP. 2010. 286p.

MATHIOUDAKIS, V. L. *et al.* **Extended dewatering of sewage sludge in solar drying plants.** Dessalination 248 ed. Elsevier, 2009. Pág. 733-739.

MELO, A. S. **Contribuição para dimensionamento de leitos de secagem de lodo.** Dissertação Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2006. 82p.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery.** 5th Edition, McGraw-Hill, New York, USA. 2014.

MIKI, M. K. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas.** Dissertação Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998. 425p.

MORTARA, F. C. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios.** Dissertação Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011. 241p.

RADAIDEH, J. A., AMMARY, B.Y., AL-ZBOON, K.K. **Dewaterability of sludge digested in extended aerations plants using conventional sand drying beds.** *African Journal of Biotechnology*. Julho, 2010, Vol 9(29), pp. 4578-4583.

REIS, R. F. dos. **Estudo de influência da cobertura plástica na remoção de água de lodos de estações de tratamento de água em leitos de drenagem**. Dissertação Mestrado Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011, 133p.

RUIZ, T. et al. **Influence of organic content in dewatering and shrinkage of urban residual sludge under controlled atmospheric drying**. Institution of Chemical Engineers, 2017. Vol 85 (B1) 104-110p. Disponível em: <[http://www.psep.ichemejournals.com/article/S0957-5820\(07\)71392-7/abstract](http://www.psep.ichemejournals.com/article/S0957-5820(07)71392-7/abstract)>. Acesso em: 25 de abril de 2017.

SALIHOGU, N. K.; PINARLI, V.; SALIHOGU, G. **Solar drying in sludge management in Turkey**. Renewable Energy 32 ed. Elsevier, 2007. Pág. 1661-1675.

SANTOS, B. *et al.* **Avaliação de sistema de leito de drenagem do desaguamento de lodo de estação de tratamento de água com ênfase na influência dos agentes externos na fase de secagem**. Ciência & Engenharia. Pág. 65-71. Jan-Jun, 2014.

SANTOS, D. S. *et al.* **Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbio de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Volume 22, n. 21. Pág. 341-349. Mar-Abr, 2017.

SAYEG, C. *et al.* **Parâmetros operacionais da prensa-parafuso no desaguamento de lodos de ETE**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. Disponível em: <http://marcelomiki.tripod.com/artigospdf/2005ABES_PParafuso.pdf>. Acesso em: 05 de junho de 2017.

SILVA, S.M.C. da; POHLMANN, M. **Eficiência de leito de secagem com piso de blocos drenantes**. Hydro, ano 8, n. 90, p. 38-43, abril 2014.

SNIS - Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **20º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília: Ministério das Cidades, 2014. 212 p.

SKINNER, S. J. *et al.* **Quantification of wastewater sludge dewatering**. Water Research, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.045>>. Acesso em: 25 de outubro de 2016.

SOUZA, L. O. **Uso de geotêxtil para desidratação de lodo da ETE Vila da Barca-PA**. Dissertação Mestrado Universidade Federal do Pará, Belém, 2016, 110p.

SOUZA, W. G de. **Pós-secagem natural de lodos de estações de tratamento de água e esgotos sanitários**. São Paulo, 2012. 132p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

TROESCH S. *et al.* **Sludge drying reed beds: full and pilot scale study for activated sludge treatment**. Water Science Technology, 2009, 60 (5), pp 1145-1154.

USACERL (US Army Corps of Engineers Research Laboratory) – **Performance Evaluation of Existing Wedgewater and Vacuum-Assisted Beds Dewatering Systems.** 1992.

USEPA. **Design manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludge.** 1a ed. Cincinnati: EPA, 1987.

USEPA. **Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under.** Washington, DC. 1992 (EPA, n.40, CFR part 503).

VAN HAANDEL, A.; CAVALCANTI, P. F. F. **Geração e Composição de Lodo em Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários.** In: ANDREOLI, C.V. (coord). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro. ABES. 2001. Cap I. pag 3-27.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGA, G. (1994). **Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with Hot Climates.** John Wiley & Sons, Inc., Chichester, U.K. 1994 p.226.

VAN HAANDEL, A.C.; MARAIS, G. **O comportamento do Sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projetos e operação.** Campina Grande. 1999. 488p.

VANZETTO, A. S.; **Análise das alternativas tecnológicas de desaguamento de lodos produzidos em estações de tratamento de esgoto.** Dissertação Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade de Brasília, Distrito Federam. 2012. 185p.

