



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL**

ÁTILA PAVAN VASCONCELLOS

**DESAGUAMENTO NATURAL DE LODOS DE UASB
UTILIZANDO MANTAS GEOTEXTEIS**

VITÓRIA
2022

ÁTILA PAVAN VASCONCELLOS

**DESAGUAMENTO NATURAL DE LODOS DE UASB UTILIZANDO
MANTAS GEOTEXTEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, área de concentração em Saneamento Ambiental e Saúde Pública.

Orientadora: Profa. D. Sc. Rosane Hein Campos.

Coorientador: Prof. D. Ing. Ricardo Franci Gonçalves.

VITÓRIA
2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

V331d Vasconcellos, Átila Pavan, 1991-
Desaguamento natural de lodos de UASB utilizando mantas geotêxteis / Átila Pavan Vasconcellos. - 2022.
103 f. : il.

Orientadora: Rosane Hein Campos.
Coorientador: Ricardo Franci Gonçalves.
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Lodo residual. 2. Percolação. I. Campos, Rosane Hein. II. Gonçalves, Ricardo Franci. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

ÁTILA PAVAN VASCONCELLOS

DESAGUAMENTO NATURAL DE LODOS DE UASB UTILIZANDO MANTAS GEOTÊXTEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração em Sustentabilidade, Ambiente e Sociedade e linha de pesquisa em Saneamento Ambiental e Saúde Pública.

Aprovada em 24 de fevereiro 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. D.Sc. Rosane Hein de Campos
Orientadora – PPGES / CT / UFES

Prof. D.Ing. Ricardo Franci Gonçalves
Coorientador – PPGES / CT / UFES

Prof^a. D.Sc. Edumar Ramos Cabral Coelho
Examinadora Interna – PPGES / CT / UFES

Prof. D.Sc. Neyson Martins Mendonça
Examinador Externo – ITEC / UFPA

Em conformidade com as normas prescritas na Portaria Normativa Nº. 08/2021 – PRPPG/UFES, a assinatura do examinador externo (Prof. D.Sc. Neyson Martins Mendonça) foi representada neste documento pela respectiva assinatura da presidente da sessão, Prof^a. D.Sc. Rosane Hein de Campos. Ato contínuo, a Sr^a. Presidente da banca examinadora atesta que, a defesa foi realizada por meio de videoconferência, ou outro suporte eletrônico a distância equivalente.

Prof^a. D.Sc. Rosane Hein de Campos
Orientadora – PPGES / CT / UFES



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
Rosane Hein de Campos - SIAPE 99992629
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável -
PPGEDS/CT
Em 24/02/2022 às 17:25

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/367512?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
RICARDO FRANCI GONCALVES - SIAPE 1176053
Departamento de Engenharia Ambiental - DEA/CT
Em 03/08/2022 às 10:51

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/529453?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
EDUMAR RAMOS CABRAL COELHO - SIAPE 1172695
Departamento de Engenharia Ambiental - DEA/CT
Em 27/07/2022 às 13:48

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/524776?tipoArquivo=O>

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Viviane e Rômulo, por todo o apoio e incentivo nas minhas escolhas durante a vida.

À minha companheira Flávia, por toda a compreensão durante este período de trabalho árduo e pelos sonhos compartilhados de um futuro próspero.

À minha orientadora, Rosane Hein de Campos, por ter me guiado durante este percurso e ter sempre acreditado no meu potencial.

Ao meu coorientador, Ricardo Franci Gonçalves, pela confiança e pela oportunidade de aprendizado ímpar em minha carreira.

Ao amigo e Professor Mário Rodrigues Peres, por todos os ensinamentos e contribuições que vão muito além da pesquisa realizada.

Aos meus colegas da UFES, pelos momentos de acolhimento e ajudas providenciais durante a pesquisa, em especial a Ludmila Azeredo, Janaína Simões, Hyasmin Haddad, Lorenzo Gomes e Rodrigo Oss.

Ao meu antigo gestor e companheiro de trabalho, Ronan Agostini, que me concedeu a oportunidade de me ausentar em certos momentos no trabalho para frequentar a Universidade, contribuindo com meu crescimento profissional e acadêmico.

Tudo tem seu preço exato, ninguém vai pagar barato

Tudo tem seu peso certo, tudo tem seu fim

Sérgio Sampaio

RESUMO

O desaguamento de lodos de estações de tratamento de esgotos (ETE) é uma etapa imprescindível no gerenciamento de lodos, uma vez que esta é responsável pela significativa redução de volume e conseqüente diminuição dos custos com transporte e disposição final deste tipo de resíduo. Desta forma, este trabalho teve como objetivo a avaliação do desaguamento natural de lodos de UASB utilizando materiais geotêxteis, sendo estes aplicados em dispositivos de drenagem com configurações distintas e sem o uso de condicionantes químicos. Nesta pesquisa, inicialmente, foram caracterizados os lodos de manta e leito provenientes de um reator UASB tratando esgoto sanitário, analisando-os acerca de suas propriedades físico-químicas, da distribuição das frações de água nestes, a sua aptidão ao desaguamento e também o seu comportamento reológico. Posteriormente, foram realizados diversos ensaios de desaguamento com os lodos caracterizados, sendo divididos em três etapas, onde nelas foram utilizadas também três configurações de sistemas de desaguamento. A primeira foi responsável por analisar a influência das mantas geotêxteis empregadas no processo, a segunda a comparação entre dois dos dispositivos utilizados e a terceira a avaliação de desempenho entre a integração dos sistemas anteriores. Foram usados índices de avaliação de desaguamentos pautados em dois aspectos principais: redução da água livre e retenção de sólidos, também relacionado a qualidade do filtrado. Os testes de desaguamento natural apresentaram redução de volume da ordem de 70% e a torta de lodo formada ao fim do processo da ordem de 15% de Sólidos Totais (ST). Não houve diferença significativa nos resultados acerca da influência das mantas geotêxteis BIDIM RT-21, RT-26 e RT-31 e o Desaguador Estático Vertical (DEV) demonstrou os melhores resultados entre as configurações de dispositivos utilizados. Também, se percebeu que a formação da camada filtrante sobre a manta geotêxtil está relacionada a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS), sendo esta capaz de influenciar de maneira distinta os dois quesitos analisados: a redução do volume e a retenção dos sólidos.

Palavras-chave: Desaguamento de lodos. Bolsas drenantes. Lodo de UASB.

ABSTRACT

Dewatering is a fundamental step in the management of sludge from Waste Water Treatment Plants (WWTP), since it's responsible for the significative reduction of volume and consequent weight, decreasing costs relative to transport and final disposal of this kind of waste. In this way, this study aims to evaluate the natural dewatering on sludges from a Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor, using geotextile materials on drainage systems with different configurations, without chemical conditionings. In this research, initially, sludges from the regions of the bed and the blanket of the UASB reactor, treating municipal sewage, were characterized about their physicochemical properties, their distribution of water fractions, their dewaterability indexes and their rheological behaviour. Later, dewatering tests were realized, being divided in three steps and using three configurations. The first aimed to analyze the influence of the geotextile material used as filter on dewatering process. The second, the comparison of two of the devices used and the third, the assessment of the performance between the integration of the previous systems. Performance indexes were used to evaluate two principal aspects: reduction of free water and the retention of solids, related to the quality of the filtrate. Dewatering tests showed reduction of volume in order of 70% and the sludge cake formed above the geotextile in order of 15% of Total Solids. There was no significant difference in the results about the influence of the geotextile blankets BIDIM RT-21, RT-26 e RT-31 and the Vertical Static Dewaterer (DEV) exhibited the best results among the configurations used in the dewatering devices. The formation of a filter cake above the geotextile was noticed and it is related to the Solid Application Rates (RAS), being capable to influence in a different way the two main aspects evaluated: reduction of volume and the solids capture.

Keywords: Sludge dewatering. Geotextile bags. UASB sludge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração de um reator do tipo UASB.	26
Figura 2 – Relação entre volume de lodo e a concentração de Sólidos Totais.....	28
Figura 3 – Representação da distribuição das frações de água no lodo.....	29
Figura 4 – Curva termogravimétrica.	30
Figura 5 – Reogramas característicos dos principais comportamentos de fluidos em regime laminar.....	32
Figura 6 – Drenômetro utilizado para os experimentos de desaguamento e a formação da torta filtrante.	38
Figura 7 – Configuração do aparato utilizado para a aferição do TSC.....	40
Figura 8 – Aparato experimental e exemplo de curva obtida durante o teste de Resistência Específica a Filtração.....	41
Figura 9 – Utilização de geotêxtilis em obras hidráulicas costeiras.	42
Figura 10 – Geotêxtil e as estruturas de tecido e não-tecido.	43
Figura 11 – Vista lateral do Leito de Secagem e suas modificações que sucederam nos Leitos de Drenagem.	45
Figura 12 – Bolsas drenantes verticais e horizontais	46
Figura 13 – Configurações dos testes de desaguamento de lodos diversos.	48
Figura 14 – Estação de tratamento de esgoto experimental localizada no bairro Araçás.	51
Figura 15 – Foto e desenho esquemático do reator UASB utilizado na pesquisa.....	52
Figura 17 – Amostra de lodo coletada em béquer plástico.	56
Figura 18 – Balança termogravimétrica.....	57
Figura 19 – Aparelho utilizado para os testes de Tempo de Sucção Capilar.	58
Figura 20 – Aparato utilizado para a obtenção da Resistência Específica a Filtração.	59
Figura 21 – Reômetro e geometria utilizados para a caracterização reológica dos lodos.....	60
Figura 22 – Esquema geral dos dispositivos de desaguamento.	61
Figura 23 – Esquema dos processos que envolvem os ensaios de desaguamento.	63
Figura 24 – Vistas laterais do DEV identificando a configuração de montagem.	65

Figura 25 – Fluxograma representando as variáveis de entrada e as variáveis resposta.....	66
Figura 26 – Bancada de experimentos com seis unidades do DEV.....	67
Figura 27 – BDVs fabricadas para os ensaios.	68
Figura 28 – Descrição do acoplamento da BDV na bancada de ensaios.....	69
Figura 29 – Fluxograma representando as variáveis de entrada e as variáveis resposta.....	70
Figura 30 – Bancada de desaguamentos do DEV e BDV com dois tipos de lodo.....	70
Figura 31 – Vistas laterais do acoplamento do BDEV.....	72
Figura 32 – Bancada de ensaios da Etapa 3.....	72
Figura 33 – Fluxograma representando as variáveis de entrada e as variáveis resposta.....	74
Figura 34 – Diagramas de caixa com os resultados das caracterizações físico-químicas do lodo (n=26).....	76
Figura 35 – Exemplo de curva termogravimétrica obtida para lodo de leite.....	77
Figura 36 – Gráfico de colunas empilhadas apresentando a distribuição das frações de água e sólidos nos lodos.....	78
Figura 37 – Resultados obtidos nos testes de aptidão ao desaguamento (n=12).....	80
Figura 38 – Correlação entre REF e TSC normalizado (n=13).	80
Figura 39 – Curva obtida e modelo aplicado em análise do lodo de leite com 6,15% de ST.....	81
Figura 40 – Reogramas obtidos na caracterização dos lodos: a) Lodo de manta 2,05% ST; b) Lodo de manta 1,79% ST; c) Lodo de manta 1,93% ST; d) Lodo de leite 4,59% ST.....	82
Figura 41 – Percentual de redução de volume nos desaguamentos.....	85
Figura 42 – Percentual de redução de volume para diferentes TAS, considerando o geotêxtil RT-21.....	85
Figura 43 – Cinética da redução de volume no DEV (n=21).	86
Figura 44 – Gráficos com os resultados dos índices de desaguamento (n=5).....	88
Figura 45 – Cinética de desaguamento do DEV e da BDV para lodos de manta e leite em 24h (n=5).	89
Figura 46 – Cinética de desaguamento do DEV e da BDV para lodos de manta e leite em 200 min (n=5).....	90

Figura 47 – Índices de desaguamento em relação aos comprimentos da bolsa (n=6).	91
Figura 48 – Gráfico da redução de volume ao longo das 24h para TAS de 3,5 kgST/m ² (n=3).	91
Figura 49 – Gráfico da redução de volume ao longo das 24h para TAS de 7,0 – 10,0 kg ST/m ² (n=3).	92
Figura 50 – Índices de eficiência relacionados às configurações dos sistemas de desaguamento com geotêxteis para lodos de leite (n=5).	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características e quantidade de lodo produzido em alguns sistemas de tratamento.	21
Tabela 2 – Composição típica de diferentes tipos de lodo.	25
Tabela 3 – Características físico-químicas do lodo de descarte de reatores UASB.	27
Tabela 4 – Avaliação dos aspectos ambientais e métodos de desaguamento de lodos.	35
Tabela 5 – Tipo de lodo e método utilizado para os ensaios de desaguamento.	49
Tabela 6 – Características gerais do reator UASB.	52
Tabela 7 – Relação entre os objetivos e as fases da pesquisa.	54
Tabela 8 – Propriedades e características das mantas geotêxteis utilizadas.	62
Tabela 9 – Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental 3 ²	66
Tabela 10 – Matriz de experimentos que representa um ciclo de ensaios.	67
Tabela 11 – Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental 2 ²	70
Tabela 12 – Níveis dos fatores do planejamento 3x2.	73
Tabela 13 – Comparação entre resultados obtidos com as referências.	77
Tabela 14 – Resultados das análises termogravimétricas.	78
Tabela 15 – Resultados dos testes de aptidão ao desaguamento.	79
Tabela 16 – Resultados dos modelos reológicos aplicados.	83
Tabela 17 – Resultados dos desaguamentos em escala de bancada.	84

LISTA DE SIGLAS

BDEV	– Bolsa Desaguadora Vertical
BDV	– Bolsa Drenante Vertical
CESAN	– Companhia Espírito Santense de Saneamento
CST	– Concentração de Sólidos Totais
DEV	– Desaguador Estático Vertical
DQO	– Demanda Química de Oxigênio
ED	– Eficiência de Desaguamento
EF	– Eficiência de Filtração
ETE	– Estação de Tratamento de Esgoto
PNRS	– Política Nacional de Resíduos Sólidos
REF	– Resistência Específica a Filtração
RV	– Redução de Volume
SP	– Sólidos Passantes
SST	– Sólidos Suspensos Totais
ST	– Sólidos Totais
SV	– Sólidos Voláteis
TAS	– Taxa de Aplicação de Sólidos
TSC	– Tempo de Sucção Capilar
TST	– Teor de Sólidos Totais
UASB	– Do Inglês, <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo)
UCL	– Universidade do Centro Leste
UFES	– Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
2.	OBJETIVOS	19
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	19
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1.	A GERAÇÃO DOS LODOS DE ETE	20
3.2.	O GERENCIAMENTO DOS LODOS DE ETE.....	22
3.3.	TIPOS DE LODOS DE ETE.....	24
3.4.	LODOS DE UASB	25
3.5.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO LODO	27
3.5.1.	Distribuição das frações de água.....	29
3.5.2.	Comportamento reológico.....	30
3.6.	DESAGUAMENTO DE LODOS	33
3.6.1.	Mecanismo de drenagem gravitacional.....	36
3.6.2.	Testes de aptidão ao desaguamento.....	39
3.7.	DESAGUAMENTO EM GEOTÊXTEIS	41
3.7.1.	Materiais geotêxteis.....	41
3.7.2.	Classificação e composição.....	43
3.7.3.	Utilização dos geotêxteis no saneamento.....	44

3.7.4. Leitos de Drenagem.....	45
3.7.5. Bolsas drenantes	46
3.7.6. Ensaio de desaguamento em geotêxteis.....	47
3.7.7. Avaliação de desaguamentos em geotêxteis.....	49
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	51
4.2. FASE 1: CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS DO REATOR UASB	54
4.2.1. Caracterização físico-química.....	54
4.2.2. Coleta de amostras para as caracterizações e ensaios.....	55
4.2.3. Determinação das frações de água presentes no lodo.....	56
4.2.4. Caracterização quanto a aptidão ao desaguamento	57
4.2.5. Caracterização reológica.....	59
4.3. FASE 2 – DESAGUAMENTO NATURAL UTILIZANDO GEOTÊXTEIS.....	61
4.3.1. Concepção dos sistemas desaguamento.....	61
4.3.1.1. Desenvolvimento dos ensaios.....	64
4.3.1.2. Etapa 1 - DEV (GEO X TAS).....	64
4.3.1.3. Etapa 2 - DEV x BDV.....	68
4.3.1.4. Etapa 3 - DEV+BDV.....	71
4.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS.....	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
5.1. CARACTERIZAÇÕES DOS LODOS.....	76
5.1.1. Caracterizações físico-químicas.....	76
5.1.2. Determinação das frações de água nos lodos.....	77
5.1.3. Testes de aptidão ao desaguamento.....	79

5.1.4. Caracterização reológica.....	81
5.2. DESAGUAMENTOS EM GEOTÊXTEIS.....	83
5.2.1. Etapa 1 – TAS x GEO.....	84
5.2.2. Etapa 2 – DEV x BDV.....	87
5.2.3. Etapa 3 – DEV + BDV.....	90
6. CONCLUSÃO.....	94
7. REFERÊNCIAS.....	96

1. INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto, composto principalmente de biomassa, é o principal subproduto gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). O gerenciamento deste é responsável por mais da metade dos custos operacionais de uma ETE e o seu manejo inadequado é a causa de diversos problemas sanitários e ambientais. Mesmo que, segundo a ABNT NBR 10.004 (BRASIL, 2004), o lodo seja classificado como resíduo sólido, este apresenta um elevado percentual de água, sendo o seu desaguamento uma etapa fundamental em sua gestão. Esta etapa objetiva a diminuição de seu volume, reduzindo os custos com o transporte e destinação final, além de ser necessária no caso de beneficiamento e reutilização (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2019; EDWARDS *et al.*, 2017; GHERGHEL; TEODOSIU; DE GISI, 2019; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017; WU, BORAN; DAI; CHAI, 2020).

O manejo do lodo tem se tornado o maior dos problemas para as ETEs na atualidade, uma vez que o aumento populacional e a crescente demanda pelo saneamento tendem inevitavelmente a aumentar a quantidade gerada destes resíduos, necessitando de métodos de tratamento e disposição menos custosos e adequados as realidades locais das ETEs. Existem diversos processos de tratamento que visam à remoção de água nos lodos, porém os que apresentam as maiores eficiências e taxas de aplicação estão atrelados a mecanização, necessidade de condicionamento e a elevados consumos energéticos, tendo como consequência altos custos operacionais (CIEŠLIK; NAMIEŠNIK; KONIECZKA, 2015; ESHTIAGHI *et al.*, 2013; GROBELAK; CZERWIŃSKA; MURTAŚ, 2019).

Os sistemas naturais empregados para o desaguamento de lodos apresentam vantagens em relação aos mecânicos, principalmente para ETEs de menor porte (até 100 L/s), tendo em vista que os custos de implantação, operação e manutenção são menores, e se colocam como alternativas ambientalmente favoráveis pela simplicidade operacional e baixo custo energético. Entretanto, como o mecanismo de desaguamento consiste na evaporação e na percolação da água contida no lodo, o clima da região e a disponibilidade de área são parâmetros importantes na tomada de decisão (LOBATO *et al.*, 2018; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017; BARÉA, 2013; CERQUEIRA, 2019).

De acordo com Spellman (1997), o método ideal de desaguamento é aquele que reduz o volume do lodo e captura a maior parte ou a totalidade de sólidos ao menor custo, além de gerar uma torta que pode ser manuseada com reduzidos riscos à saúde e ao meio ambiente. São citadas ainda pelo autor outras características importantes: a confiabilidade do sistema, a facilidade de operação e a compatibilidade com o local e com as outras unidades e sistemas da ETE.

A disposição de resíduos semissólidos em bolsas e estruturas fabricadas ou associadas com material geotêxtil garantem o confinamento do material retido e reduzem significativamente a penetração de água de chuva, evitando também a exposição do material e a consequente geração de odores. O processo de percolação, devido às características filtrantes do lodo, permite que o efluente tenha baixos teores de sólidos. Esta alternativa, além de segura é bastante viável, quando comparada aos métodos convencionais, tendo em vista a rápida contenção do material sólido, com fácil execução, baixo custo do material empregado, alta eficiência de redução volumétrica e o baixo impacto ambiental (TOMINAGA, 2011; GUIMARÃES; URASHIMA; VIDAL, 2014).

Levando em consideração o contexto apresentado, afirma-se que o gerenciamento dos lodos de excesso de ETEs são operações complexas e custosas, desta forma busca-se com essa pesquisa responder o seguinte questionamento: Qual é a maneira mais viável, em termos técnicos, de se desaguar lodos de UASB em sistemas naturais empregando materiais geotêxteis?

1.1 JUSTIFICATIVA

Diante da problemática que envolve o manejo sustentável dos lodos de ETE, sobretudo nas estações de pequeno porte, cuja implantação de dispositivos mecânicos de desaguamento de lodo não é viável economicamente, e tendo em vista que os sistemas naturais utilizados apresentam problemas operacionais e ambientais, como a exposição do material e a possível transmissão de vetores. Objetivou-se estudar alternativas simples e modulares para desaguar os lodos, facilitando assim o seu manuseio e disposição final, reduzindo o contato direto dos trabalhadores com o material, mesmo na hora de sua remoção.

Desta forma, o presente trabalho tem como motivação a avaliação do desaguamento de lodos anaeróbios, provenientes de um reator UASB, através da drenagem natural da água livre, utilizando mantas geotêxteis como meio de contenção e filtração. O desaguamento de materiais com alto teor de umidade utilizando sistemas associados com geotêxteis se apresenta como uma técnica eficiente para concentrar os sólidos do efluente, gerando um percolado com boa qualidade e favorecendo a destinação/reutilização do material. Os ensaios de laboratório e de campo permitirão a comparação das eficiências e da performance dos sistemas com geotêxtil, em estruturas de disposição de lodos para ETEs de pequeno porte.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade de desaguamento de lodos de um reator UASB através da drenagem natural de água livre a partir de desaguadores estáticos utilizando mantas geotêxteis.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os lodos de descarte de uma ETE do tipo UASB quanto aos seus parâmetros físico-químicos e reológicos.
- Determinar a distribuição das frações de água nos lodos do tipo UASB, via técnicas termogravimétricas.
- Estudar a aptidão ao desaguamento dos lodos do tipo UASB através de índices de desaguamento.
- Avaliar o desempenho do desaguamento de lodos de UASB não condicionados, utilizando mantas geotêxteis como meio filtrante no Desaguador Estático Vertical (DEV), com diferentes taxas de aplicação de sólidos.
- Comparar o desempenho do desaguamento de lodos de manta e leito no DEV e nas Bolsas Drenantes Verticais (BDV) utilizando índices de eficiência de desaguamento.
- Integrar a BDV na estrutura do DEV e verificar a influência do comprimento da bolsa no desaguamento de lodos, fixando a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A GERAÇÃO DOS LODOS DE ETE

O lodo é definido como um subproduto do tratamento de águas residuárias, sendo a sua produção inevitável. Os sistemas de tratamento tendem a concentrar os contaminantes nos lodos, gerando compostos que podem variar sazonalmente, a depender das contribuições dos afluentes e também dos tipos de processos adotados (FIJALKOWSKI *et al.*, 2017; TO *et al.*, 2016; WU; DAI; CHAI, 2020). Devido à grande adaptabilidade em relação a qualidade dos afluentes, a flexibilidade operacional e a estabilidade dos processos empregados, os tratamentos biológicos são os mais frequentes nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) em todo o mundo (MURUGESAN; SELVAM; WONG, 2017).