VESILIND, P. A. **Sludge management and disposal for the practicing engineer.** Chelsea, 1986.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. **Activated sludge and aerobic biofilm reactors.** 1. ed. Londres: IWA Publishing, 2007. v. 5. 336p.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. **Sludge treatment and disposal.** 1. ed. Londres: IWA Publishing, 2007. v. 6. 244p

WANG, L.K. *et al.* **Drying Beds.** In: **Handbook of Environmental Engineering,** Volume 6: Biosolids Treatment Processes. Totowa, NJ: Wang et al, 2007. cap 13, p. 403-430.

WATER ENBIRONAMENTAL FEDERATION. **Waste water residuals stabilization – manual of practice.** Alexandria. 1995. 244p.

ANEXO A – Dados de temperatura e umidade dentro do leito de secagem durante a Etapa 1.

Tabela 26 - Leituras de temperatura e umidade dentro do leito durante Teste 1.

Data	Temperatura dentro do leito (°C)	Temperatura externa (°C) (INMET, 2015)	Umidade dentro do leito (%)	Umidade externa (%) (INMET, 2015)	Hora da leitura	Observação
15/abr	34	27	50	60	15:00	Nublado/chuvoso
16/abr	26,5	22	68	77	17:00	Nublado
17/abr	38,2	28	23	52	15:00	Ensolarado
22/abr	28	26	69	84	17:00	Nublado/chuvoso
27/abr	39,9	28	27	52	17:00	Ensolarado
29/abr	25,5	21	60	68	17:00	Ensolarado
04/mai	23,4	18	85	93	17:00	Chuvoso
05/mai	28,8	24	57	64	15:00	Ensolarado
06/mai	25,8	22	62	74	17:00	Ensolarado/nublado
07/mai	23,8	19	60	70	17:00	Nublado com vento
11/mai	23,6	17	61	94	16:00	Chuvoso/nublado
12/mai	29,1	23	49	65	14:00	Ensolarado
19/mai	23,9	18	66	72	17:00	Ensolarado/nublado

Tabela 27 - Leituras de temperatura e umidade dentro do leito durante Teste 2.

Data	Temperatura dentro do leito (°C)	Temperatura externa (°C) (INMET, 2015)	Umidade dentro do leito (%)	Umidade externa (%) (INMET, 2015)	Hora da leitura	Observação
15/jul	27	23	60	76	10:00	Ensolarado
16/jul	29,6	24	49	62	17:00	Ensolarado
17/jul	26,3	23	51	62	15:00	Nublado
20/jul	30,5	24	41	48	16:00	Ensolarado
21/jul	23,1	20	64	79	17:00	Nublado/chuvoso
22/jul	20,3	18	66	81	10:00	Nublado
23/jul	30,4	27	43	48	17:00	Ensolarado
27/jul	29,7	25	30	60	14:00	Ensolarado
28/jul	29,4	25	24	41	17:00	Ensolarado
29/jul	33,2	24	31	41	14:00	Ensolarado
30/jul	31,5	23	29	40	17:00	Ensolarado
03/ago	35	26	24	48	17:00	Ensolarado
07/ago	29	26	37	46	12:00	Ensolarado
10/ago	34,1	27	29	45	17:00	Ensolarado
11/ago	35,6	28	30	44	17:00	Ensolarado
12/ago	33,2	27	28	41	17:00	Ensolarado
17/ago	32,7	28	23	34	17:00	Ensolarado
18/ago	27,8	26	35	38	17:00	Nublado
20/ago	30,4	18	32	68	17:00	Ensolarado
24/ago	23,5	17	54	80	17:00	Nublado/Chuvoso
27/ago	16,4	18	100	58	17:00	Chuvoso
31/ago	30,6	24	45	60	17:00	Ensolarado
01/set	31,2	22	35	59	17:00	Ensolarado
02/set	27	23	60	76	10:00	Ensolarado

Tabela 28 - Leituras de temperatura e umidade dentro do leito durante Teste 3.

Data	Temperatura dentro do leito (°C)	Temperatura externa (°C) (INMET, 2015)	Umidade dentro do leito (%)	Umidade externa (%) (INMET, 2015)	Hora da leitura	Observação
29/set	29,4	26	38	62	17:00	Nublado
30/set	27	24	100	100	17:00	Chuvoso
01/out	33,3	27	30	66	17:00	Nublado
05/out	31,9	24	20	59	17:00	Ensolarado
06/out	35,8	27	30	53	17:00	Ensolarado
07/out	41,5	32	30	41	17:00	Ensolarado
08/out	41,3	34	20,4	34	17:00	Ensolarado
13/out	29,9	25	36	43	17:00	Nublado
15/out	38,4	33	27	37	17:00	Ensolarado
19/out	43,4	28	0*	53	17:00	Ensolarado
20/out	42,1	35	0*	27	17:00	Ensolarado
22/out	21,6	22	100	92	17:00	Ensolarado
26/out	39,3	28	0*	56	17:00	Ensolarado
29/out	40	28	0*	50	17:00	Ensolarado
03/nov	35,8	29	29	41	17:00	Nublado

Tabela 29 - Leituras de temperatura e umidade dentro do leito durante Teste 4.

Data	Temperatura dentro do leito (°C)	Temperatura externa (°C) (INMET, 2016)	Umidade dentro do leito (%)	Umidade externa (%) (INMET, 2016)	Hora da leitura	Observação
14/jan	35,3	29	48	62	17:00	Nublado
18/jan	38,5	28	42	60	17:00	Nublado
21/jan	42,9	30	30	43	17:00	Ensolarado
25/jan	44	30	31	40	17:00	Ensolarado
28/jan	42,5	32	29	50	17:00	Ensolarado
01/fev	43,4	33	28	34	17:00	Ensolarado
02/fev	41	32	26	34	17:00	Ensolarado
04/fev	47,5	35	25	33	17:00	Ensolarado

ANEXO B – Dados de temperatura e umidade ambiente durante a Etapa 2.

Tabela 30 - Médias diárias dos dados climáticos extraídos do INMET (2016) durante o TP 1.

Data	Temperatura (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)	Precipitação (mm)
10/mai	18,0	85,5	1,7	14572,8	11,4
11/mai	17,4	89	0,0	11014,3	0,2
12/mai	18,0	86	1,2	13175,6	0,2
13/mai	18,3	79	2,2	10200,0	0
14/mai	18,5	75	1,8	16831,6	0
15/mai	18,9	73,5	3,0	16563,6	0
16/mai	19,9	78,5	2,5	13620,7	29,6
17/mai	18,4	95	0,7	12230,5	21,6
18/mai	17,7	89	0,1	5386,9	1
19/mai	17,6	93	1,5	18982,0	0
20/mai	19,2	85	1,8	23010,7	0
21/mai	18,9	91,5	1,8	6895,5	51,2
22/mai	20,3	84,5	1,6	24644,5	0
23/mai	16,4	86,5	1,3	12910,7	1,4
24/mai	13,0	69	2,9	25333,8	0
25/mai	15,2	77,5	2,3	23900,6	0
26/mai	16,6	81,5	1,2	22499,4	0
27/mai	18,2	75,5	1,3	10179,3	0
28/mai	18,5	76	1,5	19968,2	0
29/mai	16,4	84,5	1,7	9511,3	1
30/mai	14,7	94,5	0,4	11999,9	14,8
31/mai	16,3	93,5	1,5	10775,6	18,8
01/jun	17,3	94	1,0	26294,5	22,6
Média	18,0	85	1,5	13620,7	0,2
Acumulado	-	-	-	334207,5	151,2

Tabela 31 – Médias diárias dos dados climáticos extraídos do INMET (2016) durante o TP 2.

Data	Temperatura (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)	Precipitação (mm)
27/ago	19,3	51,0	1,5	21237,0	0
28/ago	21,0	51,5	1,7	20312,6	0
29/ago	22,6	51,0	2,1	20098,5	0
30/ago	23,3	58,0	1,9	14983,3	0
31/ago	16,2	93,0	1,8	9670,4	18
01/set	16,9	93,5	1,4	20999,9	0
02/set	20,6	67,0	2,0	19895,7	0
03/set	20,4	74,0	2,1	15031,9	1,8
04/set	19,4	79,5	1,4	6888,4	0,2
05/set	20,6	84,0	1,4	20033,0	0
06/set	17,6	90,0	1,1	10756,9	8,4
07/set	16,4	93,0	1,4	9345,3	0,2
08/set	16,5	81,0	0,9	23249,8	0,4
09/set	18,6	66,5	1,4	22393,2	0
10/set	21,1	69,5	1,6	22058,2	0
11/set	22,8	60,0	1,8	22453,5	0
12/set	22,3	54,0	1,8	21789,8	0
13/set	24,4	42,5	2,4	17807,8	0
14/set	23,2	44,0	1,9	14829,2	0
15/set	20,2	40,5	1,2	20135,4	0
16/set	20,2	40,5	1,2	20135,4	0
17/set	20,5	49,5	2,1	20475,7	0
18/set	23,6	60,5	1,8	20466,1	0
19/set	21,6	67,0	2,6	17530,7	10,6
20/set	19,2	75,0	1,9	18423,8	0
Média	20,5	66,5	1,8	20098,5	0
Acumulado	-	-	-	451001,7	39,6