Nos sistemas biológicos de tratamento de esgotos, o lodo é composto em grande parte por bactérias vivas, sendo parte integrante do processo, uma vez que a eficiência das etapas biológicas está associada à quantidade de células vivas atuantes no reator. Estes sistemas de tratamento mantêm o afluente em um meio rico em lodo, favorecendo a ação dos microrganismos, que agregam as partículas em sua superfície e convertem a matéria orgânica biodegradável disponível. Esta conversão se dá pela oxidação dos compostos orgânicos, onde a biomassa realiza os processos de catabolismo para a manutenção das células, e de anabolismo, para a geração de novas células e seu aumento de concentração no reator. Desta forma, o lodo é tido como um insumo para os tratamentos e seu excesso passa a ser considerado um resíduo, capaz de causar sérios problemas ambientais caso seja gerenciado de forma inadequada (VON SPERLING, 2007; ANDREOLI, 2001; WU; DAI; CHAI, 2020).

Os lodos de excesso dos tratamentos biológicos de esgotos são constituídos em boa parte por matéria orgânica, além de conter também sólidos inorgânicos, nutrientes e substâncias tóxicas, como agentes patogênicos e metais pesados. Os lodos de esgoto são produzidos e acumulados nas ETEs como uma mistura de substâncias líquidas e sólidas em diferentes estágios de degradação (GROSSER, 2017; NASCIMENTO *et al.*, 2020).

As taxas de produção de lodo são estritamente relacionadas à quantidade de matéria orgânica presente no afluente e pela capacidade de oxidação da biomassa empregada no processo de tratamento. A quantidade de lodo produzida por uma ETE pode ser descrita em termos de massa (gramas de sólidos totais por dia, em base seca) e volume (metros cúbicos de lodo por dia, base úmida). Partindo do princípio que a contribuição por habitante seja de aproximadamente 0,1 kg DQO/dia, pode-se estimar a produção de Sólidos Suspensos (SS) per capita, de acordo com o sistema de tratamento adotado, como pode se observar na Tabela 1. A produção de sólidos em um sistema de tratamento que visa à remoção de matéria orgânica por meios físicos não possui ligação direta com a remoção da DQO (SEMBLANTE *et al.*, 2014; VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

A qualidade e a quantidade dos lodos gerados em cada estágio de tratamento irão depender da operação e tecnologia aplicada, a concentração de poluentes do afluente, o método de processamento do lodo, a sua forma de adensamento ou desaguamento e os reagentes utilizados na ETE (FIJALKOWSKI *et al.*, 2017; GROBELAK; CZERWIŃSKA; MURTAŚ, 2019).

Tabela 1 – Características e quantidade de lodo produzido em alguns sistemas de tratamento.

Sistema de Tratamento	Características do lodo gerado			
	kgST/ kgDQO aplicada	Teor de Sólidos Totais (%)	Massa de lodo por habitante (gST/hab.d)	Volume de lodo por habitante (l/hab.d)
Fossa Séptica	0,2–0,3	3-6	20-30	0,3–1,0
Lagoa Facultativa	0,12–0,32	5-15	12–32	0,1–0,25
Lagoa Facultativa Aerada	0,08-0,13	6-10	8-13	0,08-0,22
Lagoa Anaeróbia	0,2-0,45	15-20	20-45	0,1-0,3
Lodo Ativado Convencional	0,6-0,8	1-2	60-80	3,1-8,2
Lodo Ativado Aeração Extendida	0,5-0,55	0,8-1,2	40-45	3,3-5,6
Reator UASB	0,12-0,18	3-6	12-18	0,2-0,6
UASB + Pós tratamento aeróbio	0,2-0,32	3-4	20-32	0,5-1,1

Fonte: Adaptado de Von Sperling e Gonçalves (2001).

3.2. O GERENCIAMENTO DOS LODOS DE ETE

Nos últimos anos, a quantidade de lodo de esgoto sanitário e os custos relacionados ao seu tratamento aumentaram consideravelmente, isso ocorre devido à ampliação da cobertura dos serviços de saneamento e também pelo enrijecimento das normas de proteção ao ambiente. A redução destes custos é diretamente dependente de uma gestão adequada do material e da minimização do seu volume por meio da redução do teor de umidade (BERTANZA *et al.*, 2014; MAHMOUD *et al.*, 2016), tendo em vista que o lodo é constituído majoritariamente de água em quase todas as fases de tratamento, com valores maiores que 95% durante os tratamentos e por volta de 80% pós desaguamento mecanizado (BENNAMOUN; ARLABOSSE; LÉONARD, 2013), mesmo assim, por convenção ele é tratado como fase sólida, uma vez que o objetivo é distingui-lo do fluxo líquido que está sendo tratado na fase líquida (VON SPERLING, 2007).

De acordo com Von Sperling e Gonçalves (2001), o gerenciamento do lodo numa estação de tratamento de esgoto pode ser dividido entre às cinco principais etapas, são elas:

- Adensamento: etapa de concentração de sólidos no lodo. Podendo ser realizada por meio de processos físicos. Em geral, esta etapa permite a concentração dos sólidos para a ordem de 6%;
- Estabilização: processo de redução do risco de putrefação do material e diminuição da concentração de patógenos pela mineralização da matéria orgânica;
- Condicionamento: preparação do lodo utilizando insumos químicos com foco no aumento da aptidão ao desaguamento, facilitando assim a remoção de sólidos;
- Desaguamento: remoção da água livre objetivando a redução do volume da solução. Pode ser realizado por processos mecanizados ou não mecanizados, como leitos de secagem, filtros prensa, secadores, entre outros. Espera-se uma redução do teor de umidade para 75 a 80% nesta etapa;

- Disposição final: etapa final do processamento do lodo. Os processos mais comuns são a reciclagem agrícola, a disposição em aterro sanitário, o uso para a recuperação dos solos, entre outros.

A complexidade do gerenciamento de grandes volumes e massas deste tipo de material faz da etapa de desaguamento uma das mais importantes do processo de gerenciamento. Um dos principais benefícios nesse sentido é o custo do transporte para o local de disposição final, que diminui significativamente com o desaguamento do lodo (BERTANZA *et al.*, 2014; CHRISTENSEN *et al.*, 2015). Dentre os processamentos aplicados aos lodos, o desaguamento é requisito na redução dos custos com a disposição. A retirada de água por vias mecanizadas ou naturais, aumenta a concentração de sólidos e dá ao lodo características de um material sólido, obtendo um percentual de 20 – 45% de ST (GROBELAK; CZERWIŃSKA; MURTAŚ, 2019). Os exemplos mais comuns de processos de desaguamento são os leitos de secagem, filtros prensa e centrífugas (ANDREOLI; VON SPERLING, 2007). Ao ser desaguado, um lodo, que inicialmente apresenta 2% de ST e chega ao patamar de 20%, alcança uma redução de volume da ordem de 90%, gerando um impacto enorme nos custos de operação da ETE (ZHOU *et al.*, 2014).

Diante da variedade de métodos de tratamento e beneficiamento dos lodos, possibilidades de destinação são desenvolvidas. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010) juntamente com a CONAMA 375 (BRASIL, 2020), regulamentam as destinações seguras e ambientalmente adequadas do lodo. Atualmente, a alternativa mais empregada no Brasil é o envio do lodo para aterros sanitários, entretanto a PNRS não indica a destinação de materiais em aterros sanitários que não sejam resíduos finais, a menos que não possuam viabilidade técnica e econômica para reuso ou reciclagem. Porém, o lodo produzido em ETEs não se enquadra como resíduo final, pois apresenta potencial de uso agrícola e florestal, composição de matéria prima em indústria de cerâmicas, obtenção de energia térmica e elétrica, entre outras alternativas desde que o lodo seja tratado de maneira adequada, de acordo com a sua utilização (ROSA *et al.*, 2016).

3.3. TIPOS DE LODOS DE ETE

Os lodos gerados em ETEs possuem diferenças significativas em suas características, essas variações são decorrentes dos poluentes contidos no afluente a ser tratado bem como do tipo de processos empregados durante seu tratamento, como pode ser observado na Tabela 2. Os esgotos sanitários representam a maior fonte de geração de lodo, sendo este de origem principalmente doméstica e com contribuições da indústria, a depender do desenvolvimento da região (FIJALKOWSKI *et al.*, 2017; MACHADO; TRANNIN, 2015).

De acordo com Von Sperling e Gonçalves (2001), os lodos normalmente são classificados quanto a etapa de tratamento de esgoto em que são provenientes, conforme apresentado a seguir:

- Lodo primário: Lodo retido nos decantadores primários e em tanques sépticos. Possui odor bastante desagradável devido a fração de material putrescível, além de apresentar dificuldade na secagem (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2014).
- Lodo Secundário: Consiste na biomassa de microorganismos gerada a partir do consumo da matéria orgânica do esgoto. A depender do processo de tratamento do esgoto, o lodo secundário pode ser aeróbio, estabilizado ou não, ou anaeróbio estabilizado (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).
- Lodo Misto: Composto pela mistura dos lodos primário e secundário. Von Sperling e Gonçalves (2001) explicam que a relação entre lodo primário e secundário no lodo misto interferem significativamente na capacidade de desaguamento deste, sendo o lodo secundário de maior dificuldade na retirada de água.
- Lodo Químico: Produzido em processos físico-químicos de tratamento, usualmente pela precipitação química com sais metálicos ou com cal. Possui uma taxa de decomposição inferior à do lodo primário e odor geralmente pouco ofensivo, sendo mais incômodo quando da estabilização com cal (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001). Segundo os autores, este lodo é usualmente removido de unidades como decantadores primários com precipitação química e lodos ativados com precipitação química de fósforo.

Tabela 2 – Composição típica de diferentes tipos de lodo.

Componente	Unidade	Tipo de Lodo		
		Primário	Secundário não estabilizado	Digerido
Matéria Orgânica	% ST	60 -85	60 - 85	45 – 60
Óleos e Graxa	% ST	5 – 8	5 – 12	3 – 20
Proteínas	% ST	20 – 30	30 – 40	15 – 20
Nitrogênio	N, %ST	1,5 – 4	2,4 – 5	1,5 – 6
Fósforo	P ₂ O ₅ , % ST	0,8 – 2,8	2,8 – 11	2,5
Potássio	K ₂ O, % ST	0 – 1	0,5 – 0,7	0 – 2
Celulose	% ST	8 – 15	5 – 15	5 - 15

Fonte: Adaptado Tchobanoglous e outros (2014).

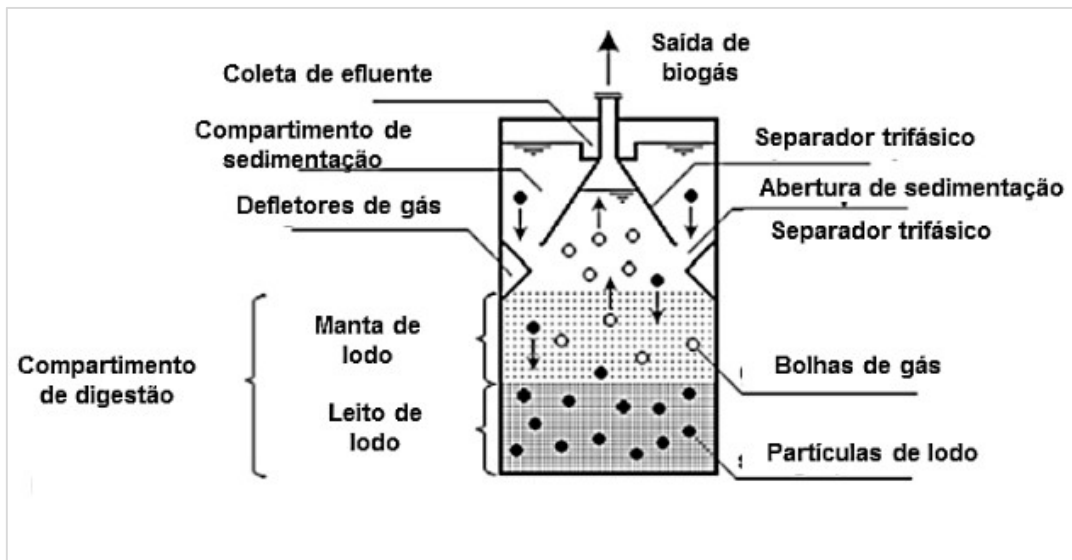
3.4. LODOS DE UASB

Os Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente, em inglês “Upflow Anaerobic Sludge Blanket” (UASB), são sistemas de tratamento de esgoto de alta carga. A geração do lodo anaeróbio em seu interior é resultado do processo de oxidação da matéria orgânica, fornecendo condições para o crescimento da biomassa. Quando operados de maneira adequada, estes reatores possuem uma elevada capacidade de retenção de sólidos, resultando em idades de elevadas de lodo e propiciando nestes um alto grau de estabilização. A alta capacidade de reter o lodo é fruto da existência do separados trifásico, da velocidade de ascensão imposta e da alta sedimentação do lodo gerado no sistema. A capacidade de armazenamento de lodo no interior do reator é ditada pelo volume dos compartimentos de digestão, esta região não deve ser ultrapassada, devendo ser realizado o descarte do lodo periodicamente, objetivando a manutenção da eficiência do tratamento (LEITÃO *et al.*, 2011; LOBATO *et al.*, 2018).

Após a inicialização do processo, um lodo bastante espesso (entre 4 a 10% de ST) é produzido. Este apresenta boa capacidade de sedimentação e se concentra no fundo do reator, sendo denominado lodo de leito. Logo acima do leito, ainda no compartimento de digestão, é encontrada a região de manta, apresentando um material com menor concentração de ST (entre 1 e 3%) e com menor sedimentabilidade. Nesta zona, a presença de bolhas de gás, geradas pela

degradação anaeróbia, se associam aos flocos, reduzindo a sua massa específica, tendendo a expandir a região (LOUZADA, 2018; WANG *et al.*, 2014). Na Figura 1, pode-se observar a configuração básica dos reatores UASB e as suas regiões descritas.

Figura 1 – Configuração de um reator do tipo UASB.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007).

O lodo produzido neste tipo de reator pode apresentar dois aspectos distintos: o floculento e o granular, a depender do tipo de interação entre os microrganismos, que por sua vez é relacionado tanto às características do afluente quanto as condições de fluxo no reator. Como descrito anteriormente, as características da biomassa gerada no processo dependem das características do afluente, todavia, sempre haverá uma fração inorgânica atrelada ao material, uma vez que os flocos agregam os sólidos presentes no afluente e também são formados sais no próprio reator (ANDREOLI; VON SPERLING, 2007; JAYARAMAN; GÖKALP, 2015). Os reatores UASB possibilitam, além da remoção de grande parcela da carga orgânica dos esgotos, o adensamento e a digestão de lodo, fazendo com que as duas primeiras etapas do gerenciamento de lodos, apresentadas na seção 3.2, não sejam necessárias (ALÉM SOBRINHO; JORDÃO, 2001; FLORIPES *et al.*, 2018).

Tabela 3 – Características físico-químicas do lodo de descarte de reatores UASB.

Autores:	Lodo de manta		Lodo de leite	
	Teor de Sólidos (%)	Estabilidade (SV/ST)	Teor de Sólidos (%)	Estabilidade (SV/ST)
CHERNICHARO (2007)	1,5 – 3,0	-	4,0 – 10,0	-
VERONEZ (2001)	1,42	58,8	4,75	65,7
VAN HAANDEL & LETTINGA (1994)	2,02	56	6,0 -7,0	-
WANKE (2005)	0,95	67	3,9	72,6

Fonte: Autoria Própria.

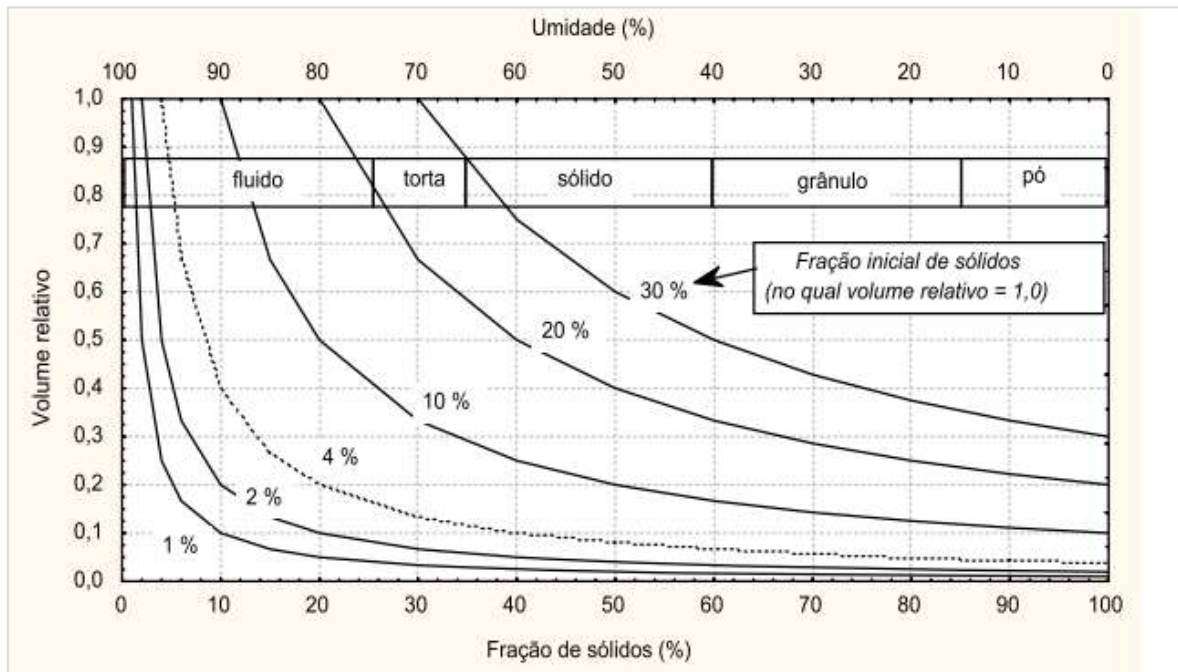
O acompanhamento do lodo no reator UASB é realizado por meio do perfil de sólidos, partindo do princípio que a quantidade de sólidos voláteis é uma boa representação da quantidade de microrganismos presentes nas amostras. Além disso, também são verificados o teor de sólidos (%ST), o grau de estabilidade (SV/ST), tipo de ligação da água com a partícula sólida, densidade, toxicidade e conteúdo de patógenos. Entre estas, as duas primeiras são destacadas, pois tem influência direta nas propriedades mecânicas do material, afetando o manuseio e sua disposição (SPAVIER, 2003). Na Tabela 3, se pode observar os resultados do TS e grau de mineralização reportados pela literatura especializada.

3.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO LODO

O lodo bruto contido nas ETE é constituído majoritariamente de água em quase todas as fases do tratamento, com valores que dificilmente atingem o teor de 10% de ST antes das operações de desaguamento. O tipo de interação físico-química entre a água e as partículas sólidas influenciam, diretamente, no comportamento mecânico do lodo, sendo fator responsável por suas propriedades reológicas e sua aptidão ao desaguamento (BENNAMOUN; ARLABOSSE; LÉONARD, 2013; MORTARA, 2011). Os sólidos presentes no lodo têm como efeito a não-homogeneidade da mistura, fazendo com que a água presente possa se relacionar com o material sólido de diversas maneiras, obtendo comportamentos mecânicos distintos, como pode ser observado na Figura 2. Estas variações são decorrentes das mudanças estruturais do lodo devido a relação com a natureza de sua água presente (JIANG *et al.*, 2014; LIANG *et al.*, 2017).

Com a remoção gradativa do percentual de água, o lodo se torna mais pastoso, entretanto ao alcançar a faixa de 75% de umidade, este se transforma numa torta semi-sólida com comportamento plástico, deixando de apresentar características de fluido. Com a concentração de água sendo reduzida a valores abaixo de 45%, o lodo inicia um comportamento granular, semelhante a carvão triturado. Podendo, ainda, apresentar a condição de material de baixa granulometria e se torna pó quando a umidade se reduz a 15% (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994; WANKE, 2005).

Figura 2 – Relação entre volume de lodo e a concentração de Sólidos Totais.



Fonte: Adaptado de Von Sperling e Gonçalves (2001).

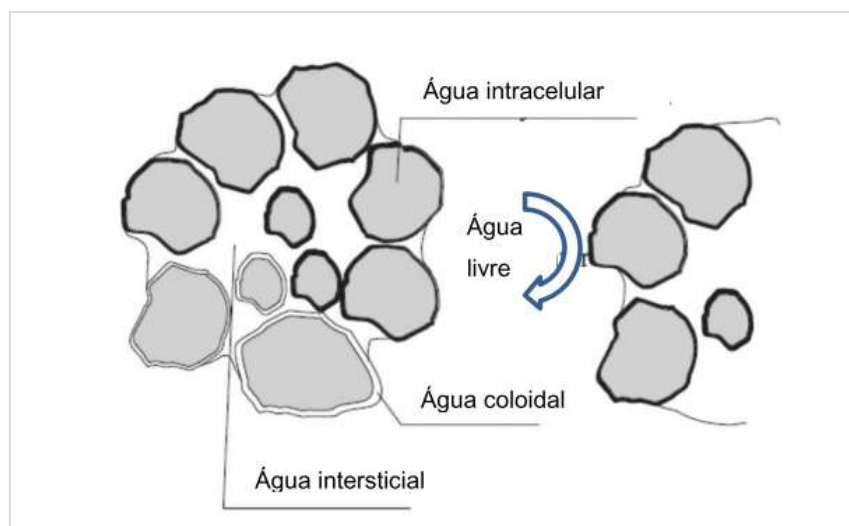
O comportamento mecânico apresentado pelo lodo se difere de outros materiais semissólidos devido a sua alta concentração de Sólidos Voláteis (SV), que representa o conteúdo orgânico do lodo, este responsável por grande parte das forças de interação que mantém a água ligada aos sólidos. Desta forma, é encontrado na literatura que lodos com menores teores de SV têm maior aptidão ao desaguamento, gerando tortas com menor teor de umidade (SKINNER *et al.*, 2015; WANG, HOU-FENG *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2017).