Tabela 32 - Médias diárias dos dados climáticos extraídos do INMET (2016) durante o TP 3.

Data	Temperatura (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)	Precipitação (mm)
19/nov	16,2	64,0	3,6	30255,1	0
20/nov	19,3	56,5	2,3	31390,7	0
21/nov	21,6	56,5	1,7	27757,0	0
22/nov	21,7	78,5	1,8	18578,5	14
23/nov	20,6	86,0	1,8	12914,4	0,2
24/nov	22,6	77,5	1,2	18346,7	0
25/nov	23,7	67,0	1,7	25080,9	0
26/nov	23,9	66,0	1,8	18303,3	0
27/nov	23,3	67,0	1,9	22636,2	0
28/nov	22,7	76,5	1,7	25507,1	2
29/nov	22,1	85,5	1,4	14611,7	13,8
30/nov	19,7	77,0	3,8	24565,2	0
01/dez	21,1	69,0	2,3	18122,4	0
02/dez	22,2	72,0	1,8	19884,0	0
03/dez	21,8	83,0	2,3	11988,0	7,2
04/dez	20,0	93,0	2,3	10589,3	11
05/dez	22,4	83,5	1,8	24718,6	0,2
06/dez	23,6	65,5	1,0	28945,7	0
07/dez	22,1	66,0	1,8	25815,5	7,6
08/dez	21,1	87,0	1,7	25447,0	10,8
09/dez	21,1	90,5	1,8	18337,0	86,4
10/dez	21,4	90,0	1,4	18596,6	22,2
11/dez	22,1	91,0	1,7	14464,7	16
12/dez	21,9	93,0	1,6	16667,0	10,8
Média	21,8	77,3	1,8	19240,265	0,2
Acumulado	-	-	-	503522,74	202,2

ANEXO C – QUESTIONÁRIO PARA LEITOS DE BLOCOS DRENANTES EXISTENTES

Cidade: Modelo

Sistema de Desaguamento de lodo: Leito de secagem com blocos drenantes

Satisfeito () Insatisfeito ()

Nome de Planta: _____

Endereço: _____

Responsável/ Operador: _____

1) Características da Planta

Capacidade: _____

Processo do Tratamento do Efluente: _____

(Anaeróbio/Aeróbio ou Misto) _____

Processo de Digestão do Lodo _____

Método de Disposição do Lodo _____

2) Características do Lodo

% de sólidos do lodo bruto: _____

Teor de sólidos final desejado: _____

Teor de sólidos final alcançado: _____

Geração de Volume de Lodo Seco: _____

Adição de produto químico? Qual? _____

3) Sistema de Desaguamento

Número de leitos: _____

Tamanho dos leitos (m²): _____

Dimensões dos leitos: _____

Ano de construção: _____

Leito construído com bloco drenante ou adaptado? _____

Ciclo operacional (ex: 2 por mês/ 12 por ano): _____

Ciclo de reposição do bloco drenante: _____

Tipo de exposição (céu aberto, cobertura tipo estufa): _____

Taxa de carregamento de lodo do projeto (kgST/m²): _____

4) Desempenho no desaguamento

Profundidade inicial de lodo: _____

Profundidade final de lodo: _____

Número de camada de lodo (descartes em bateladas?): _____

Tempo de drenagem: _____

Tempo de secagem: _____
Tempo total desaguamento: _____

5) **Dados do polímero**

Nome: _____
Fabricante: _____
Dosagem: _____
Custo: _____

6) **Limpeza**

Método (manual ou máquina, utiliza água?) _____
Frequência: _____
Duração: _____

7) **Remoção de lodo**

Método: _____
Tipo de Máquina: _____
Peso: _____

8) **Custos da construção:**

9) **Problemas** (ex. Bloco drenante quebrado, bloco drenante entupido, drenagem lenta)