3.5.1. Distribuição das frações de água

De acordo com Zhou e outros (2014), as frações de água presentes no lodo podem ser classificadas conforme o tipo de ligação intermolecular com os sólidos, sendo divididas em: água livre, água intersticial, água superficial e água intracelular, conforme segue descrito e representado na Figura 3:

- Umidade livre: onde a água não possui ligação com as partículas sólidas e pode ser removida pela simples percolação por gravidade.
- Umidade intersticial: onde a água é aprisionada por entre os flocos sólidos ou dentro dos capilares da torta desaguada, podendo ainda ser retirada por métodos mecânicos intensivos.
- Umidade superficial: que representa a água mantida na área superficial das partículas sólidas por adsorção e adesão.
- Umidade intracelular: ocorre quando o líquido exerce uma pressão de vapor menor que a do líquido puro em uma dada temperatura. Esta pode estar em várias condições: na forma líquida retida em pequenos poros, em solução contida nas paredes celulares, adsorvida química ou fisicamente, podendo ser removida apenas por processos químicos ou térmicos.

Figura 3 – Representação da distribuição das frações de água no lodo.

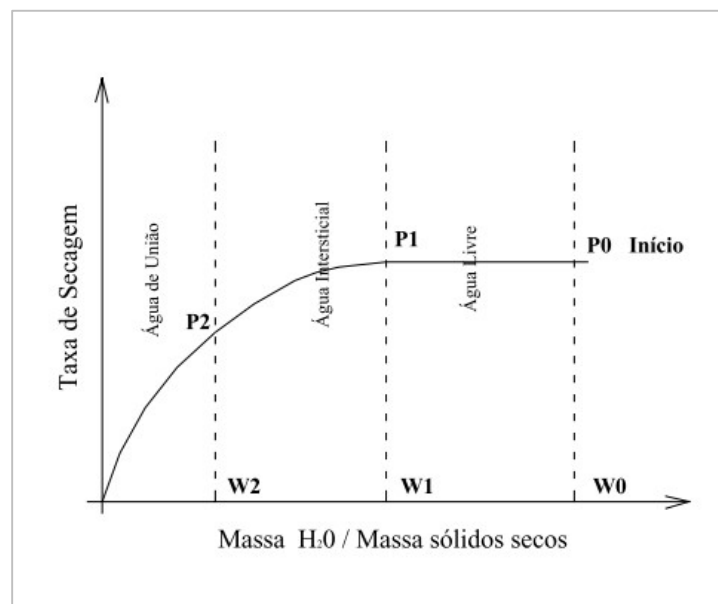


Fonte: Adaptado de Mortara (2011).

Existem diversas técnicas utilizadas para caracterizar a distribuição das frações de água nos lodos, sendo que maioria utiliza de processos térmicos para tal, como a termogravimetria e a dilatometria. O método termogravimétrico é baseado na análise

da curva de secagem do material partindo do princípio que a taxa de evaporação de água depende do tipo de ligação intermolecular entre as partículas. Este utiliza dos pontos de descontinuidade na curva da variação da massa através da secagem realizada em temperatura controlada. No gráfico apresentado na Figura 4, podem ser observadas três etapas distintas: uma a taxa constante, seguidos de duas etapas diferentes de decaimento, que representam a diferença das interações da água para com os sólidos em cada período. Desta forma o método classifica a umidade superficial e a umidade intracelular como água de união (LIN *et al.*, 2015).

Figura 4 – Curva termogravimétrica.



Fonte: Spavier (2003).

Spavier (2003), utilizando o método gravimétrico, avaliou amostras de lodo tratando esgoto doméstico em um sistema composto de UASB e biofiltro aerado submerso. Os resultados encontrados pela autora foram de 82% de água livre, 16% de água intersticial e 2% de água de união. Valores que se encontram próximos dos descritos por Kopp e Dichtl (2001), que para lodos anaeróbios apontam faixas entre 83% e 94% para a água livre e 5% a 18% para a água intersticial somada à água de união.

3.5.2. Comportamento reológico

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o fluxo dos materiais, sendo utilizada em diversas aplicações de engenharia. Os estudos reológicos buscam

relações constitutivas entre força e deformação, descrevendo o comportamento puramente sólido pelo fenômeno da elasticidade e puramente líquido pela viscosidade. O comportamento de alguns materiais reais pode ser descrito por essas duas simples relações constitutivas. Entretanto, para muitos materiais de interesse, como o lodo biológico, a propriedade da viscoelasticidade se apresenta, se situando entre sólidos elásticos e fluidos viscosos ideais (BRAGA, 2003).

No âmbito do tratamento de lodos, os parâmetros reológicos vêm sendo utilizados na otimização das condições de processo, como na digestão, bombeamento, mistura, condicionamento e disposição. Geralmente, os lodos diluídos (com menos de 2% de ST) são considerados fluidos Newtonianos, enquanto em soluções mais concentradas, as características não-Newtonianas aparecem e se tornam predominantes (ESHTIAGHI *et al.*, 2013; SLATTER, 2001).

Os fluidos Newtonianos, como a água e suspensões diluídas, possuem comportamento reológico definido por uma viscosidade constante, representando a linearidade entre a tensão cisalhante aplicada e a taxa de deformação sofrida pelo material. Já para os fluidos não-Newtonianos, a viscosidade depende da taxa de cisalhamento e também do histórico mecânico do material (Tixotropia), isto se deve a formação de estruturas no sistema ou a orientação de partículas assimétricas, causando distúrbios no comportamento Newtoniano. Nestes fluidos, à medida que a tensão cisalhante aplicada varia a deformação não varia de forma constante, fazendo com que a viscosidade mude de acordo com as condições de tensão x deformação, sendo chamada de viscosidade aparente, representada pela relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento, ponto a ponto no reograma (BRAGA, 2003; FARNO; LESTER; ESHTIAGHI, 2020).

A equação reológica constitutiva geral, em função da viscosidade foi apresentada por Govier and Aziz, (1972):

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad \text{Equação 3.1}$$

Em que:

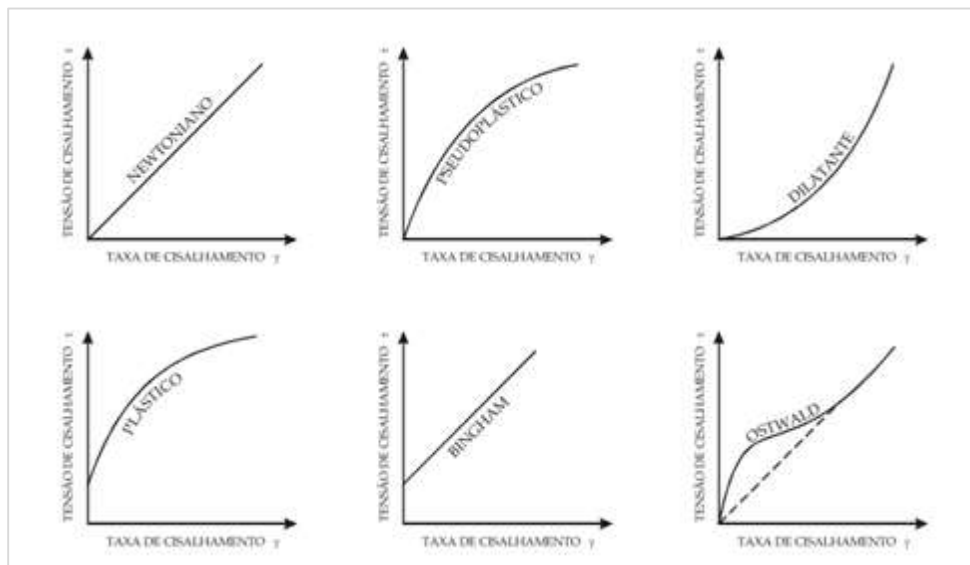
- τ é a tensão de cisalhamento (Pa).
- $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (s^{-1}).
- τ_0 é a tensão limite de cisalhamento (≥ 0) (Pa).

- k é o índice de consistência (que no caso dos fluidos Newtonianos é equivalente a viscosidade absoluta) (Pa.s).
- n é o expoente da lei de potência, que no caso dos Newtonianos é igual a 1 e nos não-newtonianos maior ou menor que 1.

Dependendo dos valores de τ_0 e n , os comportamentos reológicos podem ser classificados de acordo com os modelos que o representam, podendo ser observados nos reogramas da Figura 5 (ESHTIAGHI *et al.*, 2013):

- Newtoniano: $\tau_0 = 0$ e $n = 1$.
- Pseudoplástico: $\tau_0 = 0$ e $n < 1$.
- Dilatante: $\tau_0 = 0$ e $n > 1$.
- Plástico: $\tau_0 > 0$ e $n < 1$.
- Bingham: $\tau_0 > 0$ e $n = 1$.
- Ostwald: $\tau_0 = 0$ e $n < 1$.

Figura 5 – Reogramas característicos dos principais comportamentos de fluidos em regime laminar.



Fonte: Adaptado de Braga (2003).

Os reogramas são representações gráficas do comportamento de determinado material sob diferentes tensões de cisalhamento. Estes são normalmente obtidos com reômetros que determinam a tensão de cisalhamento para cada valor pré-determinado da taxa de cisalhamento ou vice-versa (MORTARA, 2011).

viscosidade é um indicador “geral” que reflete as interações entre partículas do lodo, relacionando a estabilidade coloidal dos agregados microbianos e da capacidade de adesão da água nos flocos. É possível encontrar na literatura diversas relações entre a viscosidade e índices de desaguamento, demonstrando a afinidade entre a água e os compostos orgânicos, responsáveis por aumentar a viscosidade e a fração de água ligada (CHENG; LI, 2015; WANG *et al.*, 2020).

A tensão limite de cisalhamento é definida como a tensão mínima aplicada requerida para que o material flua continuamente. Abaixo desta tensão o material apresenta comportamento elástico, características de sólido, após esta tensão o comportamento viscoso é predominante. Este parâmetro é frequentemente utilizado para caracterizar os lodos quanto à resistência exercida pela sua estrutura mediante os esforços e deformações cisalhantes, sendo relacionada com as forças da rede de ligação do material (ESHTIAGHI *et al.*, 2013).

Quanto à caracterização reológica de lodos de ETEs, é possível encontrar na literatura uma série de resultados, onde estes variam consideravelmente de acordo com o processo gerador do lodo e também com a sua condição na etapa de tratamento em que é analisado. As metodologias utilizadas nos testes também não são uniformes, provocando diferenças significativas entre os resultados disponíveis. Contudo, é possível observar que a maioria dos lodos anaeróbios analisados tem seu comportamento de fluxo associados aos modelos Plástico e Pseudoplástico, conforme a concentração de sólidos do material (BRAGA, 2003; ESHTIAGHI *et al.*, 2013; SLATTER, 2001; SPINOSA; AYOL, 2019).

3.6. Desaguamento de lodos

O desaguamento de lodos consiste basicamente no aumento da concentração de sólidos do material por meio da remoção da água livre. Várias tecnologias podem ser aplicadas com esse objetivo, sendo que a principal classificação entre os métodos são os mecânicos e os naturais. Dentre os sistemas mecânicos os mais comuns são as centrífugas, os filtros-prensa, filtros a vácuo e prensas desaguadoras, obtendo de 20 a 45% de ST após o fim do processo. Já entre os sistemas naturais, os mais comuns são as lagoas de lodo, leitos de secagem, leitos de drenagem. A seleção do método adequado é relacionada ao volume de lodo a ser processado, a

disponibilidade financeira, fatores climáticos e área disponível. Desta forma, a execução de estudos em escala piloto é de fundamental importância para a escolha da tecnologia a ser empregada (ANDREOLI; VON SPERLING, 2007; GROBELAK; CZERWIŃSKA; MURTAŚ, 2019; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017; SILVEIRA *et al.*, 2014).

As principais vantagens dos desaguamentos mecanizados de lodo são a pequena demanda de área e a elevada capacidade de processamento de material. Entretanto, os investimentos necessários para a implantação, operação e manutenção, associados à complexidade operacional, tendem a inviabilizar a sua aplicação em pequenas e médias estações de tratamento. Para estas, meios naturais de desaguamento, tais quais lagoas e leitos de secagem de lodo, são mais utilizados e recomendados, visto que nestes sistemas não são utilizados insumos como energia elétrica e produtos químicos. Porém, deve-se considerar a condição climática como limitação destes (CERQUEIRA, 2019; SILVEIRA *et al.*, 2015; WANKE, 2005).

Além de utilizar critérios técnicos com uma visão global do processo, a escolha do melhor método de tratamento a ser adotado no projeto de uma ETE deve contemplar: análises econômico-financeiras que considerem o custo de instalação e operação para o período de funcionamento do sistema, análises e levantamentos dos impactos sociais e ambientais, a flexibilidade para ampliação e a dependência de insumos químicos e mão de obra qualificada. O desempenho operacional e ambiental de alguns dos mais comuns métodos de desaguamento de lodo é comparado na Tabela 4 (MORTARA, 2011).

Tabela 4 – Avaliação dos aspectos ambientais e métodos de desaguamento de lodos.

Características	Processos Naturais		Processos Mecanizados		
	Leito de Secagem *	Lagoas de lodo	Centrífugas	Filtros à vácuo	Filtros prensa
Demanda de água	+++	+++	+	++	+
Demanda de energia	-	-	++	+++	+++
Demanda por área	+++	+++	+	++	+
Custo de implantação	+	+	+++	++	++
Complexidade operacional	+	+	++	++	+++
Demanda de manutenção	+	+	++	++	+++
Complexidade de instalação	+	+	++	++	++
Influência do clima	+++	+++	+	+	+
Sensibilidade à qualidade do lodo	+	+	+++	++	++
Produtos químicos	+	-	+++	+++	+++
Complexidade na remoção do lodo	++	+++	+	+	+
Teor de ST na torta	+++	++	++	+	+++
Odores e vetores	++	+++	+	+	+
Ruídos e vibrações	-	-	+++	++	++
Potencial de contaminação dos operadores	++	++	+	+	+
Potencial de contaminação do lençol freático	++	+++	+	+	+

(-) : desprezível; (+) : pouco; (++) : médio; (+++) : elevado; * :Ciclo de secagem de 30 dias.

Fonte: Adaptado de Andreolli, Von Sperling e Fernandes 2007.

O princípio de funcionamento do desaguamento em sistemas naturais é a sucessão de dois fenômenos predominantes, inicialmente a drenagem, ou percolação, e posteriormente a evaporação. No primeiro momento, a percolação se dá por meio da ação da gravidade, removendo a água, que flui por entre os poros do meio filtrante e se separa do lodo. Conforme a carga volumétrica sobre o filtro e o percentual de água livre são reduzidos e à medida em que ocorre deposição das partículas sólidas sobre o filtro, é formada uma espécie de torta que vem a dificultar a passagem pelos poros da manta, resultando na redução da taxa de retirada da água livre. Ao fim do

processo de drenagem, a evaporação se torna o principal responsável pela secagem do lodo (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2007; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017; PANDEY; JENSSEN, 2015).

3.6.1. Mecanismo de drenagem gravitacional

Segundo Gomide (1980), os processos de separação sólido-líquido podem ser classificados quanto ao movimento das fases em duas situações predominantes: O sólido se move através do fluido em repouso, ou fluido se move por entre a fase sólida estacionária. Nos processos de centrifugação, pode se verificar o primeiro tipo de fenômeno, enquanto na filtração o segundo.

O processo de filtração ocorre quando uma suspensão é forçada em face de um leito poroso, fazendo com que parte dos sólidos se acumule sobre este meio, formando uma camada de depósito denominada torta, e cuja espessura vai aumentando ao longo da operação. Diferente do senso comum, os poros do meio filtrante não necessitam ter, obrigatoriamente, diâmetros menores do que aquele das partículas sólidas da suspensão. Os canais presentes no meio filtrante normalmente não são retilíneos, retendo, já no início do processo, algumas partículas. A sobreposição destes sólidos, por sua vez, forma uma torta que se torna o leito poroso filtrante da operação. Desta forma, a primeira parte do percolado tende a apresentar maior turbidez, pois a camada filtrante ainda não se estabeleceu. As características da torta variam com a natureza das partículas suspensas e com as condições gerais da filtração, sendo que a resistência oferecida ao escoamento do filtrado varia ainda com a espessura da camada formada (BRAGA, 2003).

A filtragem pode ocorrer em dois tipos de situação, a primeira em sistemas pressurizados pelo uso de equipamentos eletromecânicos, e a segunda de forma natural, onde o processo se dá pela ação gravitacional, sendo conhecida também como drenagem ou percolação, sendo estes os alvos principais deste trabalho.

A dinâmica dos fluidos através de meios porosos foi amplamente estudada e descrita por Darcy, sendo utilizada em diversas aplicações de engenharia e também sendo útil para o entendimento da filtração/drenagem de lodos. Em escoamentos de fluidos Newtonianos em meios porosos, que apresentam baixos valores de Reynolds ($Re \ll 1$), a lei de Darcy se apresenta conforme apresentado na Equação 3.2:

$$q = \frac{k \Delta P}{\mu L} \quad \text{Equação 3.2}$$

Em que: q é a vazão média por unidade de área (m/s), μ é a viscosidade dinâmica do fluido ($N.s/m^2$), k é a permeabilidade do meio em (m/s), e $\Delta P/L$ é a perda de carga ao longo da distância L (N/m^3). A condutividade hidráulica do leito poroso a ser percorrido pode ser calculada pela razão entre a permeabilidade e a viscosidade dinâmica ($K = k/\mu$), sendo derivada das equações de Stokes, assumindo relações lineares entre a velocidade do fluxo e as forças viscosas. Como visto anteriormente, o lodo (com ST igual ou acima de 2%), se apresenta como um fluido não-Newtoniano, fazendo com que as taxas de deformação aplicadas ao material durante a filtragem impliquem em relações não lineares entre a velocidade específica e a perda de carga, devido a variação da viscosidade aparente. Nestes casos surge a necessidade da utilização da Viscosidade Efetiva (μ_{ef}) que por sua vez é dependente das variáveis o fluxo e pode ser utilizada para corrigir os efeitos não lineares gerados (EBERHARD *et al.*, 2019).

Já Jeffrey (1959), tendo como objetivo a avaliação do processo de drenagem natural da água livre, relacionou a altura da lâmina líquida com o tempo de drenagem e a permeabilidade do lodo, utilizando para tal um aparato denominado drenômetro, que consiste em um tubo fixado a um meio suporte e coberto para evitar a interferência da evaporação. A Figura 6 apresenta uma imagem do equipamento. A partir dos estudos experimentais, o autor concluiu que a fórmula apresentada na Equação 3.3 rege o desaguamento do lodo por meio da percolação.

$$\ln \frac{v_l}{v_0} = \frac{-k.t}{L} \quad \text{Equação 3.3}$$

Em que: w_l é a diferença entre o volume aplicado e o volume da torta, w_0 é o volume de água livre presente na amostra, k é o coeficiente de drenabilidade do material, t é o tempo e L é a altura da torta.

Figura 6 – Drenômetro utilizado para os experimentos de desaguamento e a formação da torta filtrante.



Fonte: Adaptado de Louzada (2018).

O coeficiente de drenabilidade, apresentado na Equação 3.3 permite avaliar a facilidade com que o fluido atravessa a torta formada pela deposição de material, podendo ser relacionado a condutividade hidráulica, presente na Lei de Darcy, que rege a dinâmica dos fluidos em meios porosos (MORTARA, 2011; SANTOS, 2012).

De acordo com os experimentos realizados por Weggel e Dortch (2012), a condutividade hidráulica do filtro aplicado em sistemas de desaguamento é de importância secundária, quando relacionado a condutividade das tortas formadas pelos lodos biológicos, que domina os processos.

Um ponto importante na drenagem dos lodos é a concentração de sólidos e as características do material a ser desaguado. No início da filtração há uma maior remoção do líquido e o início da sedimentação dos sólidos suspensos, que gradativamente forma uma camada filtrante, agregando os sólidos aplicados. A torta de lodo é uma camada de baixa permeabilidade formada pela deposição de partículas suspensas, sua formação depende do tamanho das partículas do lodo, seu conteúdo orgânico, e da abertura do geotêxtil filtrante (KOERNER; KOERNER, 2006; GUIMARÃES; URASHIMA; VIDAL, 2014). O teor de voláteis do material, representando a fração orgânica, afeta consideravelmente o processo de formação da camada filtrante, isso ocorre devido as interações elétricas entre partículas (LIBÂNIO, 2010).

Os lodos anaeróbios, quando comparados aos aeróbios, apresentam características que favorecem a sua drenabilidade, como a diminuição da viscosidade,

mineralização da matéria orgânica, além da formação de bolhas de gás geradas pelo processo de digestão, que tendem a subir até a superfície criando caminhos para a passagem de água e favorecendo a percolação (WANG *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2017).

De acordo com Spellman (1997) e tendo em vista a Lei de Darcy, pode-se perceber que o aumento da viscosidade do líquido gera um aumento da força resistiva e a consequente queda da vazão de escoamento em meios porosos. Estima-se que a viscosidade também possua grande influência nas taxas de drenagem em leitos de drenagem (MORTARA, 2011).

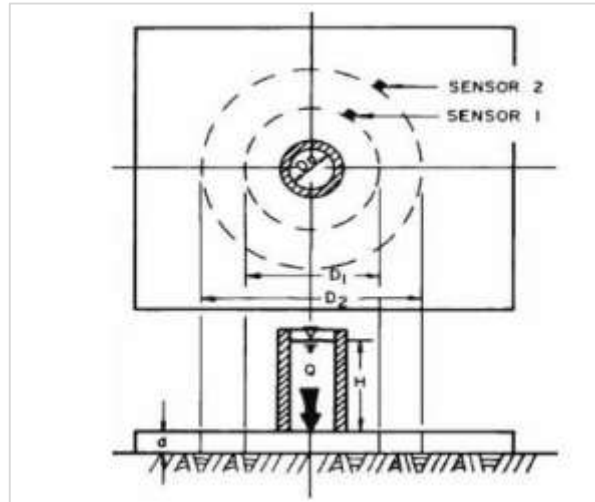
3.6.2. Testes de aptidão ao desaguamento

Vários métodos de avaliação de aptidão ao desaguamento foram desenvolvidos ao longo dos anos, no entanto cada um destes reflete predominantemente um mecanismo de desaguamento, podendo ser relacionado com tipos de processos específicos. O ensaio de Tempo de Sucção Capilar (TSC), por exemplo, é mais indicado para descrever desaguamentos onde o fenômeno da drenagem é predominante, já a Resistência Específica a Filtração (REF) descreve melhor métodos de filtração à vácuo (LOUZADA, 2018; SPAVIER, 2003; TO *et al.*, 2016).