10) **Remediações**

11) **Vantagens do sistema**

12) **Comparação com outro sistema de desaguamento utilizado:**

Sistema de Desaguamento de lodo: Leito de secagem com blocos drenantes

Cidade: Itu/SP

Satisfeito (x) Insatisfeito ()

Nome de Planta: ETE “A”

Endereço: Rodovia Castelinho

Responsável/ Operador: Leandro Marin

1) Características da Planta

Capacidade: 60m³/d

Processo do Tratamento do Efluente: Valo de oxidação
(Anaeróbio/Aeróbio ou Misto) aeróbio

Processo de Digestão do Lodo: aeróbio, no próprio valo de oxidação

Método de Disposição do Lodo: atualmente Aterro sanitário, mas avaliando outras alternativas

2) Características do Lodo

% de sólidos do lodo bruto: < 1%

Teor de sólidos final desejado: como nosso leito foi superdimensionado, temos a disponibilidade de deixar secar ao máximo, o que nos ajuda muito na redução de volume final, sempre tentamos chegar acima de 90% de sólidos.

Teor de sólidos final alcançado: geralmente acima de 90%

Geração de Volume de Lodo Seco: uma caçamba de 7m³ a cada 3 meses mais ou menos.

Adição de produto químico? Qual? Após desaguamento no leito não.

3) Sistema de Desaguamento

Número de leitos: 3 células

Tamanho dos leitos (m²): 26,23 m² cada.

Dimensões dos leitos: mais ou menos 6,2 x 4,3 m

Ano de construção: 2012

Leito construído com bloco drenante ou adaptado? Bloco drenante desde o início.

Ciclo operacional (ex: 2 por mês/ 12 por ano) 1 descarte a cada 15 dias, dependendo da concentração de lodo no valo.

Ciclo de reposição do bloco drenante: nenhum

Tipo de exposição (céu aberto, cobertura tipo estufa) cobertura estufa

Taxa de carregamento de lodo do projeto (kgST/m²) _____

4) Desempenho no desaguamento

Profundidade inicial de lodo: 10 a 15 cm

Profundidade final de lodo: depois da drenagem de 5 a 8cm, depois da secagem 1 cm

Número de camada de lodo (descartes em bateladas?) _só uma

Tempo de drenagem: 2 a 3 horas

Tempo de secagem: 7 a 15 dias

Tempo total desaguamento: de 1 a 1h e 30min.

5) **Dados do polímero**

Nome: Praestol

Fabricante: Ashland

Dosagem: 25ppm

Custo: _____

6) **Limpeza**

Método (manual ou máquina, utiliza água?) manual, rastelo ou vassoura e mangueira de alta pressão se necessário.

Frequência sempre após remoção de lodo.

Duração: quando o lodo esta seco é muito rápido, em 15 min por leito. Quando não esta tão seco, como o volume é maior demora mais.

7) **Remoção de lodo**

Método: pá

Tipo de Máquina _____

Peso: de 40 a 50kg por leito.

8) **Custos da construção:** Em torno de R\$700,00 o m² construído já instalado.

9) **Problemas** (ex. Bloco drenante quebrado, bloco drenante entupido, drenagem lenta)

Foram trocados poucos blocos por ter quebrado entre as aberturas devido o gancho do rastelo. Nunca houve entupimento.

10) **Remediações**

11) **Vantagens do sistema**

Drenagem muito rápida, água filtrada transparente, secagem com tempo bom é em 10 dias, e a limpeza também não demanda muito esforço.

12) **Comparação com outro sistema de desaguamento utilizado:**

Não utilizamos outro sistema nesta ETE para comparar.

Cidade: UBATUBA

Sistema de Desaguamento de lodo: Leito de secagem com blocos drenantes

Satisfeito (x) Insatisfeito ()

Nome de Planta: ETE “B”

Endereço: RODOVIA OSWALDO CRUZ, 2888 - IPIRANGUINHA

Responsável/ Operador: LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA

Características da Planta



A ETE Ipiranguinha trata esgoto sanitário pelo processo de Sistema Lodos Ativados por Batelada.