Resumidamente o TSC é um ensaio rápido e simples, cujo objetivo consiste em medir o tempo necessário para que o líquido filtrado de uma amostra de lodo escoe por capilaridade entre dois círculos concêntricos sobre um papel filtro. O instrumento utilizado para mensurar este tempo funciona automaticamente e é composto por dois blocos de acrílico, um tubo de aço inox, um filtro de papel Whatman nº17 e três eletrodos fixos na parte superior do bloco, sendo conectadas a um temporizador eletrônico (Figura 7). Quando utilizado, o lodo deve ser despejado dentro do tubo de inox, que entra em contato com o filtro e devido ao fenômeno da capilaridade, flui radialmente através do papel até atingir os sensores e ativar os seus temporizadores. O tempo é encerrado quando o fluxo atinge o terceiro sensor, apresentando o valor final em sua tela (TO *et al.*, 2016).

Valores de TSC baixos, menores que 20 s, são indicativos de lodos de fácil desaguamento, enquanto valores maiores indicam uma menor aptidão reduzida a desaguar (AGARWAL; ABU-ORF; NOVAK, 2005).

Figura 7 – Configuração do aparato utilizado para a aferição do TSC.

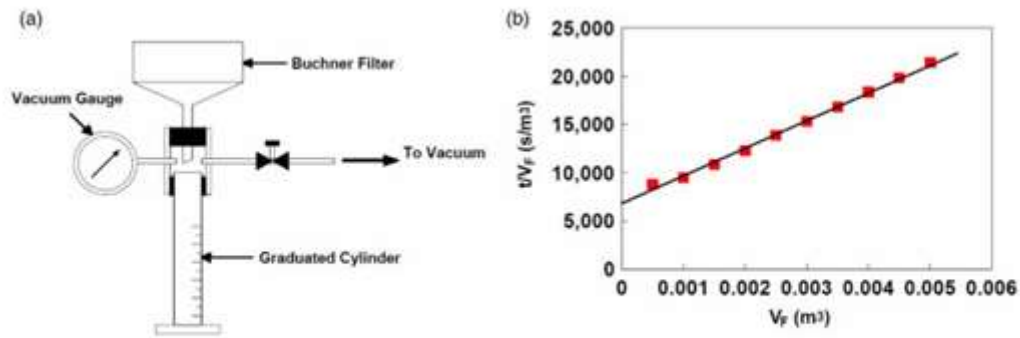


Fonte: To e outros (2016).

Como o TSC é uma medida empírica e possui diversos fatores que podem influenciar os resultados, alguns autores utilizam o TSC normalizado, que consiste na sua normalização pela divisão do valor obtido em segundos pelo percentual de ST na amostra (TOMINAGA, 2011; GUIMARÃES; URASHIMA; VIDAL, 2014)

Os ensaios de REF, por sua vez, medem a resistência do lodo face ao escoamento da água através de um meio poroso, propiciado por vácuo ou pressão positiva. Quanto maior a resistência específica, menor a aptidão ao desaguamento do lodo. Geralmente os valores de REF são considerados baixos quando são da ordem de 10^{10} a 10^{11} m/kg, já valores entre 10^{14} e 10^{15} m/kg são considerados de difícil desaguabilidade. A obtenção dos valores de REF varia com a pressão aplicada no sistema, área superficial e dimensão dos poros do filtro, além da viscosidade do fluido (LOUZADA, 2018; SPAVIER, 2003).

Figura 8 – Aparato experimental e exemplo de curva obtida durante o teste de Resistência Específica a Filtração.



Fonte: Adaptado de To e outros (2016).

O teste é realizado aplicando-se um determinado volume de lodo sobre o papel filtro e, com a atuação do vácuo, são medidos os volumes filtrados de acordo com o tempo. Esses dados são plotados em gráfico traçado com o fluxo inverso (tempo/volume filtrado) pelo volume de filtrado acumulado, conforme apresentado na Figura 8. Deste gráfico então é extraído o coeficiente de declividade que servirá para calcular a REF usando a Equação 3.4 (TO *et al.*, 2016).

$$REF = \frac{2PA^2b}{\mu c} \quad \text{Equação 3.4}$$

Em que: P representa a pressão aplicada (N/m^2), A é a área do meio filtrante (m^2), b é o valor do coeficiente de declividade (s/m^6), μ é a viscosidade do filtrado ($N \cdot s/m^2$) e c é a massa de sólidos da torta seca por unidade de volume filtrado (kg/m^3) e a REF é expressa em m/kg .

3.7. DESAGUAMENTO EM GEOTÊXTEIS

3.7.1. Materiais geotêxteis

Os materiais geossintéticos foram desenvolvidos no âmbito da engenharia geotécnica visando a substituição de materiais naturais, uma vez que estes não permitem uma simples avaliação de seus parâmetros de comportamento, sendo praticamente artesanais, possuindo também menor durabilidade, geralmente por não

suportar ciclos seguidos de saturação e secagem, resultando num padrão de qualidade difícil de controlar (VIDAL, 2002).

Os geotêxteis, funcionam como filtros sintéticos, sendo utilizados em forma de mantas permeáveis, flexíveis e finas, fabricadas a partir de fibras sintéticas que, por sua vez, são produtos de diferentes polímeros concebidos em variadas configurações (BARROSO, 2007).

Figura 9 – Utilização de geotêxtis em obras hidráulicas costeiras.



Fonte: Lawson (2008).

A utilização dos geotêxteis vai além da área de aplicação da engenharia geotécnica, possuindo diversas finalidades em outros campos da engenharia, principalmente em obras hidráulicas e de drenagem, como se pode observar na Figura 9. Segundo Vidal (2002), as principais funções desempenhadas por estes produtos, são:

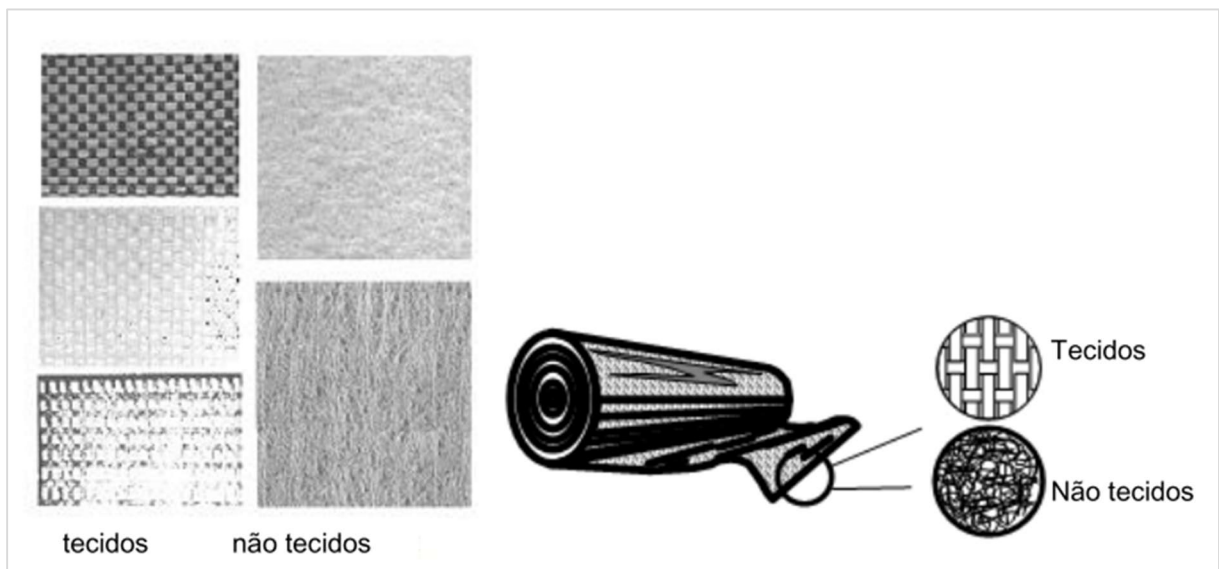
- Filtração: Retenção do solo ou de outras partículas, permitindo a passagem livre do fluido em movimento;
- Drenagem: Coleta e condução de um fluido pelo corpo de um geossintético;
- Barreira de fluxo: Controle ou desvio de fluxo;
- Reforço: Utilização das propriedades mecânicas de um geossintético para a melhoria do comportamento mecânico de solos;
- Proteção: Limitação ou prevenção de danos a elementos de obras geotécnicas;
- Separação: Ação de impedir o contato e a mistura de materiais adjacentes;

- Controle de erosão superficial: Prevenção da erosão superficial de partículas do solo devido às forças do vento ou escoamento superficial.

3.7.2. Classificação e composição

Os geotêxteis são classificados, de acordo com o seu processo de fabricação, sendo principalmente diferenciados entre geotêxteis tecidos e não tecidos. Os geotêxteis tecidos apresentam uma estrutura organizada de fitas de material e os não tecidos se assemelham a um feltro, apresentando uma forma desordenada das fibras, conforme demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Geotêxtil e as estruturas de tecido e não-tecido.



Fonte: Vidal (2002).

O geotêxtil tecido é um material produzido em máquinas têxteis convencionais a partir do entrelaçamento de monofilamentos (fitas ou tiras), segundo direções preferenciais denominadas trama (sentido transversal) e urdume (sentido longitudinal). As mantas geotêxteis não tecidas, por sua vez, são materiais compostos por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, que são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos (MORTARA, 2011).

De acordo com Freitas (2003), os polímeros mais usados na fabricação de geotêxteis são os do grupo de termoplásticos, capazes de amolecer ou endurecer

sob ação da variação de temperatura, sem que haja comprometimento do material. Nesse grupo destacam-se o polietileno, o poliéster e o polipropileno, que recebem também alguns aditivos, cujo objetivo é melhorar as propriedades do produto ou aumentar a sua durabilidade.

3.7.3. Utilização dos geotêxteis no saneamento

Segundo Lawson (2008), os geotêxteis historicamente vêm sendo aplicados no âmbito da engenharia para a contenção de solos arenosos, formando estruturas utilizadas em aterros hidráulicos e no controle de erosões. A sua capacidade de “encapsular” materiais granulares, filtrando e desidratando-os, começou a ser empregada também para conter e conseqüentemente desaguar sedimentos contaminados, reduzindo significativamente o seu volume e facilitando o transporte e a disposição.

Recentemente, este método passou também a ser empregado para contenção de lodos biológicos. À partir das primeiras aplicações bem sucedidas, foram desenvolvidas pesquisas para otimizar estes sistemas, buscando melhorar a retenção de sólidos e da qualidade do líquido percolado, reduzindo seu volume e contendo o lodo desaguado, facilitando o seu gerenciamento (MANGONE *et al.*, 2018; TOMINAGA, 2011).

O método de desaguamento consiste em introduzir o lodo nas estruturas drenantes com velocidades controladas, retendo a fração sólida e permitindo a passagem do líquido, conhecido como percolado ou filtrado. Durante a percolação, o líquido presente no lodo infiltra através do geotêxtil devido ao gradiente e ao peso dos sólidos, contrapondo a retenção das partículas (LAWSON, 2008; YEE; LAWSON, 2012).

No Brasil, a utilização de sistemas naturais de desaguamento de lodos é favorecida pela predominância do clima tropical e pela disponibilidade de áreas para a sua instalação. Visando o aumento de produtividade nestes sistemas, as mantas geotêxteis, utilizadas geralmente em obras civis, começaram a ser empregadas em métodos convencionais de remoção de umidade de lodos, substituindo materiais como a geomembrana de polietileno nas bolsas drenantes e se tornando o meio

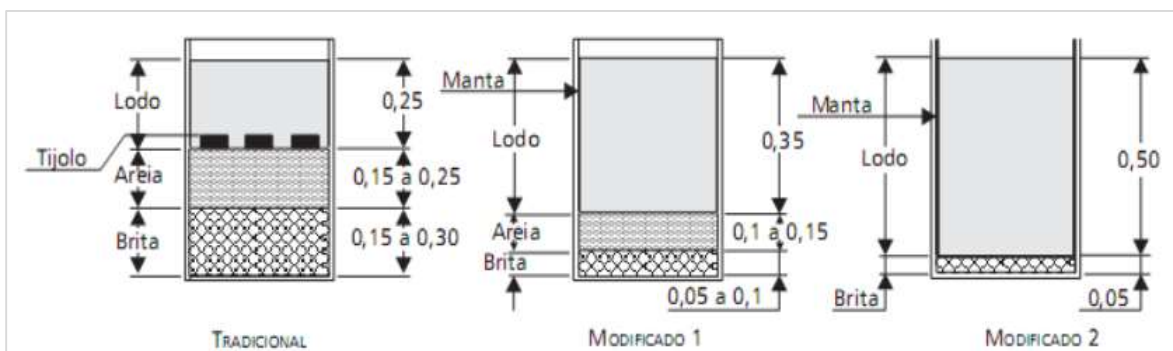
filtrante de leitos de drenagem (ACHON; COIMBRA; KELLNER, 2019; KURODA *et al.*, 2014; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017).

3.7.4. Leitos de Drenagem

O desenvolvimento dos leitos de drenagem tem origem nos leitos de secagem, um processo de desaguamento utilizado desde o início do século XX para a desidratação de lodos gerados em estações de tratamento de água e esgoto. Este sistema está presente em cerca de 2/3 dos sistemas de tratamento de lodos de ETEs brasileiras (CORDEIRO, 2001).

Os Leitos de Drenagem consistem de uma ligeira modificação na base dos Leitos de Secagem, resultado das pesquisas realizadas por Cordeiro (2001), podendo ser observada na Figura 11. Em trabalhos posteriores, como nos conduzidos por Fontana (2004), Barroso (2007), Fontana e outros (2007) e Mortara (2011), a alteração da estrutura física do leito de secagem tradicional, por meio da substituição total da areia do meio filtrante pela manta geotêxtil e redução da altura da camada de brita, capacitou o aumento na velocidade de retirada da água livre do lodo e melhoria da qualidade do drenado.

Figura 11 – Vista lateral do Leito de Secagem e suas modificações que sucederam nos Leitos de Drenagem.



Fonte: Cordeiro (2001).

O processo de desaguamento em métodos naturais tem de início a gravidade como força predominante na retirada de água, de modo que a água livre, sob ação gravitacional, escoar por entre os sólidos ainda em suspensão até atingir o meio filtrante (manta geotêxtil) e ser retirada do lodo em definitivo. A taxa de retirada de água vai diminuindo à medida que o percentual de água livre e a carga hidráulica sobre o filtro se reduzem, tendo como consequência também a formação de uma

camada filtrante pela deposição das partículas do material sobre o filtro, reduzindo a permeabilidade (VON SPERLING, 2007)

De maneira geral, todo elemento de filtração deve atender dois requisitos básicos, manter a capacidade drenante eficiente (eficiência hidráulica) e proporcionar a retenção de partículas. Assim, o material dreno/filtrante constituído pelas mantas geotêxteis deve apresentar um coeficiente de permeabilidade elevado, para promover a capacidade drenante da água livre e uma distribuição de tamanho de poros que, seja capaz de reter partículas flocculentas ou sólidas (BARROSO, 2007; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017).

3.7.5. Bolsas drenantes

O desaguamento em “bags” de geossintéticos consistem no acondicionamento do lodo em containers ou bolsas fabricadas de material geotêxtil. O tecido apresenta pequenos poros que permitem a passagem da água e a retenção dos sólidos (LIBÂNIO, 2010). Existem bags horizontais e verticais (Figura 12), os horizontais normalmente são utilizados em instalações maiores, enquanto os bags verticais em menores. Eles podem ser lavados e reutilizados 20 a 30 vezes. Apesar de ser uma forma de desaguamento natural, nos bags de geotecido é necessária a aplicação de polímeros (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011).

Figura 12 – Bolsas drenantes verticais e horizontais



Fonte: Silveira (2012).

Quando comparada as técnicas convencionais expostas ao ar livre, o desaguamento de lodos em bolsas drenantes mostra uma menor dependência das condições meteorológicas e climáticas da região, devido a uma diminuição considerável na penetração da água de chuva nos sistemas. Este método necessita também de uma menor área operacional, devido à possibilidade de empilhamento das bolsas, facilitando a manutenção, o transporte e a operação (GUIMARÃES; URASHIMA; VIDAL, 2014).

De acordo com Jordão e Pessoa (2017), os BAGs, após utilizados, podem ser destinados à uma área de descarte ou permanecerem no próprio local, já o líquido drenado do desaguamento de lodos biológicos deve retornar à entrada da ETE.

Diante da diversidade de sistemas de desaguamento disponíveis, as bolsas drenantes representam uma das alternativas mais simples devido a sua baixa mecanização e facilidade de operação (MANGONE *et al.*, 2018).

3.7.6. Ensaios de desaguamento em geotêxteis

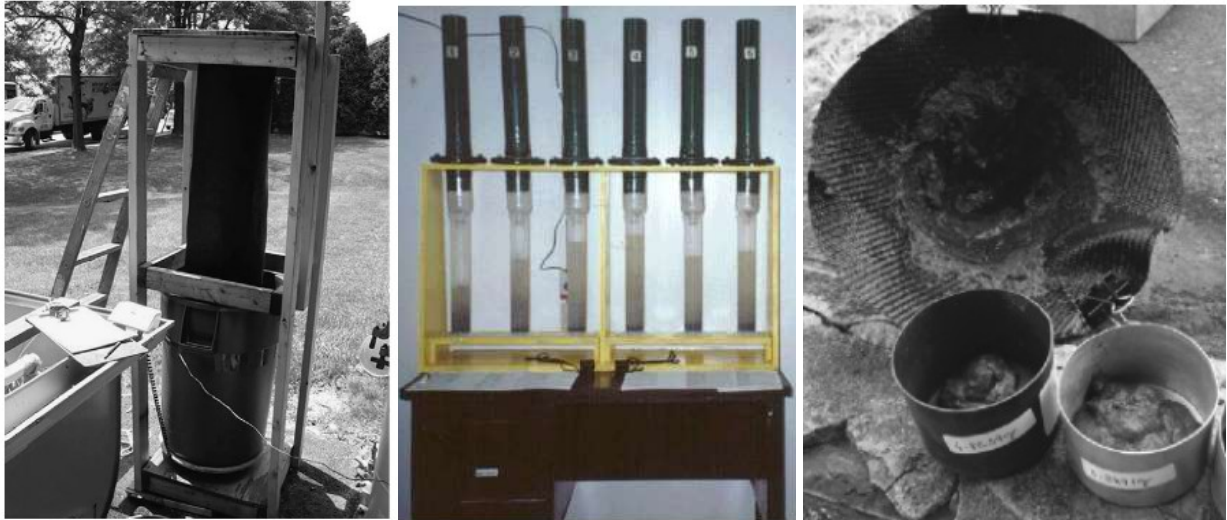
Diversos tipos de ensaios podem ser realizados no intuito de conhecer o desempenho do material filtrante e também das características do material a ser desaguado. Dentre estes ensaios, os mais frequentes são os de tubo, cone ou bolsa filtrante, permitindo uma avaliação simples e consistente, podendo ser realizada em laboratório ou em campo, analisando a combinação entre o geotêxtil e as condições do lodo a ser desaguado (LAWSON, 2008; TOMINAGA, 2011).

Os experimentos realizados em tubos e cones filtrantes são ensaios simples e rápidos, permitindo uma primeira análise dos percentuais de material retido no geotêxtil e a qualidade do efluente obtido, tendo sido discutido por Lawson (2008), Wanke (2003), Oliveira e Oliveira (2017), entre outros. Podendo também ser empregado para avaliar a necessidade de se utilizar aditivos químicos para o condicionamento do material a ser desaguado, sendo útil para analisar a dosagem ótima a ser aplicada ao material (SILVEIRA *et al.*, 2015).

Estes ensaios necessitam de poucos equipamentos para serem executados. Os dispositivos de desaguamento podem ter configurações e dimensões diversas, sendo frequente a utilização de bacias de contenção laterais feitas de PVC, para os

tubos, ou mesmo de geotêxtil, para os cones e bolsas. O fundo das bacias é confeccionado também em material geossintético, favorecendo a drenagem e permitindo a coleta do percolado para análises quantitativas e qualitativas. Na Figura 13 pode se observar algumas das técnicas apresentadas na literatura, como o teste de bolsa suspensa, o desaguador estático vertical e a bacia ou cone de filtração.

Figura 13 – Configurações dos testes de desaguamento de lodos diversos.



Fonte: Weggel (2012); Wanke (2003); Guimarães, Urashima e Vidal (2014).

Os experimentos propostos na literatura permitem mensurar o desempenho do desaguamento e da filtração nos sistemas concebidos com mantas geotêxteis, dando condições para a aferição da vazão do efluente e da quantidade de sólidos que passaram em um período de tempo específico. Com esta quantidade de sólidos passantes é possível estimar a quantidade total de sólidos suspensos e também determinar as propriedades do material retido, como percentagens de sólidos e umidade. Pode-se também examinar a natureza da torta de lodo formada no interior do dispositivo (NEWMAN *et al.* 2004; KOERNER; KOERNER 2006; MARTINS 2006).

O procedimento destes ensaios consiste em verter o material na entrada do sistema de desaguamento e coletar as amostras de efluente em intervalos de tempo, para analisar a eficiência na retenção de sólidos e da drenagem do líquido percolado. Desta forma, foram descritas algumas metodologias na literatura especializada como pode se observar na Tabela 5.

Tabela 5 – Tipo de lodo e método utilizado para os ensaios de desaguamento.

Referência	Tipo de lodo	Método utilizado
Wanke (2003)	Lodos de UASB + Biofiltro	Desaguador Estático Vertical
Louzada (2018), Nobrega (2020)	Lodos de UASB + Algáceo	
Wu <i>et al.</i> (2020), (Weggel <i>et al.</i> , 2011); Koerner e Koerner (2010)	Sedimentos arenosos	Teste de Bolsa Suspensa
Tominaga (2011)	Caulinita	Bolsa de pequena dimensão
Ardila <i>et al.</i> , (2020), Guimarães, Urashima e Vidal (2014)	Lodos de ETA	
Silveira <i>et al.</i> (2015)	Lodo anaeróbio	Leito de drenagem de bancada
Achon <i>et al.</i> (2019), Mortara (2011)		
Oliveira e Oliveira (2017)	Lodo de Efluente Saneante Domissanitário	

Fonte: Autoria própria.

3.7.7. Avaliação de desaguamentos em geotêxteis

Os autores Guimarães, Urashima e Vidal (2014) propuseram, mediante coletânea da literatura especializada, índices de performance utilizados na avaliação de desaguamentos utilizando bolsas geotêxteis. Os parâmetros utilizados por ele foram os seguintes: Eficiência de Filtração (EF), Eficiência de Desaguamento (ED) e Sólidos Passantes (SP), todos medidos 24 horas após os desaguamentos.

A EF é a relação entre a concentração de ST no lodo bruto antes do desaguamento e a concentração de ST no líquido filtrado após a filtração (MOO-YOUNG; GAFFNEY; MO, 2002). Entretanto a EF também é um parâmetro relacionado a capacidade do geotêxtil em reter os sólidos comparada a máxima expulsão de água constituinte nos flocos de lodo (MUTHUKUMARAN; ILAMPARUTHI, 2006), sendo apresentada na Equação 3.5.

$$EF (\%) = \frac{CST_{INICIAL} - CST_{FINAL}}{CST_{INICIAL}} \times 100 \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde a *EF* representa a eficiência de filtração (%), o $CST_{INICIAL}$ a concentração inicial de sólidos totais (g/L) e a CST_{FINAL} a concentração final de sólidos no filtrado.

A Eficiência de Desaguamento (ED), por sua vez está relacionada ao percentual de sólidos no lodo antes e depois do desaguamento em geotêxtil, sendo definida como a capacidade do geotêxtil em reter partículas sólidas e ao mesmo tempo permitindo

a filtração da parte líquida (MOO-YOUNG; GAFFNEY; MO, 2002), como consta na Equação 3.6.

$$ED (\%) = \frac{TST_{FINAL} - TST_{INICIAL}}{TST_{FINAL}} \times 100 \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde a *ED* representa a eficiência de desaguamento (%), o TST_{FINAL} o teor final de sólidos totais da torta de lodo resultante (%) e o $TST_{INICIAL}$ o teor inicial de sólidos no lodo bruto aplicado (%).

Diante dos parâmetros utilizados para avaliar a performance dos desaguamentos o índice Sólidos Passantes (SP) é considerado uma forma simples e precisa para mensurar a performance do sistema (SATYAMURTHY; BHATIA, 2009). Este índice avalia o desaguamento comparando os Sólidos Suspensos Totais (SST) no filtrado com a quantidade inicial de sólidos totais no lodo a ser desaguado. Postulado na Equação 3.7.

$$SP (\%) = \frac{SST_{FINAL}}{CST_{INICIAL}} \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde *SP* representa o índice Sólidos Passantes (%), o SST_{FINAL} a concentração de sólidos suspensos presentes no filtrado (g/L) e $CST_{INICIAL}$ a concentração de sólidos totais no lodo bruto aplicado (g/L). Tominaga (2011) propõe a substituição dos sólidos suspensos totais (SST) pelos sólidos totais (ST), uma vez que o ST corresponde a soma entre os sólidos suspensos e os sólidos dissolvidos totais, fazendo com que não seja ignorada esta última parte dos sólidos na avaliação. Desta forma, o índice segue, alterado na Equação 3.8.

$$SP(\%) = \frac{CST_{FINAL}}{CST_{INICIAL}} \quad \text{Equação 3.8}$$

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada a metodologia realizada na pesquisa, sendo composta pela contextualização da pesquisa, planejamento das etapas de trabalho e desenvolvimento dos experimentos.

3.8. CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado a partir de um sistema piloto de tratamento de águas residuárias. Tal sistema encontra-se em uma das Estações de Tratamento de Esgoto da CESAN, localizada no bairro Araçás, município de Vila Velha, Estado do Espírito Santo e tem capacidade para tratar uma vazão média de 0,56 L/s de esgoto sanitário. É composta por dois reatores do tipo UASB, dois reatores anaeróbios compartimentados (RAC) e duas lagoas de alta taxa (LAT) (Figura 14). A ETE Araçás recebe 520 L/s de esgoto afluyente, do qual uma pequena fração é desviada para a ETE piloto, após tratamento preliminar por gradeamentos grosseiro, fino e desarenação.

Diante da diversidade de processos empregados no sistema piloto, esta pesquisa limita-se ao monitoramento, caracterização e desaguamento dos lodos produzidos na etapa de tratamento anaeróbio realizadas pelo reator UASB convencional.

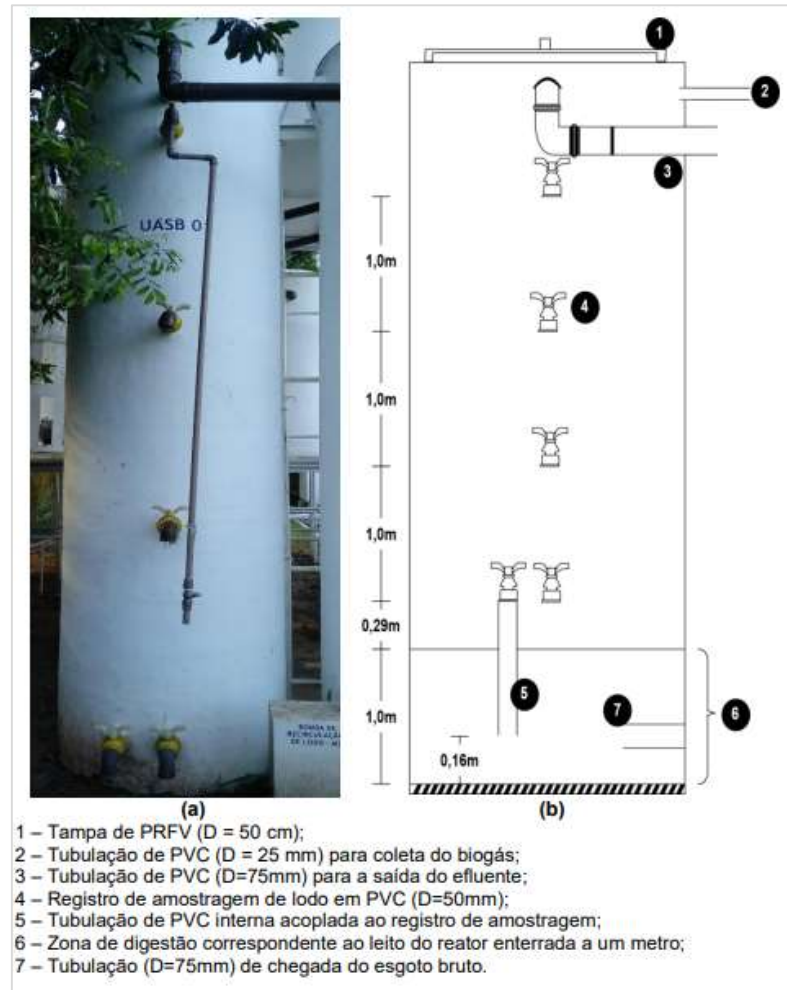
Figura 14 – Estação de tratamento de esgoto experimental localizada no bairro Araçás.



Fonte: Autoria própria.

O reator UASB convencional é construído em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), possui uma altura útil de 4,8m, sendo 1 metro abaixo da terra, e equipado com um separador de fases. As principais características do reator UASB estão apresentadas na Figura 15 e na Tabela 6. Observa-se que as válvulas de amostragem de lodo do UASB estão dispostas a cada metro ao longo de sua altura.

Figura 15 – Foto e desenho esquemático do reator UASB utilizado na pesquisa.



Fonte: Assis (2017).

Tabela 6 – Características gerais do reator UASB utilizado na pesquisa.

Características do reator UASB 01			
Diâmetro (m)	1,0	Altura da torneira 2	1,29
Área útil (m ²)	4,8	Altura da torneira 3	2,29
Volume útil (m ³)	3,78	Altura da torneira 4	3,29
Altura da torneira 1	0,16	Altura da torneira 5	4,29

Fonte: Autoria própria.

Esta pesquisa foi dividida em duas fases principais, sendo cada uma delas composta por etapas. A primeira fase está relacionada a caracterização dos lodos de manta e leito utilizados, e a segunda, trata dos desaguamentos em mantas geotêxteis como material filtrante em configurações distintas. A descrição das fases pode ser observada abaixo, bem como a sua relação com os objetivos propostos na Tabela 7.

- Fase 1: Caracterização dos lodos do reator UASB
 - Caracterização físico-química dos lodos de manta e leito.
 - Verificação da aptidão ao desaguamento dos lodos de manta e leito por meio do Tempo de Sucção Capilar e Resistência Específica a Filtração.
 - Determinação da distribuição das frações de água nos lodos.
 - Caracterização reológica dos lodos.

- Fase 2: Desaguamento natural utilizando geotêxteis
 - Avaliação da influência da classe do geotêxtil e a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) nos ensaios de desaguamento no Desaguador Estático Vertical (DEV).
 - Utilização de índices de desaguamento para comparação dos desaguamentos no DEV e na Bolsa Drenante Vertical (BDV) utilizando lodos de manta e de leito com carga volumétrica fixa em 1000mL.
 - Integração do DEV com a BDV em uma única configuração, a Bolsa Desaguadora Vertical (BDEV).
 - Desaguamentos na BDEV com diferentes comprimentos do geotêxtil e Taxas de Aplicação de Sólidos.
 - Verificação da influência da área filtrante lateral no desaguamento utilizando geotêxteis.

Tabela 7 – Relação entre os objetivos e as fases da pesquisa.

Objetivo Geral	Fases	Etapas	Objetivo Específico
Avaliar a capacidade de desaguamento de lodos de um reator UASB através da drenagem natural de água livre a partir de desaguadores estáticos utilizando mantas geotêxteis.	FASE 1 Caracterização dos lodos do reator UASB	Caracterização dos lodos de manta e leito	Caracterização físico-química
			Testes de aptidão ao desaguamento
			Determinação das frações de água nos lodos
			Caracterização reológica
	FASE 2 Desaguamento de lodos de UASB utilizando materiais geotêxteis	Etapa 1 TAS x GEO	Avaliação de influência do geotêxtil nos desaguamentos
		Etapa 2 DEV x BDV	Comparação de desempenho entre DEV e BDV
		Etapa 3 DEV + BDV	Verificação da influência do comprimento da bolsa geotêxtil

Fonte: Autoria própria.

3.9. FASE 1: Caracterização dos lodos do reator UASB

A primeira fase da pesquisa consistiu na caracterização dos lodos de leito e manta do reator, no que diz respeito a sua aptidão ao desaguamento, aos seus parâmetros físico-químicos, reológicos e também em relação a distribuição das frações de água nestes.

3.9.1. Caracterização físico-química

Para caracterizar os lodos do reator UASB, foram utilizados como referência os trabalhos realizados por Assis (2017), Louzada (2018) e Garcia (2020), que realizaram suas pesquisas com o mesmo reator em questão. A vazão do reator UASB foi controlada diariamente através da caixa de distribuição de entrada a partir do método volumétrico, por meio da utilização de um béquer de 2 L para medir o volume e um cronômetro para aferir o tempo.

O tempo de detenção hidráulica médio (TDH) do reator foi mantido em 9,5 horas. Por este motivo, os ajustes na vazão afluyente são feitos para alcançar a vazão de referência (0,11L/s). O acompanhamento da produção de lodo do reator foi feito semanalmente por meio da coleta de amostras de lodo em todas as válvulas: T1, T2, T3, T4 e T5. Os primeiros 500 mL foram descartados para que o material acumulado

no interior dos tubos não fosse amostrado, e cerca de 200 mL de lodo foram coletados para realização das análises de Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV), seguindo os protocolos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), conforme apresentado no Quadro 1.

A partir dos resultados das análises da série de sólidos, foram traçados os perfis de concentração de ST e SV, e assim observou-se a tendência de aumento do nível de lodo no reator, realizando o descarte do lodo quando este atinge o separador trifásico.

Quadro 1 - Análises laboratoriais para a caracterização físico-química dos lodos.

Parâmetro	Método	Referência
Sólidos Totais (ST)	Gravimétrico 2540B; 2540E	APHA, 2017
Sólidos Voláteis (SV)	Gravimétrico 2540B; 2540E	APHA, 2017

Fonte: Autoria própria.

Além das análises físico-químicas para o acompanhamento do lodo no reator, estas também foram realizadas para mensurar a concentração de ST e SV presente nos lodos a serem desaguados. Estes parâmetros são necessários para o cálculo da Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS), requisito para grande parte dos experimentos realizados na pesquisa, e também para a comparação com os índices de aptidão ao desaguamento e distribuição das frações de água.

3.9.2. Coleta de amostras para as caracterizações e ensaios

As amostras utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa foram coletadas em duas alturas diferentes do reator, em suas duas primeiras válvulas amostradoras, a primeira localizada a 0,16m e a segunda a 1,29m de altura a partir de seu fundo. A tomada mais baixa compreende a região do leito, já a superior imediata faz parte da região de manta. Desta forma os lodos utilizados foram diferenciados e nomeados de acordo com a sua região de origem no reator.

A cada coleta foram armazenados 20 litros de lodo, acondicionados em bombonas plásticas de capacidade de 5 litros. A coleta foi realizada utilizando um béquer de 2L,

como visto na Figura 16, e a amostra utilizada para as caracterizações foi composta, obtida pelo desvio de alíquotas de 100mL no ato do enchimento de cada frasco. A amostra para as análises físico-químicas foi levada para o laboratório ainda fresca e o material para desaguamento foi mantido refrigerado a 4°C por no máximo 7 dias, como descrito pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017). Pelo menos 2 horas antes dos ensaios, o material a ser desaguado foi retirado da refrigeração, para aclimatação e homogeneização.

Figura 16 – Amostra de lodo coletada em béquer plástico.



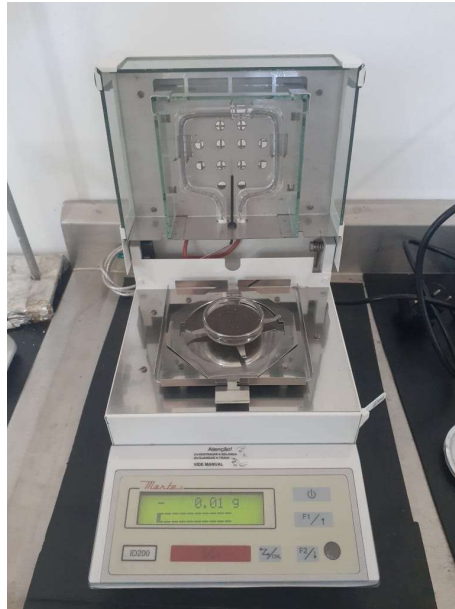
Fonte: Autoria própria.

3.9.3. Determinação das frações de água presentes no lodo

A determinação das frações de água presentes no lodo foi realizada pelo ensaio termogravimétrico, que consiste na secagem térmica da amostra sob temperatura controlada. Foi utilizada uma balança acoplada a um sistema de secagem térmica (MARTE modelo ID200), apresentada na Figura 17. As amostras foram submetidas a temperaturas relativamente baixas, (50 °C), recomendada por diversos autores (SMOLLEN, 1990; ROBINSON e KNOCKE, 1992), com pesagens periódicas até que não houvesse mais perda de massa. O mapeamento das águas foi realizado através de uma diferenciação entre as taxas de secagem que cada tipo de água possui. Este procedimento foi realizado através da avaliação da curva termogravimétrica traçada

pela taxa de secagem e pela razão entre a massa de água evaporada e a massa de sólidos totais secos.

Figura 17 – Balança termogravimétrica.



Fonte: Autoria própria.

3.9.4. Caracterização quanto a aptidão ao desaguamento

A determinação da aptidão do lodo de descarte quanto a sua desaguabilidade foi realizada por dois métodos de avaliação, o Tempo de Sucção Capilar (TSC) e a Resistência Específica à Filtração (REF), conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Análises laboratoriais para a aptidão ao desaguamento.

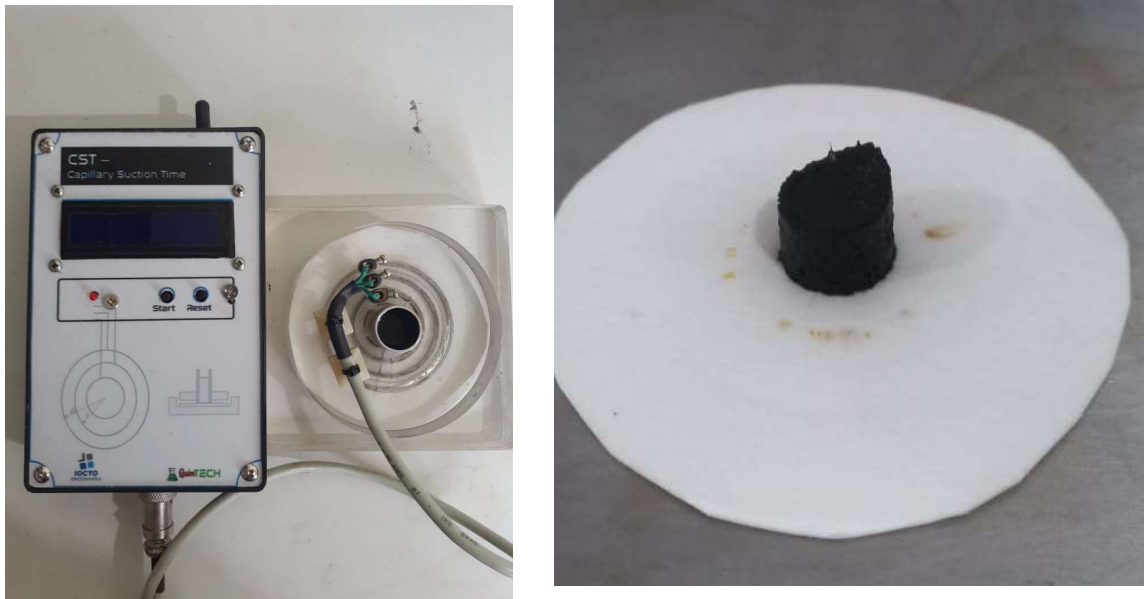
Parâmetro	Método	Referência
Tempo de Sucção Capilar (TSC)	2710 G	APHA, 2017
Resistência Específica a Filtração (REF)	2710 H	APHA, 2017

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios para a obtenção do Tempo de Sucção Capilar foram realizados de acordo com os métodos descritos no Standard Methods (APHA 2017), utilizando um equipamento desenvolvido para tal, como pode-se observar na Figura 18. Para cada amostra foram realizados 10 ensaios. Os ensaios consistiram na aplicação de 6 mL de lodo em um pequeno reservatório localizado sobre um papel filtro. O papel extrai

o líquido do lodo pela capilaridade e o tempo necessário para que este percorra a distância entre os eletrodos é medido automaticamente por um cronômetro. O resultado do tempo decorrido foi apresentado no painel do equipamento, e é um indicativo da taxa de drenagem natural dos lodos, sendo utilizado para avaliar a performance dos processos de desaguamento. O papel filtro utilizado foi o papel Whatman nº 17.

Figura 18 – Aparelho utilizado para os testes de Tempo de Sucção Capilar.



Fonte: Autoria própria.

Visando a comparação entre o parâmetro TSC e o parâmetro REF, os resultados de TSC foram normalizados pela concentração de sólidos totais na amostra, visto que este valor se aproxima da concentração de sólidos suspensos totais em lodos, como por sugerido por Tominaga (2011), Yu e outros (2008) e Peng e outros (2011).

O ensaio de REF foi conduzido por um aparato experimental composto por um funil cerâmico contendo um papel filtro e uma bomba a vácuo acoplada a uma proveta graduada para a aferição do volume filtrado. Após a montagem do aparato (Figura 19), o papel filtro é umedecido para permitir sua total aderência à superfície do funil. Uma alíquota de 100 mL de amostra foi colocada sobre o papel filtro e, aplicando o vácuo a uma pressão constante de 500 mmHg, foram anotados os volumes filtrados e o tempo entre cada medição até que se encontrasse sobre o filtro uma torta relativamente seca. O papel filtro utilizado foi o Papel filtro quantitativo Whatman nº 40 e a viscosidade adotada para o filtrado foi a viscosidade da água.

Figura 19 – Aparato utilizado para a obtenção da Resistência Específica a Filtração.



Fonte: Autoria própria.

3.9.5. Caracterização reológica

Os ensaios para a caracterização dos parâmetros reológicos das amostras de lodo foram conduzidos no equipamento Anton Paar Physica MCR 501, Figura 20, em parceria com o Laboratório de Fenômenos de Transporte da Faculdade do Centro Leste (UCL). Foi utilizada a geometria rotativa de Cilindros Concêntricos “Mono Gap CC27”, ou seja, de uma única folga, no intuito de obter maior precisão em viscosidades menores durante a aplicação de taxas de cisalhamento baixas. Este equipamento permitiu a realização de ensaios programados com um volume de amostra razoável (19 mL), variando gradativamente a taxa de cisalhamento, tendo como resposta a tensão cisalhante medida do material. O pequeno volume de amostra utilizado tem o objetivo de garantir um afastamento mínimo entre o rotor e o cilindro externo, requerido no caso de suspensões onde possa ocorrer sedimentação das partículas. Os procedimentos adotados foram de acordo com a metodologia indicada pelo fabricante e por Mouzaoui e outros (2018). Antes de introduzir uma amostra no cilindro de testes do equipamento, foi realizada sua homogeneização. A retirada de corpos grosseiros como folhas é necessária para de garantir reprodutibilidade dos resultados, apesar desse procedimento limitar a semelhança com as condições reais de fluxo dos lodos de ETEs.

Figura 20 – Reômetro e geometria utilizados para a caracterização reológica dos lodos.



Fonte: Autoria própria.

O resultado das análises reológicas consistem em curvas, chamadas de reogramas, que apresentam as tensões cisalhantes (τ) em função da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$). A partir delas, são aplicadas regressões para enquadrá-las nos modelos que descrevem de maneira geral os comportamentos dos materiais. Os modelos mais utilizados na literatura para caracterizar líquidos com suspensões de partículas são (SLATTER, 1997; SOZANSKI *et al.*; 1997; BAUDEZ, 2001; GUIBAUD *et al.*, 2003):

- Herschel-Bulkley: $\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$
- Ostwald (Pseudoplástico): $\tau = k\dot{\gamma}^n$
- Bingham plastic: $\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}$

Onde todos estes se relacionam com a Equação 3.1, apresentada na revisão bibliográfica, sendo utilizadas nas caracterizações reológicas desta pesquisa.

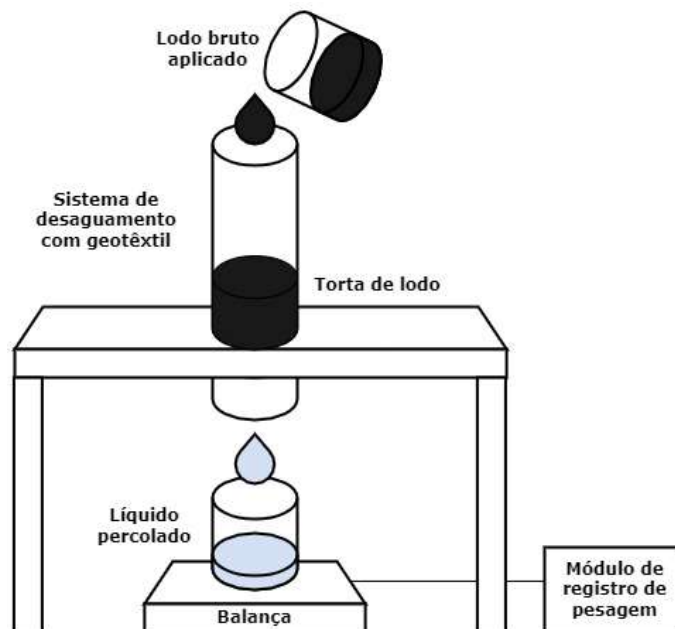
3.10. FASE 2 – DESAGUAMENTO NATURAL UTILIZANDO GEOTÊXTEIS

A segunda fase desta pesquisa consistiu em ensaios de desaguamento de lodos utilizando mantas geotêxteis como meio filtrante, tendo como objetivo permitir o desaguamento do lodo por método natural, sem a utilização de condicionantes ou consumo de potência. Os experimentos desta seção visaram obter o máximo de informações necessárias de forma a se aplicar a metodologia posteriormente em modelos de desaguamento em escala maior.