Foi implantada em 1999 na Rua das Bananas s/n, tem capacidade de téorica de tratamento de 52 l/s, ocupando uma área estimada de 5.249,19 m². Atende apenas o Bairro Ipiranguinha.

Capacidade: ATUAL 52 L/S

Processo do Tratamento do Efluente: LODO ATIVADO POR BATELADA

(Anaeróbio/Aeróbio ou Misto): AERÓBIO

Processo de Digestão do Lodo: DIGESTÃO AERÓBIA

Método de Disposição do Lodo: ATERRO SANITARIO APÓS DESIDRATAÇÃO

1) Características do Lodo

% de sólidos do lodo bruto:

Teor de sólidos final desejado:

Teor de sólidos final alcançado:

Geração de Volume de Lodo Seco: MÉDIA 4000 TONELADAS MÊS – OBS:

devido a problemas de operação na ETE, além do descarte transferimos o lodo líquido para ser desidratado em outra estação.

Adição de produto químico? Qual?: RAPFLOC

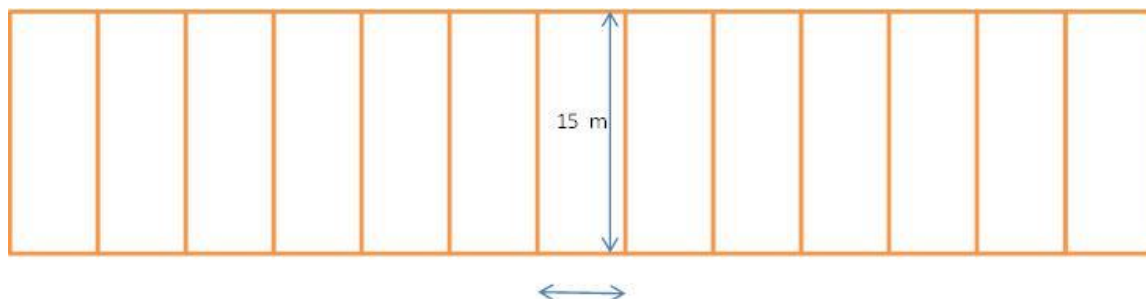
2) Sistema de Desaguamento

Número de leitos: 13 LEITOS

Tamanho dos leitos (m²): 37,5 M²

Dimensões dos leitos: 15m x 2,5m x 0,70m

Ano de construção: 1999



Leito construído com bloco drenante ou adaptado? ADAPTADO

Ciclo operacional (ex: 2 por mês/12 por ano): 2 POR MÊS

Ciclo de reposição do bloco drenante: AINDA NÃO FOI NECESSÁRIO

Tipo de exposição (céu aberto, cobertura tipo estufa): COBERTURA TIPO ESTUFA

Taxa de carregamento de lodo do projeto (kgST/m²): _____

3) Desempenho no desaguamento

Profundidade inicial de lodo: 20 CM

Profundidade final de lodo: 2 CM

Número de camada de lodo (descartes em bateladas): UMA

Tempo de drenagem: 1 HORA

Tempo de secagem: MEDIA 8 DIAS COM SOL E BAIXA UMIDADE DO AR

Tempo total desaguamento: 1 DIA

4) Dados do polímero

Nome: RAPFLOC C 4030

Fabricante: RELUZ QUIMICA

Dosagem: _____

Custo: MEDIA R\$11,90/KG

5) Limpeza

Método (manual ou máquina, utiliza água?): LAVADORA PRESSÃO - AGUA

Frequência: AINDA NÃO FOI NECESSÁRIA A LIMPEZA

Duração: _____

6) Remoção de lodo

Método: EQUIPAMENTO MANUAL (PÁ, CARRINHO DE MÃO), RAMPAS

Tipo de Máquina:

Peso:

7) Custos da construção:

8) **Problemas** (ex. Bloco drenante quebrado, bloco drenante entupido, drenagem lenta): AINDA NÃO FORAM IDENTIFICADOS AINDA TAIS PROBLEMAS

9) Remediações**10) Vantagens do sistema**

DESAQUAMENTO MUITO RÁPIDO, PERMITINDO A SECAGEM DO LODO EM MENOR TEMPO.

11) Comparação com outro sistema de desaguamento utilizado:

- UTILIZÁVAMOS TIJOLOS, A VANTAGEM IRRELEVANTE E A DRENAGEM DA PARTE LIQUIDA.