3.10.1. Concepção dos sistemas desaguamento

Os sistemas de desaguamento foram concebidos de maneira a se fixarem a bancadas que permitam a aplicação dos lodos manualmente pela parte superior, a coleta e pesagem do percolado em sua parte inferior, além da retirada do material retido no geotêxtil ao se desmontar o dispositivo. O esquema da Figura 21 ilustra de maneira geral os dispositivos propostos neste trabalho, bem como os produtos obtidos nos ensaios.

Figura 21 – Esquema geral dos dispositivos de desaguamento.



Fonte: Autoria própria.

As configurações dos dispositivos de desaguamentos utilizados foram desenvolvidas levando em conta os volumes aplicados por carga e a capacidade de medição das balanças empregadas na aferição do processo. Além disso foram considerados o

teor de ST dos lodos de manta e leite do reator UASB e parâmetros operacionais utilizados ao longo de ensaios teste realizados previamente.

As balanças utilizadas nos ensaios possuíam células de carga com capacidade de 5 kg e controles do modelo HX711, com taxas de dados de saída selecionáveis de 10SPS ou 80SPS. Estas operam na faixa de tensão entre 2,6 e 5,5 Volts e em temperaturas entre 20 e 35°C. Já os módulos de controle utilizados dispuseram de microcontrolador ATmega328P com memória Flash com 32 Kbytes reprogramável, com todas as instruções AVR em 16 ou 32 bits, firmware desenvolvido em Atmel Studio, em linguagem C / Assembly. Os dados foram acompanhados em tempo real pelo display dos controladores e foram registrados em cartões SD por meio de data loggers.

Nos ensaios foram utilizadas como meio filtrante as mantas geotêxteis dos tipos RT-21, RT-26 e RT-31, todas da marca BIDIM, compostos de filamentos não contínuos e classificados como não-tecido, sendo fabricados em poliéster sob rigorosos padrões de qualidade e cujas especificações técnicas estão descritas na Tabela 8. As mantas foram selecionadas com base nos resultados obtidos por Oliveira e Oliveira (2017) e Achon e outros (2019).

Tabela 8 – Propriedades e características das mantas geotêxteis utilizadas.

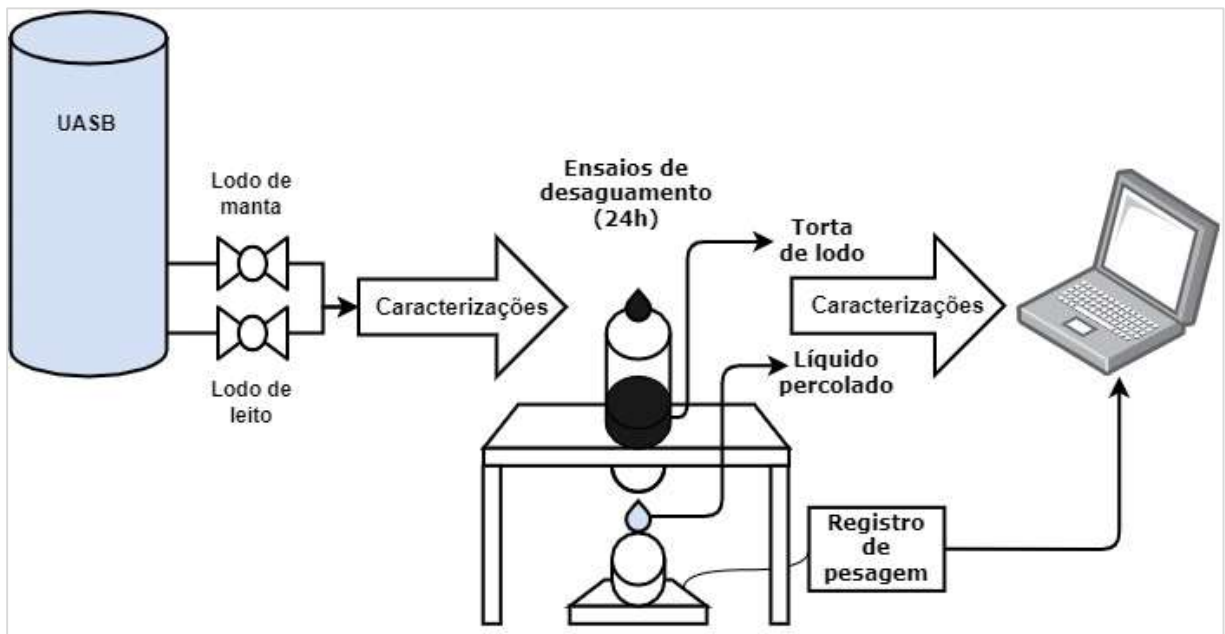
Propriedades/Tipo de Manta	RT-21	RT-26	RT-31
Permissividade (s^{-1})	1,1	0,8	0,8
Fluxo de água ($l/min/m^2$)	3420	2670	2340
Permeabilidade normal (cm/s)	0,37	0,37	0,37
Abertura aparente (mm) (peneira)	0,150 (100)	0,150 (100)	0,125 (120)
Comprimento (m)	150	150	100
Largura (m)	2,30		
Matéria-prima e tecnologia	100% Poliéster		
Ponto de fusão (°C)	260		

Fonte: Adaptado de BIDIM (2008).

Os ensaios de desaguamento seguiram a metodologia descrita por Wanke (2005) Koerner e Koerner (2006) e Weggel e outros (2011). Segundo os autores, este tipo de ensaio é um modo efetivo de se medir as vazões de drenagem nos

desaguamentos, além de possibilitar a verificação do percentual de sólidos no lodo retido no geotêxtil em estudo e a qualidade e quantidade de filtrado obtido, possibilitando a escolha do melhor tipo de utilização do geotêxtil em suas diversas configurações possíveis. A Figura 22 apresenta o esquema do conjunto de etapas envolvidas dos ensaios desenvolvidos, que vai desde a coleta do lodo no reator UASB até a obtenção dos dados necessários para as análises e comparações.

Figura 22 - Esquema dos processos que envolvem os ensaios de desaguamento.



Fonte: Autoria própria.

Durante a filtração em geotêxtil, foram registrados os dados de peso do líquido filtrado em função do tempo por meio de sua coleta em provetas sobre um sistema de pesagem digital. As balanças utilizadas foram conectadas a módulos eletrônicos de pesagens programadas e arquivamento de dados, registrando o desaguamento da seguinte maneira: A cada 1 minuto durante os 10 primeiros minutos, a cada 10 minutos dos 10 aos 60 minutos e depois a cada 30 minutos por 24 horas (1440 min). No encerramento de cada ensaio, a torta de lodo retida na manta geotêxtil e o líquido drenado acumulado são coletados e analisados quanto à série de sólidos conforme o método do Standard Methods (APHA, 2017).

As cargas de lodo aplicadas nos ensaios realizados foram baseadas nas caracterizações físico-químicas prévias das amostras coletadas, permitindo assim o

seu cálculo por meio da Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS), que segue na Equação 4.1.

$$V = \frac{TAS \times Af}{ST} \quad \text{Equação 4.1}$$

Em que:

V : Volume de lodo aplicado ao sistema (L);

TAS : Taxa de Aplicação de Sólidos (kg ST/m²);

A_f : Área filtrante do DEV (m²);

ST : Concentração de Sólidos Totais do lodo (kg ST/L).

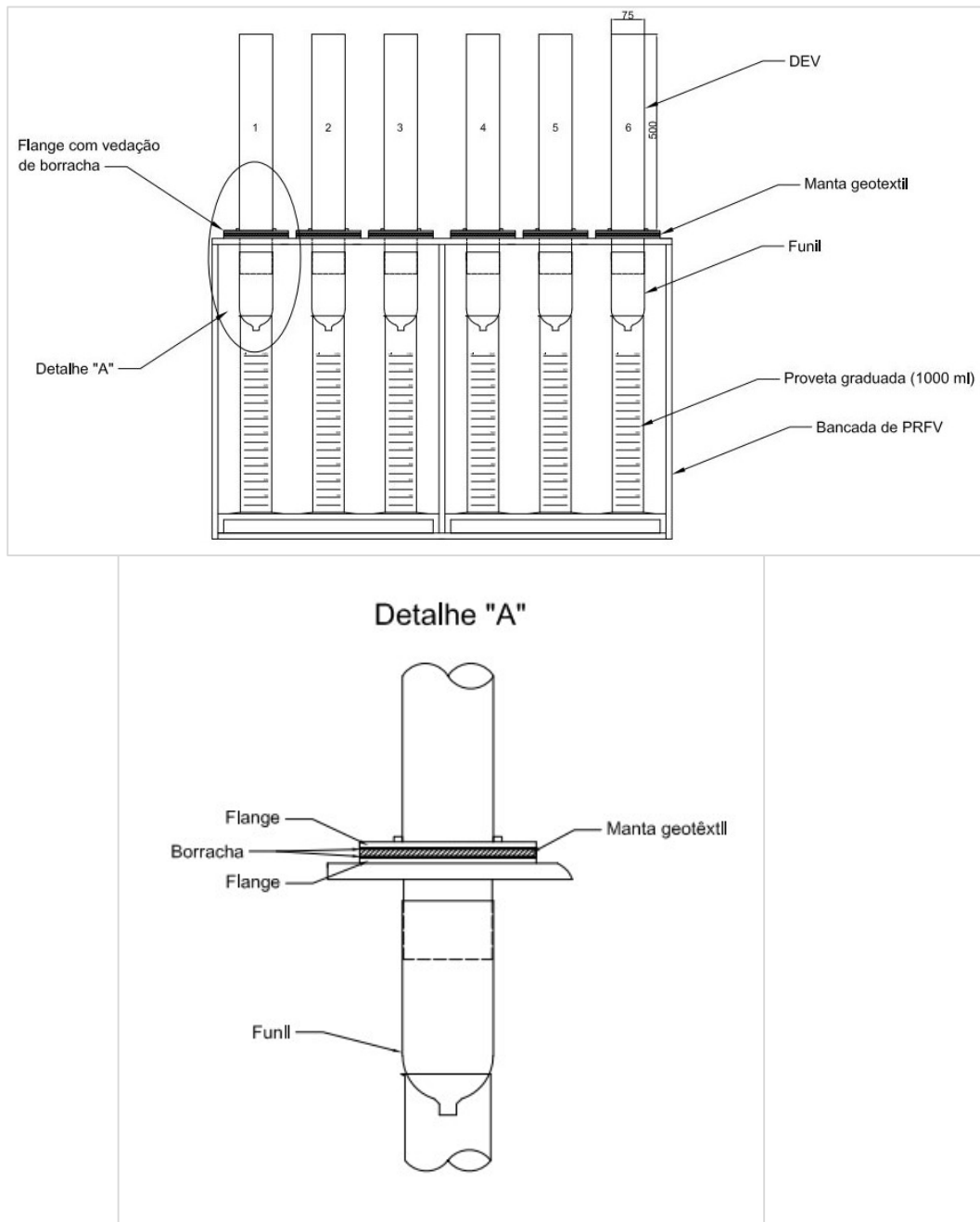
3.10.1.1. Desenvolvimento dos ensaios

Nesta seção são apresentadas configurações dos dispositivos de desaguamento utilizados e os delineamentos experimentais das etapas desta fase.

3.10.1.2. Etapa 1 - DEV (GEO X TAS)

A primeira etapa de ensaios de desaguamento foi realizada com base na utilização do Desaguador Estático Vertical (DEV), que consiste em um aparato experimental simples que utiliza da coluna hidráulica do material aplicado para a filtração deste. Cada unidade do DEV consiste em um tubo de PVC de 75 mm de diâmetro, com altura de 500 mm acima do flange de retenção com o geotêxtil filtrante, como pode ser observado na Figura 23. Na parte inferior do tubo são acoplados conexões e tubos de PVC cuja função é direcionar o líquido percolado para provetas graduadas de 1000 mL.

Figura 23 – Vistas laterais do DEV identificando a configuração de montagem.



Fonte: Autoria própria.

Nessa etapa foi utilizado o planejamento fatorial 3^2 para avaliar a influência dos fatores que podem exercer impacto no processo de desaguamento do lodo por tecido geotêxtil utilizando o DEV. Neste tipo de planejamento, tem-se 2 fatores avaliados em 3 níveis denotados por baixo (-1), médio (0) e alto (+1).

Buscou-se avaliar o impacto dos fatores: Tipo de Manta Geotêxtil (kN/m) e Taxa de Aplicação de Sólidos (kg ST/m^2), nas variáveis de resposta: Teor de Sólidos Totais da torta (% ST) e o percentual de líquido drenado (%) no período de 24h. Para os

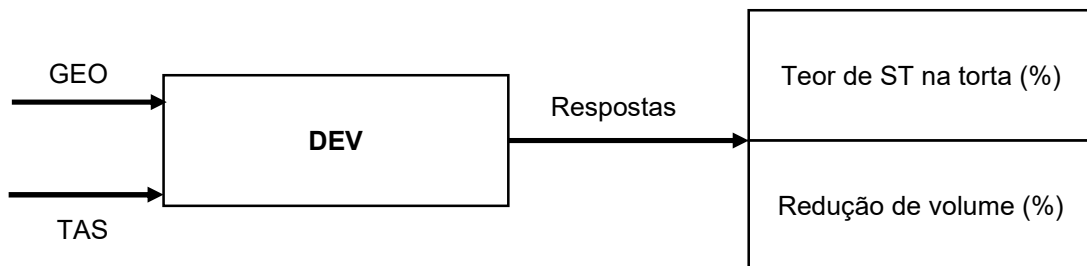
fatores Tipo de Manta (GEO) e Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) os níveis: máximo (+1), médio (0) e mínimo (-1) foram determinados conforme os melhores resultados obtidos por Oliveira e Oliveira (2017), Silveira (2014), Santos (2012) e Wanke (2005). Os fatores e seus respectivos níveis são apresentados na Tabela 9 e a Figura 24 representa o planejamento experimental adotado.

Tabela 9 - Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental 3².

Fatores adotados	Sigla	Níveis		
		-1	0	+1
Tipo de Manta	GEO	RT-21	RT-26	RT-31
Taxa de Aplicação de Sólidos	TAS	1,75 kg ST/m ²	3,5 kg ST/m ²	7,0 kg ST/m ²

Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Fluxograma representando as variáveis de entrada e as variáveis resposta.



Fonte: Autoria própria.

O planejamento adotado derivou-se da matriz de experimentos apresentada na Tabela 10, onde cada ciclo de experimentos é composto por uma combinação dos níveis aplicados aos fatores, totalizando 9 ensaios, todos realizados em duplicata e apenas com lodo proveniente da região de manta do reator UASB. Para alcançar uma boa representatividade dos dados foram realizados 7 ciclos, totalizando 63 ensaios.

Tabela 10 – Matriz de experimentos que representa um ciclo de ensaios.

Ensaio	GEO	TAS
6	0	1
2	-1	0
8	1	0
1	-1	-1
9	1	1
3	-1	1
4	0	-1
5	0	0
7	1	-1

Fonte: Autoria própria.

Estes ensaios tiveram por objetivo avaliar a dinâmica do desaguamento natural de lodos de UASB por meio da drenagem da água livre sem a utilização de agentes condicionantes, tornando o processo mais simples e menos custoso. Na Figura 25 pode-se observar como a bancada de experimentos foi montada para esta fase, permitindo seis ensaios simultâneos.

Figura 25 – Bancada de experimentos com seis unidades do DEV.



Fonte: Autoria própria.

3.10.1.3. Etapa 2 - DEV x BDV

A segunda etapa de desaguamentos teve como objetivo comparar as performances de desaguamento do DEV com as Bolsas Drenantes Verticais (BDV) durante o período 24 horas. As BDVs foram desenvolvidas a partir dos trabalhos de Weggel e outros (2011) e Koerner e Koerner (2006), que utilizaram bolsas suspensas feitas em material geotêxtil para avaliação da dosagem de condicionantes nos desaguamentos com lamas diversas. As Bolsas Drenantes Verticais foram fabricadas de maneira a terem as mesmas dimensões do DEV, entretanto com toda a superfície do dispositivo feita em material geotêxtil.

As BDVs possuem formato cilíndrico com um de seu tampo inferior fechado com geotêxtil e o superior aberto para a aplicação do material. As BDVs utilizadas foram feitas com 500mm de altura e 75mm de diâmetro e podem ser vistas na Figura 26 bem como a forma que estas se acoplam na bancada, na Figura 27.

Nesta segunda etapa o DEV utilizado foi fabricado com tubos de acrílico, flanges em PVC e juntas para vedação de borracha. O intuito do uso do acrílico foi a possibilidade de observar a formação da torta de lodo durante o processo de drenagem, e conseqüente desaguamento.

Figura 26 – BDVs fabricadas para os ensaios.

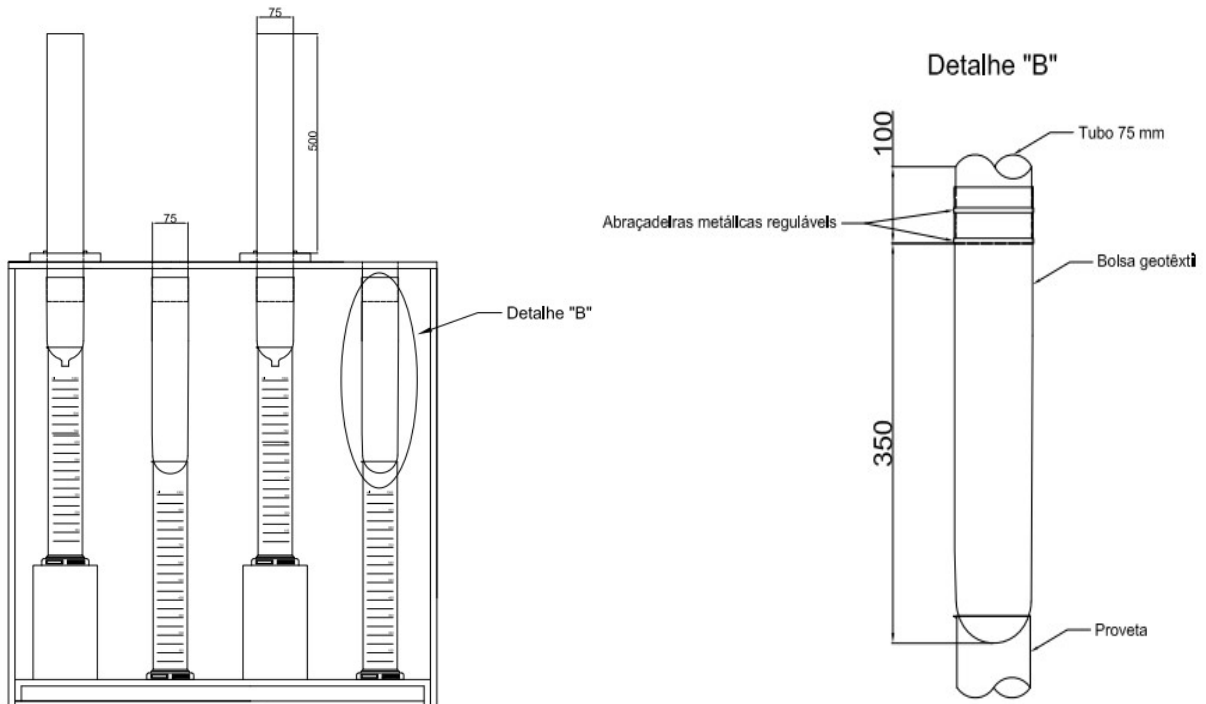


Fonte: Autoria própria.

Foram utilizados os geotêxteis BIDIM RT-26 nos dispositivos utilizados, sendo estes costurados em uma máquina industrial de costura reta Singer, movida por um motor elétrico da fabricante WEG de ½ cavalo de potência. As linhas utilizadas consistiam em material de origem 100% poliéster e com gramatura de 120 g/m². Os pontos de costura realizados foram do modelo reto por três vezes, para evitar a passagem de

sólidos. O acoplamento das BDVs na bancada se deu por meio de duas abraçadeiras reguláveis, que permitiram a fixação na altura desejada nos suportes presentes na parte inferior a bancada.

Figura 27 – Descrição do acoplamento da BDV na bancada de ensaios.



Fonte: Autoria própria.

Devido a maior quantidade de material geotêxtil empregado nas BDVs, sua área filtrante resultou em mais de vinte vezes maior que as empregadas nos DEVs, fazendo com que as TAS aplicadas não pudessem ser equivalentes nos dois sistemas. Dessa forma, foi utilizado o mesmo volume de lodo aplicado nos dois dispositivos, 1000mL.

Para que a comparação entre as duas configurações fosse feita de maneira sistemática, foram utilizados os índices de eficiência baseados nos estudos com dispositivos de desaguamento de Tominaga (2011) e Guimarães, Urashima & Vidal (2014). Foram utilizados também dois tipos de lodo, se distinguindo pelas regiões que foram retirados do reator, o lodo de manta e o lodo de leite.

Visando atingir os objetivos propostos, buscou-se no delineamento experimental utilizar também o planejamento fatorial, no intuito de verificar o impacto dos fatores: Tipo de sistema de desaguamento e o tipo de lodo utilizado. Já nas variáveis de resposta: Remoção de volume na carga (%), Eficiência de Desaguamento (%),

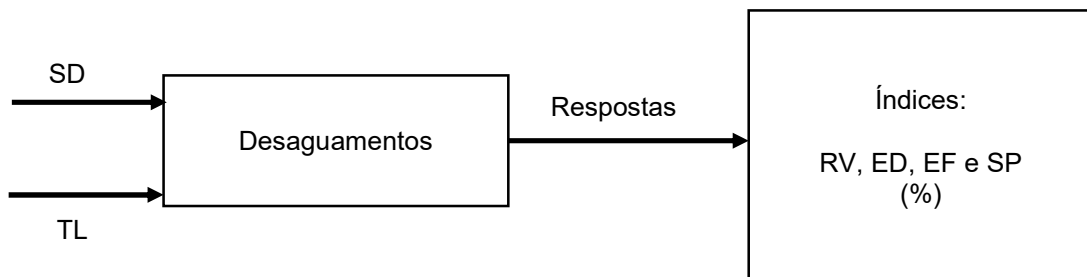
Eficiência de Filtração (%) e Sólidos Passantes (%). Os fatores e seus respectivos níveis são apresentados na Tabela 11, já a Figura 28 representa o planejamento experimental adotado.

Tabela 11 - Níveis dos fatores empregados no Planejamento Experimental 2².

Fatores adotados	Sigla	Níveis	
		-1	+1
Sistema de Desaguamento	SD	DEV	BDV
Tipo de lodo	TL	Manta	Leito

Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Fluxograma representando as variáveis de entrada e as variáveis resposta.



Fonte: Autoria própria.

Nesta fase foram realizados cinco ciclos de desaguamento, cada ciclo foi composto por ensaios simultâneos nos dois sistemas de desaguamento, o DEV e a BDV utilizando tanto os lodos de manta quanto os lodos de leito, como pode-se observar na Figura 29. Desta forma, foram realizados 20 ensaios ao longo desta campanha.

Figura 29 – Bancada de desaguamentos do DEV e BDV com dois tipos de lodo.

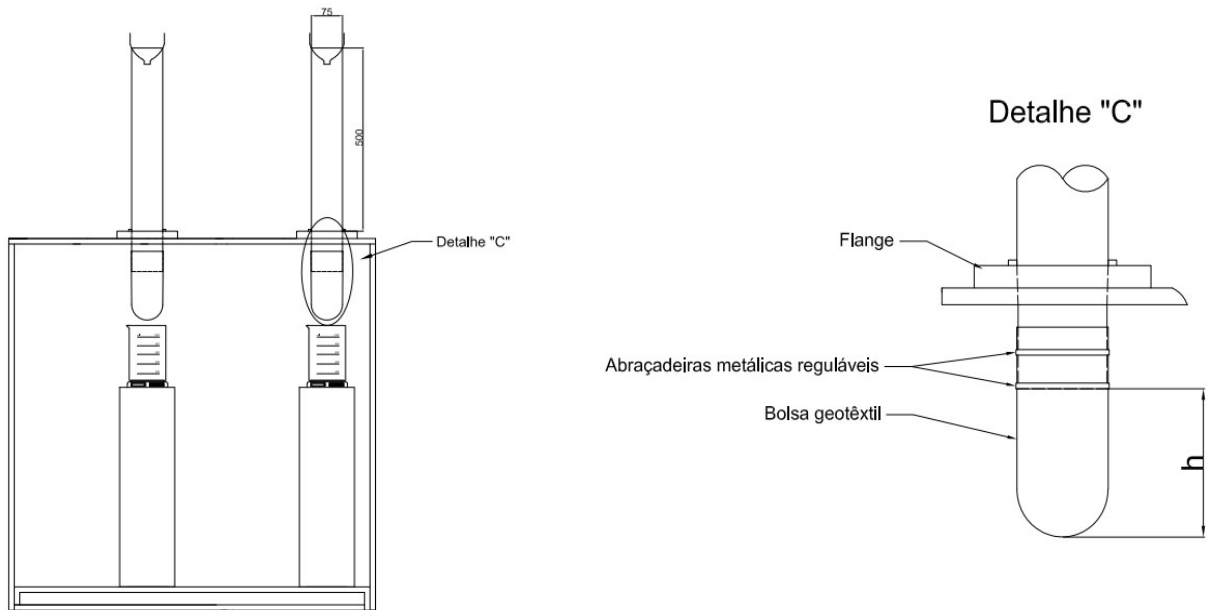


Fonte: Autoria própria.

3.10.1.4. Etapa 3 - DEV+BDV

Na última etapa da pesquisa, buscou-se aproveitar dos pontos positivos dos dois sistemas de desaguamento utilizados anteriormente, com a possibilidade de aplicar maiores TAS no dispositivo contendo a bolsa drenante. A nova configuração consiste na integração entre o DEV e a BDV, que utiliza das qualidades individuais de cada uma das configurações anteriores para formar o a Bolsa Desaguadora Estática Vertical (BDEV). Ao tempo que a BDV possui uma área filtrante maior que o DEV, permitindo o aumento da vazão de drenagem do material, o DEV possibilita a aplicação de uma TAS mais elevada, aumentando o volume de material a ser aplicado por carga, ou seja, aumentando sua capacidade de desaguamento. A estrutura do DEV é acoplada sobre a bancada e o a BDV em sua parte inferior, assim como pode ser nos desenhos da Figura 30 e nas fotos do experimento na Figura 31.

Figura 30 – Vistas laterais do acoplamento do BDEV.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Bancada de ensaios da Etapa 3.



Fonte: Autoria própria

Nessa etapa objetivou-se avaliar a influência do comprimento da bolsa constituinte do BDEV mantendo-se as TAS, desta forma, variou-se a área filtrante do dispositivo,

porém mantendo-se a massa de sólidos aplicados por unidade de área. Os fatores analisados foram: O comprimento da bolsa (CDB) e a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS), como consta na Tabela 12. Foram utilizadas as TAS que apresentaram melhores resultados, levando em conta a formação da torta de lodo, mostrando concordância com os resultados obtidos por Silveira (2015) e Wanke (2005) no desaguamento de lodos de ETA e UASB, respectivamente. Já os comprimentos foram escolhidos devido com base na altura útil do DEV e da capacidade da balança do sistema de pesagem.

Os índices de eficiência utilizados na fase anterior, para a comparação dos sistemas de desaguamento, também foram utilizados nesta etapa, permitindo uma comparação geral dentre todas as configurações utilizadas na pesquisa.

Tabela 12 – Níveis dos fatores do planejamento 3x2.

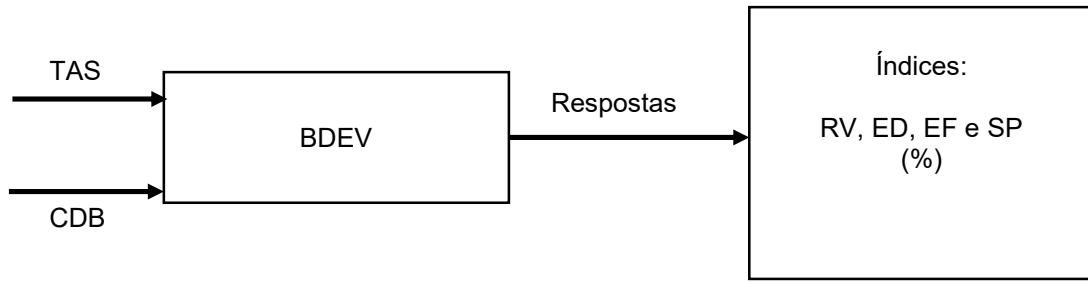
Fatores adotados	Sigla	Níveis		
		-1	0	+1
Comprimento da Bolsa Drenante	CBD	5,0 cm	7,5 cm	10 cm
Taxa de Aplicação de Sólidos	TAS	3,5 kg ST/m ²		7,0 kg ST/m ²

Fonte: Autoria própria.

Nesta fase foram realizados três ciclos de desaguamento, onde cada ciclo foi composto por 6 desaguamentos, totalizando 18 ensaios, sendo executados conforme fluxograma demonstrado na Figura 32.

Foram utilizados apenas os lodos da região de leito, devido a sua maior concentração de sólidos e conseqüente possibilidade de aplicação de uma maior TAS ao manter-se a área de filtragem.

Figura 32 - Fluxograma representando as variáveis de entrada e as variáveis resposta.



Fonte: Autoria própria.

Para efeitos de comparação, o DEV foi considerado o equivalente ao BDEV com comprimento de 0 cm da bolsa, permitindo a análise de mais um cenário com a variável CDB, e conseqüentemente a influência deste nos desaguamentos.

4.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

O tratamento dos dados consistiu na aplicação de análise estatística descritiva e de inferência para avaliar os resultados obtidos no presente estudo. Como o número de observações não foi grande o suficiente para verificar e assumir a normalidade dos dados ($n < 30$), optou-se por apresentar os resultados em termo de suas medianas e intervalos interquartis. Além disso, testes não paramétricos foram aplicados para avaliar os dados. Os testes de Wilcoxon e Kruskal Wallis combinado com o teste de Dunn foram usados para investigar diferenças na concentração mediana dos parâmetros avaliados, considerando as diferentes mantas geotêxteis, TAS, tipos de lodo e configurações de desaguadores estudados.

A principal disparidade entre os testes aplicados foi o número de grupos a serem comparados por análise: Wilcoxon foi utilizado para a avaliação entre dois deles, já Kruskal-Wallis para mais de dois, contudo sem indicar onde estão as diferenças significativas, por isso a combinação com o teste de Dunn, capaz de comparar entre pares todos os grupos e apontar as desigualdades.

Nos testes, foram utilizados níveis de significância de 0,05. Isso significa que para os modelos de Wilcoxon e Kruskal-Wallis o valor de $p \leq 0,05$ representa a existência de uma diferença significativa. Já para o teste de Dunn é necessário um ajuste de p.

Para calcular, basta dividir o valor de p pelo número de comparações a serem feitas, que por sua vez, depende do número de grupos comparados.

Todas as análises estatísticas foram desenvolvidas usando R' versão 4.0.0 (R Core Team, 2020) e RStudio versão 1.3.1056 (RStudio Team, 2020). As tabelas, diagramas de caixa e os gráficos de linhas foram criados utilizando o software Microsoft Excel versão 2019.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

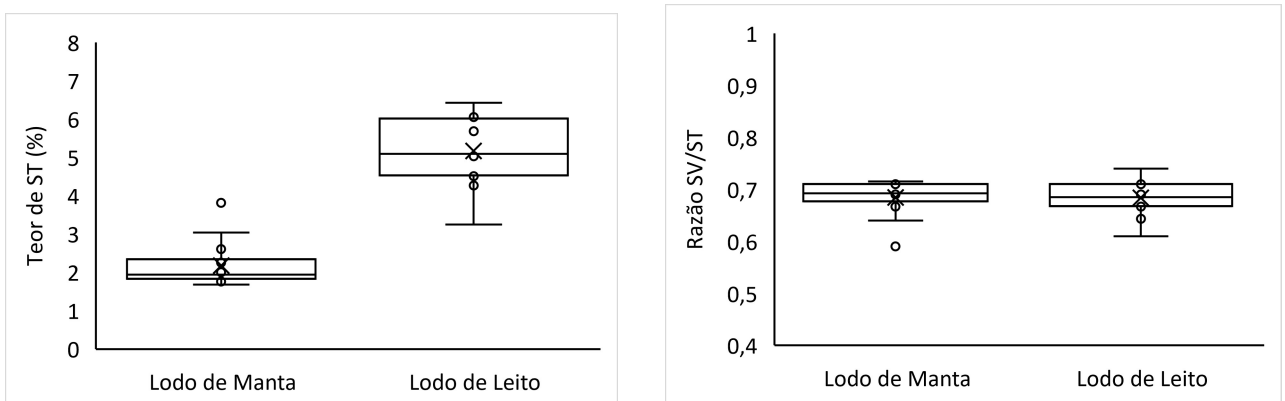
4.1. CARACTERIZAÇÕES DOS LODOS

Nesta seção são apresentados os resultados da primeira fase desta pesquisa, relacionada diretamente com as diversas caracterizações feitas nos lodos estudados.

4.1.1. Caracterizações físico-químicas

Durante todas as fases desta pesquisa foram caracterizadas 26 amostras de lodo, sendo 14 delas de lodo da região de manta e 12 da região do leito, ambos do mesmo reator UASB. Todos os lodos caracterizados foram utilizados nos processos de desaguamento, conforme metodologia apresentada na seção anterior. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 33 por meio dos diagramas de caixa, que demonstram uma diferença, já esperada, na presença dos sólidos totais entre as amostras retiradas da região de leito e manta, devido as suas posições no reator, entretanto uma homogeneidade na fração orgânica destes. Quando comparados individualmente entre o 1º e 3º quartis, são observadas faixas estreitas de resultados em todos os diagramas, com as maiores diferenças representando o teor de ST do lodo de leito (4,52 – 6,01 %), tendo em vista o lodo de manta (1,83 – 2,34 %). Já a estabilidade da razão SV/ST é clara visto que os pontos centrais dos dois tipos de lodo foram iguais (mediana = 0,69).

Figura 33 – Diagramas de caixa com os resultados das caracterizações físico-químicas do lodo (n=26).



Fonte: Autoria própria.

Os valores obtidos nesta pesquisa para os parâmetros Teor de ST e Razão SV/ST se encontram de acordo com os valores reportados na literatura técnica (Tabela 3), com uma ligeira diferença para o grau de estabilidade dos lodos de manta, como apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparação entre resultados obtidos com as referências

Autores:	Lodo de manta		Lodo de leito	
	Teor de Sólidos (%)	Estabilidade (SV/ST)	Teor de Sólidos (%)	Estabilidade (SV/ST)
Esta pesquisa	1,83 – 2,34	0,67 – 0,71	4,52 – 6,01	0,66 – 0,71
Referências*	0,95 – 3,0	0,56 – 0,67	3,9 – 10,0	0,65 – 0,72

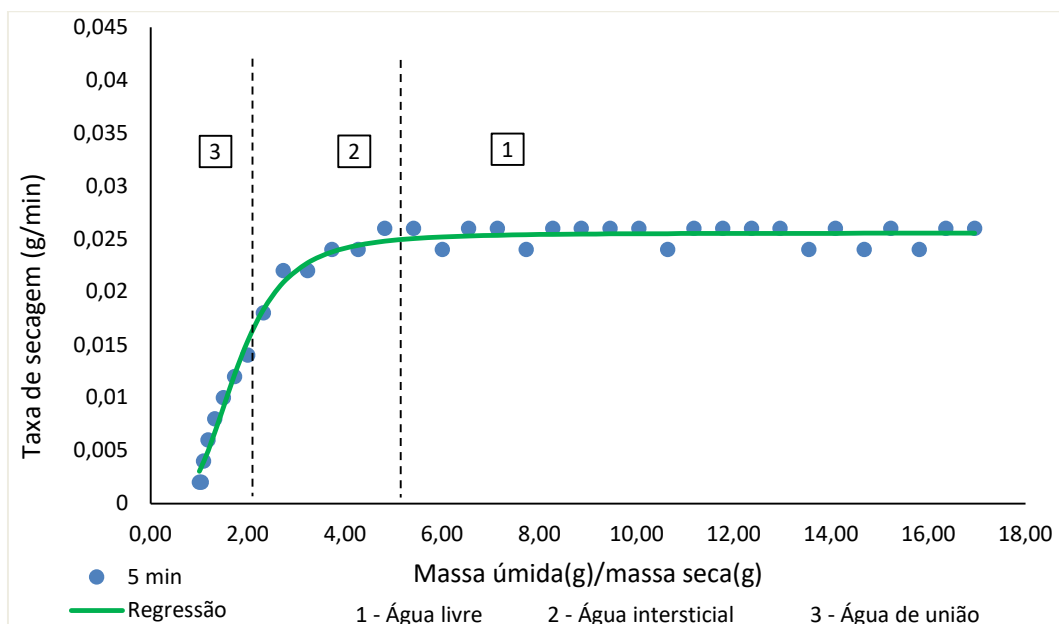
*: Van Haandel & Lettinga (1994), Chernicharo (2007), Veronez (2001), Wanke (2005).

Fonte: Autoria própria.

4.1.2. Determinação das frações de água nos lodos

Os ensaios termogravimétricos foram feitos com cinco amostras de cada um dos tipos dos lodos analisados (n=5). As curvas termogravimétricas obtidas assemelharam-se à curva modelo apresentada no item 3.5.1. (Figura 4). A diferenciação das taxas de secagem foi identificada através da curva, tal qual apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Exemplo de curva termogravimétrica obtida para lodo de leito.



Fonte: Autoria própria.

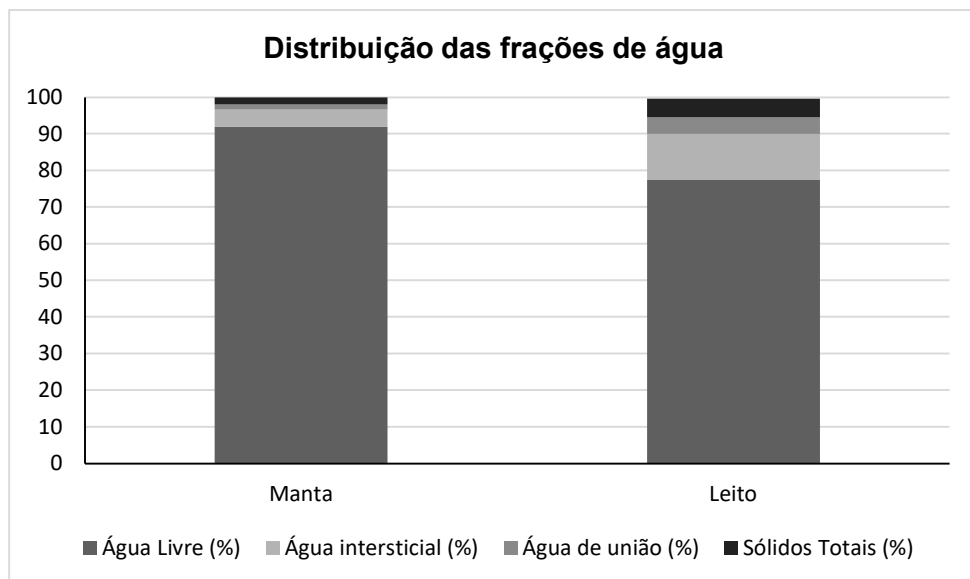
Pelo número de amostras obtidas, os dados foram tratados de maneira não-paramétrica, utilizando os valores de mediana para as avaliações. A Figura 35 e a Tabela 14 apresentam a distribuição das frações de água e sólidos das amostras coletadas nos lodos da região de manta e leito do reator UASB.

Tabela 14 – Resultados das análises termogravimétricas.

N = 5	Tipo de lodo	
	Manta	Leito
Água Livre (%)	91,92	77,39
Água intersticial (%)	4,69	12,54
Água de união (%)	1,41	4,57
Sólidos Totais (%)	1,89	5,09

Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Gráfico de colunas empilhadas apresentando a distribuição das frações de água e sólidos nos lodos.



Os valores apresentados para cada fração são semelhantes aos valores encontrados em literatura para lodos anaeróbios, que apontam faixas entre 83% e 94% para a água livre e 5% a 18% para a água intersticial somada à água de união (SPAVIER, 2003; KOPP e DICHTL, 2001; LOUZADA 2018).

Os resultados corroboram também com a literatura no que diz respeito a influência da concentração de sólidos na distribuição das frações de água, demonstrando que quanto maior o conteúdo deste, menor é o percentual de água livre e mais significativas são as frações de água intersticial e de união. Essa comparação pode ser feita uma vez que estes lodos são provenientes do mesmo reator e foram coletados no mesmo momento, entretanto em alturas diferentes, de forma que as características dos sólidos sejam semelhantes, diferindo apenas por sua concentração.

4.1.3. Testes de aptidão ao desaguamento

Os resultados desta seção são apresentados por meio da Tabela 15 e também pelos diagramas de caixas da Figura 36, demonstrando uma variação considerável entre os valores obtidos para os grupos estudados. Entretanto pode ser percebida também uma certa estabilidade entre as medianas quando comparadas entre si.

Tabela 15 – Resultados dos testes de aptidão ao desaguamento.

	TSC (s)	TSC normalizado (s.L/g)	REF (m/kg)
Lodo de manta	18,03 – 69,21	0,92 – 3,18	$10^{12} - 10^{13}$
Lodo de leito	61,62 – 143,09	1,17 – 2,99	$10^{12} - 10^{13}$
Referências	120 - 230	6,3 - 139	10^{12}

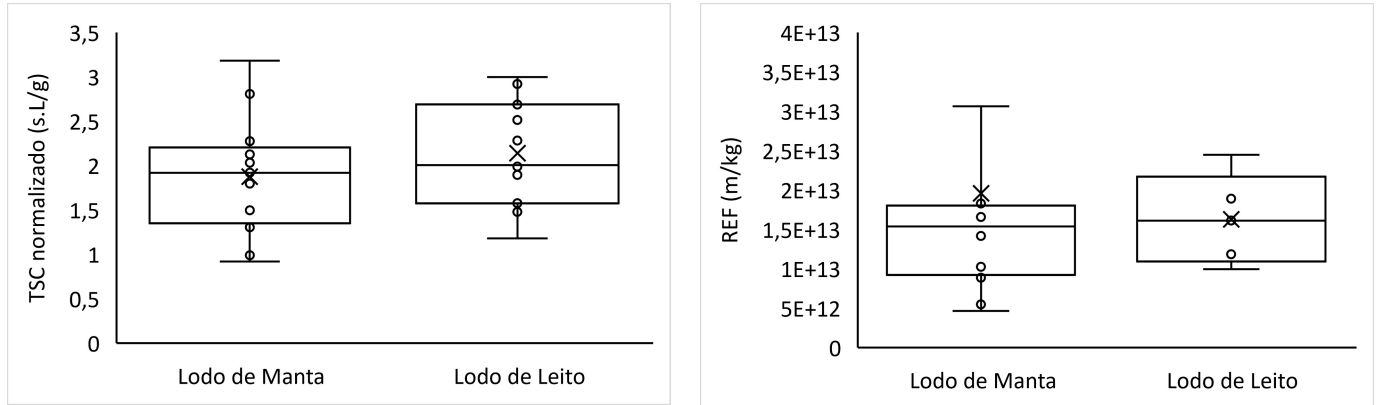
Fonte: Autoria própria.

O parâmetro Tempo de Sucção Capilar (TSC) foi normalizado para ser apresentado, assim como descrito na seção 3.9.4, e juntamente com o parâmetro REF, mostram que os índices de aptidão ao desaguamento para os lodos de diferentes alturas no reator UASB não apresentam diferenças significativas, o que nos permite inferir sobre uma homogeneidade quanto ao comportamento dos lodos neste processo.

Os resultados se mostraram típicos de lodos de alta capacidade de desaguamento (TO *et al.*, 2016). A literatura especializada apresenta valores entre 120 e 230s para TSC de lodos digeridos anaerobicamente e 6,3 a 139 s.L/g para TSC normalizado do mesmo material (WACŁAWEK *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2014; WU; DAI; CHAI,

2020), indicando que os valores obtidos estão compatíveis com os resultados de outros autores.

Figura 36 – Resultados obtidos nos testes de aptidão ao desaguamento (n=12).