Cidade: Camaçari

Sistema de Desaguamento de lodo: Leito de secagem com blocos drenantes

Satisfeito (x) Insatisfeito ()

Nome de Planta: Estação de Tratamento de Efluentes “C”

Endereço: Via Atlântica, km 9, Interligação com a Estrada do Coco – Camaçari - BA

Responsável/ Operador: Claudia Martins/Mariana Andrade

1) Características da Planta

Capacidade: 6200 m³/h

Processo do Tratamento do Efluente: Processo biológico por lodos ativados

Processo de Digestão do Lodo: Aeróbio

Método de Disposição do Lodo: Fazenda de Lodo

2) Características do Lodo

% de sólidos do lodo bruto: 0,4-0,6% na saída dos tanques de aeração e 1-1,5% na saída dos decantadores

Teor de sólidos final alcançado: 2-3% na saída do espessador

Geração de Volume de Lodo Seco: 15 ton/d

Adição de produto químico? Qual? Não

3) Sistema de Desaguamento: Planta piloto

Número de leitos: 1

Tamanho dos leitos (m²): 7

Dimensões dos leitos: 2,15 m (l) x 3,34 m (c)

Ano de construção: 2016

Leito construído com bloco drenante ou adaptado? Base de blocos drenantes do tipo BWF.

Ciclo operacional (ex: 2 por mês/ 12 por ano): 8 testes realizados no ano 2016

Ciclo de reposição do bloco drenante: N/A

Tipo de exposição (céu aberto, cobertura tipo estufa): Céu aberto

Taxa de carregamento de lodo do projeto (kgSST/m²): 22 kg/m²

4) Desempenho no desaguamento

Profundidade inicial de lodo: 41 cm

Profundidade final de lodo: 15 cm

Número de camada de lodo (descartes em bateladas?): 1 descarte/ batelada

Tempo de drenagem: 2-3 dias

Tempo de secagem: 27-28 dias

Tempo total desaguamento: 30 dias*

*Considerando que os testes foram realizados em novembro e dezembro de 2016, com condições climáticas favoráveis.

5) Dados do polímero

Nome: KF CP- 404

Fabricante: Kurita

Dosagem: Depende da concentração de sólidos do lodo, variando entre 50 – 400ppm

Custo: R\$ 22,00/kg

6) Limpeza

Método (manual ou máquina, utiliza água?): Manual com jateamento de água

Frequência: 2-3 dias após batelada

Duração: 30 minutos

7) Remoção de lodo

Método: Manual

Tipo de Máquina: N/A

Peso: N/A

8) Custos da construção

Custo com o material e equipe de civil aproximadamente R\$ 1.800,00 e o custo com a compra dos 78 blocos drenantes (do tipo BWF) R\$ 1.560,00, totalizando R\$ 3.360,00.

9) Problemas (ex. Bloco drenante quebrado, bloco drenante entupido, drenagem lenta)

Durante os 13 testes realizados, apenas um bloco drenante quebrou, apresentando, assim, uma pequena fenda, possivelmente associado a limpeza com o uso de pás.

No 8º teste, foi observada uma vazão de saída reduzida com grande perda de sólidos, esta estava associada com a passagem de lodo pelos blocos nos primeiros testes, já que a floculação não foi adequada, gerando um acúmulo de lodo na base dos blocos drenantes.

Ademais, o leito de drenagem foi construído com uma pequena inclinação, com a alimentação realizada na parte mais elevada. Com isso, o lodo se espalhava pelos blocos, bloqueando a passagem da água e tornando a drenagem mais lenta.

10) Remediações

Para a fenda no bloco drenante, foi colocada uma fita adesiva, eliminando a necessidade da substituição do bloco. Já para a redução na vazão, um jateamento de água na base dos blocos foi necessário, para completa remoção do lodo. Sendo programada uma outra limpeza após o 16º teste.

Por fim, para o problema da drenagem lenta, foi alterado o ponto de alimentação para a parte mais rebaixada do leito, para ter um acúmulo do lodo na parte alimentada e a água percorrer os blocos vazios, favorecendo a drenagem.

11) Vantagens do sistema

Teor de sólidos obtido no período de 30 dias superou as expectativas. Além disso, frente às técnicas de centrífuga e filtro prensa, o uso dos blocos traz a vantagem do consumo de energia reduzido, bem como os custos associados à manutenção.

12) Comparação com outro sistema de desaguamento utilizado:

Não existe na unidade um sistema de desaguamento.