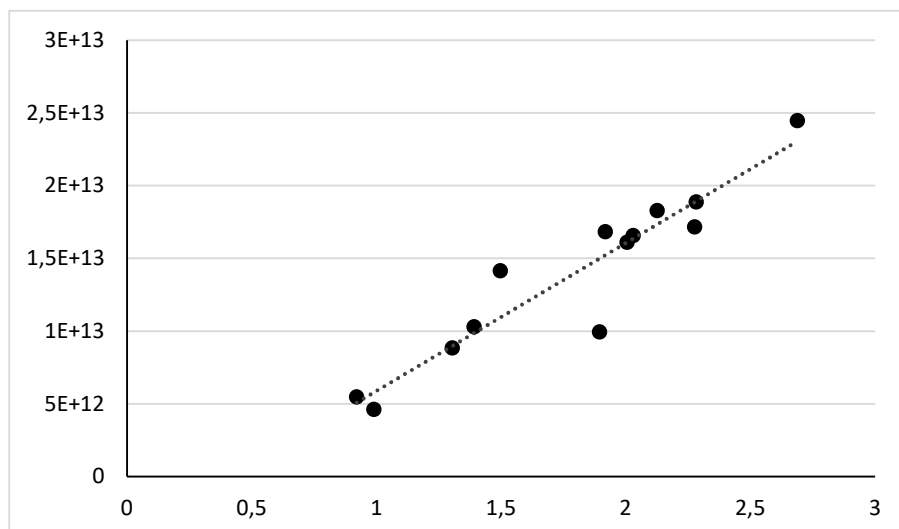


Fonte: Autoria própria.

Os valores de REF se situaram com ordem de grandeza entre 10^{12} e 10^{13} (m/kg), estando de acordo com resultados obtidos em pesquisas anteriores, que estudaram lodos gerados no mesmo reator (LOUZADA, 2018; NÓBREGA, 2020).

Foi realizada a correlação entre a Resistência Específica a Filtração (REF) e o Tempo de Sucção Capilar normalizado, o valor de 0,94 foi obtido, com n=13 e utilizando os dois tipos de lodo, como pode-se observar na Figura 37.

Figura 37 – Correlação entre REF e TSC normalizado (n=13).

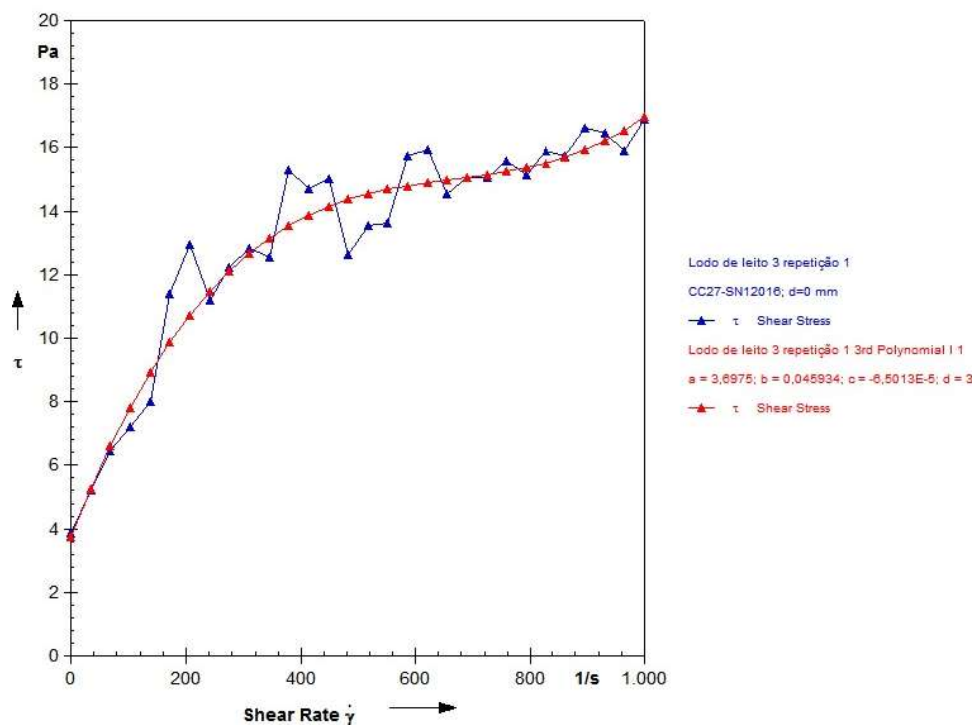


Fonte: Autoria própria.

4.1.4. Caracterização reológica

As caracterizações reológicas foram feitas em duplicata com três amostras de lodo de manta e três amostras de lodo de leito. Entretanto, para os lodos de leito, que possuem elevada concentração de sólidos, alguns resultados não foram satisfatórios. A presença dos flocos de lodo em altas concentrações fez com que houvessem diversos picos no reograma, não permitindo a aplicação de modelos reológicos, como pode ser observado na Figura 38.

Figura 38 – Curva obtida e modelo aplicado em análise do lodo de leito com 6,15% de ST.

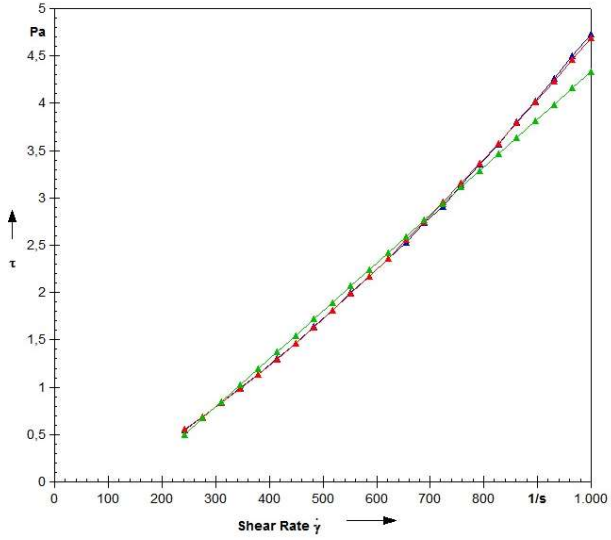


Fonte: Autoria própria.

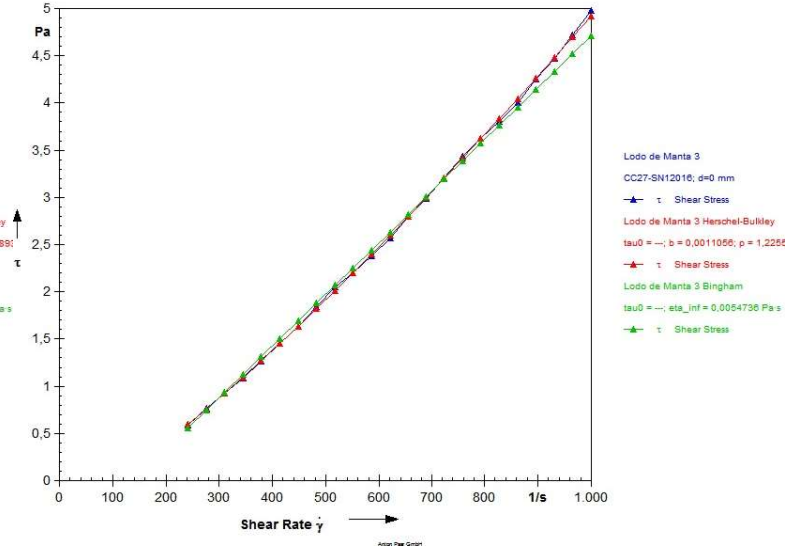
Dentre os lodos analisados, quatro deles tiveram os modelos aplicados com boa aproximação, sendo três deles da região de manta e o último da região de leito do reator UASB. As Figuras 39 (a,b,c e d) mostram graficamente a aplicação da regressão linear, segundo o modelo de Bingham e a regressão de potência, segundo os modelos de Ostwald e Herschel-Bulkley, para os reogramas obtidos a partir de quatro amostras de lodo em ensaios controlados pelo programa Reoplus, realizados no Laboratório de Fenômenos de Transporte da UCL.

Figura 39 – Reogramas obtidos na caracterização dos lodos: a) Lodo de manta 2,05% ST; b) Lodo de manta 1,79% ST; c) Lodo de manta 1,93% ST; d) Lodo de leite 4,59% ST

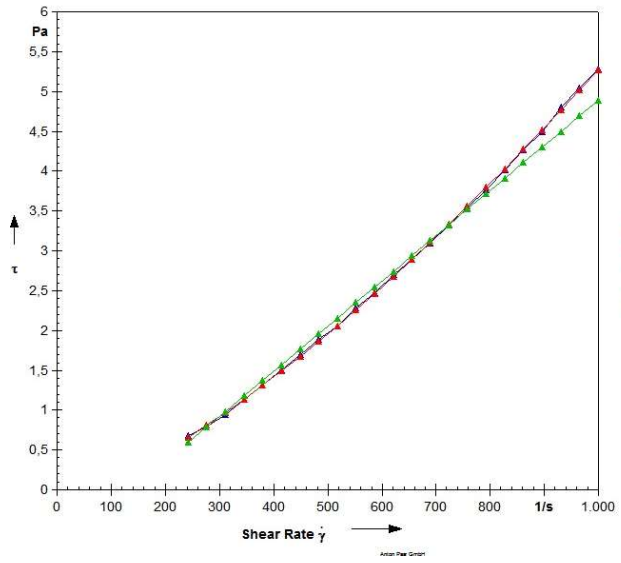
a)



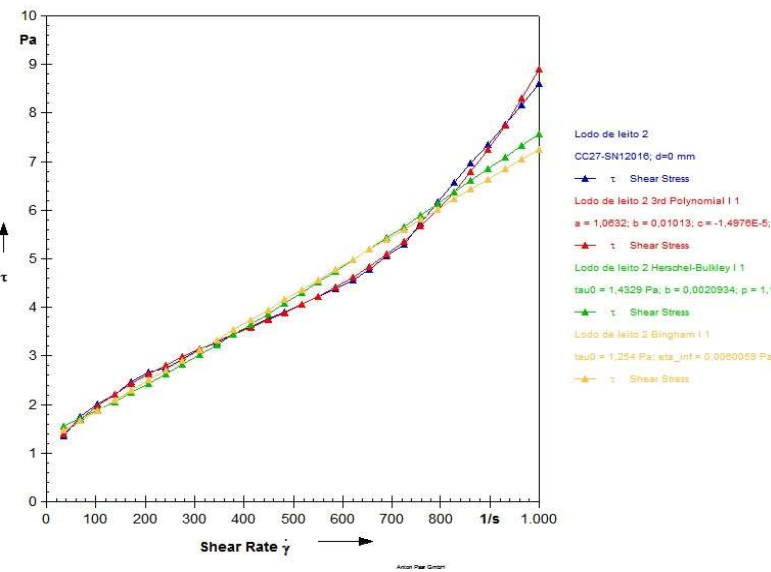
b)



c)



d)



Fonte: Autoria própria.

As regressões aplicadas aos resultados obtidos nos testes de caracterização reológica dos lodos de UASB (Tabela 16), sugerem que o modelo pseudoplástico com tensão limite de cisalhamento (Herschel-Bulkley) é o que melhor descreve o comportamento reológico desses lodos.

Tabela 16 – Resultados dos modelos reológicos aplicados.

Tipo de lodo	%ST	Modelos reológicos						
		Bingham (Plástico)			Herschel - Bulkley			
		τ_0 (Pa)	η_p (Pa.s)	R^2	τ_0 (Pa)	k (Pa.s)	n	R^2
Manta	2,05	-	$50,59 \cdot 10^{-4}$	0,98	-	$3,26 \cdot 10^{-4}$	1,38	0,99
Manta	1,79	-	$56,63 \cdot 10^{-4}$	0,98	-	$3,64 \cdot 10^{-4}$	1,38	0,99
Manta	1,93	-	$54,73 \cdot 10^{-4}$	0,99	-	$11,05 \cdot 10^{-4}$	1,22	0,99
Leito	4,59	1,25	$60,05 \cdot 10^{-4}$	0,94	1,43	$20,93 \cdot 10^{-4}$	1,15	0,96

Fonte: Autoria própria.

Este resultado é coerente com os resultados apresentados por Slatter (1997) e por Moeller e Torres (1997), que sugeriram que o modelo pseudoplástico com tensão limite de cisalhamento (Herschel-Bulkley) é o que melhor descreve o comportamento reológico de lodos provenientes de digestores anaeróbios (BRAGA 2003).

Outro ponto importante percebido, é a presença da tensão limite de cisalhamento apenas no lodo de leite, independente do modelo utilizado. Este parâmetro, além de ser relacionado a concentração de sólidos do material, apresenta o ponto de transição entre os comportamentos do fluido, abaixo desta tensão o lodo se comporta como um sólido viscoelástico, resistindo a deformação com a rigidez de sua estrutura interna, após esta tensão, a resistência é quebrada e o material flui, apresentando comportamento viscoso (SPINOSA; AYOL, 2019).

4.2. DESAGUAMENTOS EM GEOTÊXTEIS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na segunda fase desta pesquisa, que trata dos ensaios de desaguamento, relacionando-os com as

caracterizações realizadas na primeira fase e também com os resultados entre etapas.

4.2.1. Etapa 1 – TAS x GEO

Os resultados obtidos nos desaguamentos desta etapa são apresentados na Tabela 17, por meio da mediana de todos os 7 ciclos realizados. A redução de volume no processo de desaguamento se apresenta como o quesito de maior importância, uma vez que este representa a água removida do lodo (TOMINAGA, 2011), desta forma, este parâmetro foi escolhido para ser analisado mais minuciosamente na busca pelas diferenças entre elas.

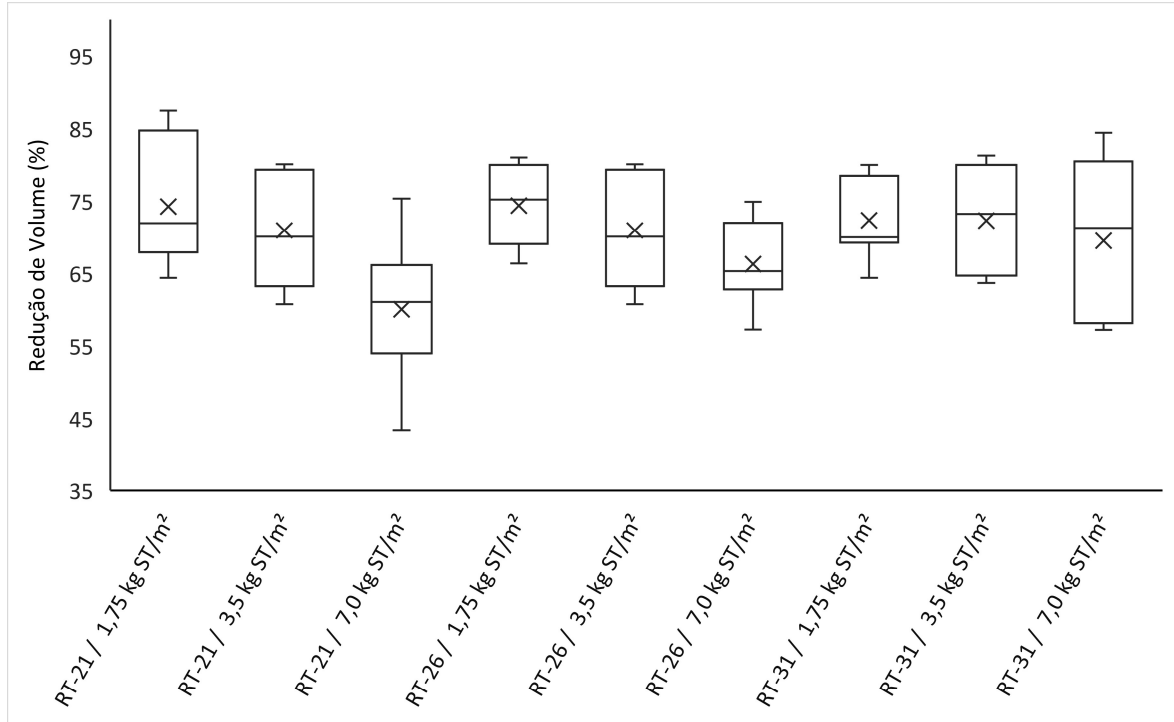
Tabela 17 – Resultados dos desaguamentos em escala de bancada.

Parâmetro	Manta	Taxa de Aplicação de Sólidos		
		1,75 kg ST/m ²	3,5 kg ST/m ²	7,0 kg ST/m ²
Redução de volume (%)	RT-21	71,97	72,75	61,05
	RT-26	75,25	70,07	65,29
	RT-31	70,00	73,24	71,29
ST torta (%)	RT-21	11,72	11,90	9,27
	RT-26	11,91	11,71	11,09
	RT-31	12,05	11,80	10,98
ST líquido percolado (g/L)	RT-21	0,47	0,43	0,46
	RT-26	0,40	0,43	0,46
	RT-31	0,43	0,43	0,44

Fonte: Autoria própria.

Os resultados gráficos da redução de volume podem ser observados na Figura 40, por meio de diagramas de caixas.

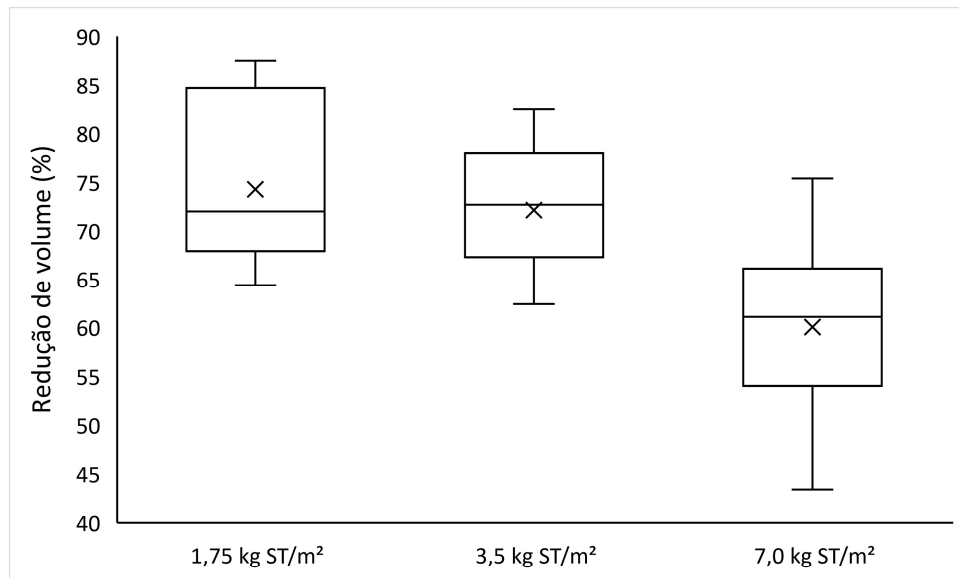
Figura 40 – Percentual de redução de volume nos desaguentamentos.



Fonte: Autoria própria.

Com um nível de significância de 0,05, o teste de Kruskal-Wallis não apontou diferença significativa na redução de volume de lodo, considerando as diferentes classes de geotêxteis empregados, bem como as diferentes TAS testadas nessa pesquisa, com exceção para a combinação da classe RT-21 com TAS de 7,0 kg ST/m², que apresentou diferença significativa comparada com todas as outras combinações, ($p=0,04$) (Figura 41). Vale ressaltar que esses resultados consideram as reduções de volume de no período de 24 horas.

Figura 41 – Percentual de redução de volume para diferentes TAS, considerando o geotêxtil RT-21.



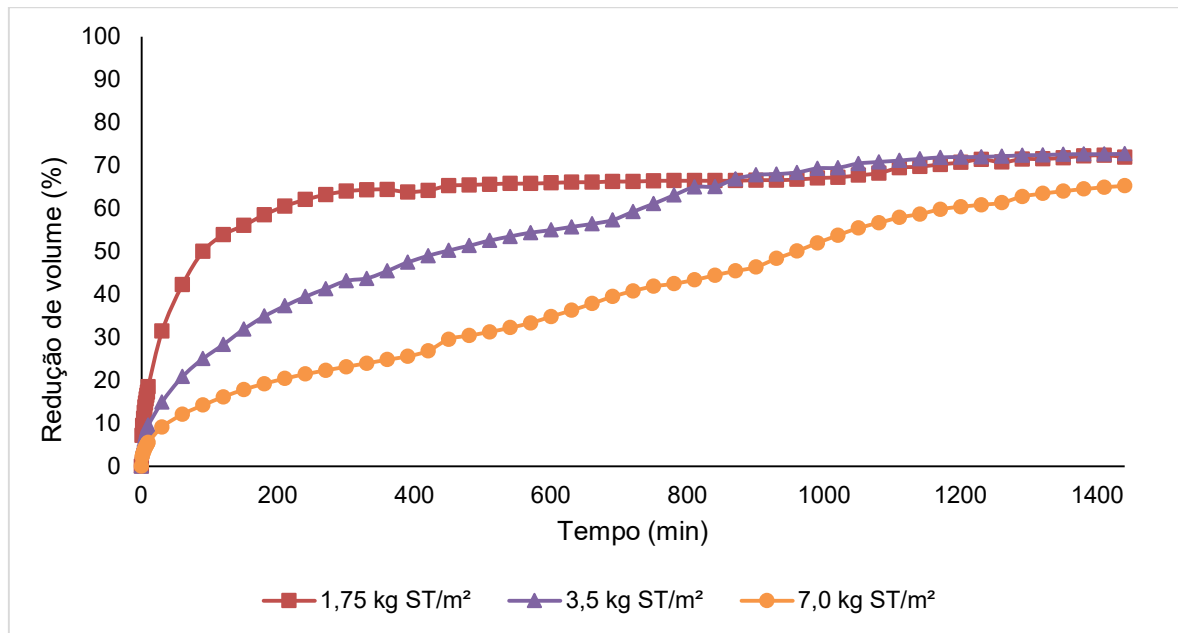
Fonte: Autoria própria.

Oliveira e Oliveira (2017) obtiveram resultados semelhantes no desaguamento de lodos de efluentes domissanitários, observando que apesar das diferenças entre a permissividade hidráulica e abertura aparente das mantas, constatadas na Tabela 8, a taxa de aplicação possui grande influência sobre o processo de drenagem.

Os resultados apresentados por WU e outros (2020) corroboram também com os descritos nesta pesquisa, uma vez que os modelos numéricos aplicados pelos autores, para descrever a drenagem dos lodos, indicaram que as características do geotêxtil utilizado não afetaram a condutividade hidráulica da torta formada, demonstrando que estes pouco influenciam na filtragem de lodos.

Em uma análise um pouco mais detalhada das séries temporais dos desaguamentos, pode-se observar que apesar de não haver diferenças significativas na redução de volume do lodo para diferentes TAS, considerando o período total de desaguamento (24 horas), salvo para o RT-21, essas diferenças parecem ser mais representativas durante as primeiras horas do desaguamento. A Figura 42 apresenta as séries temporais para as diferentes TAS, considerando todos os geotêxteis, visto que esses não parecem apresentar diferenças significativas durante todo o processo.

Figura 42 – Cinética da redução de volume no DEV (n=21).



Fonte: Autoria própria.

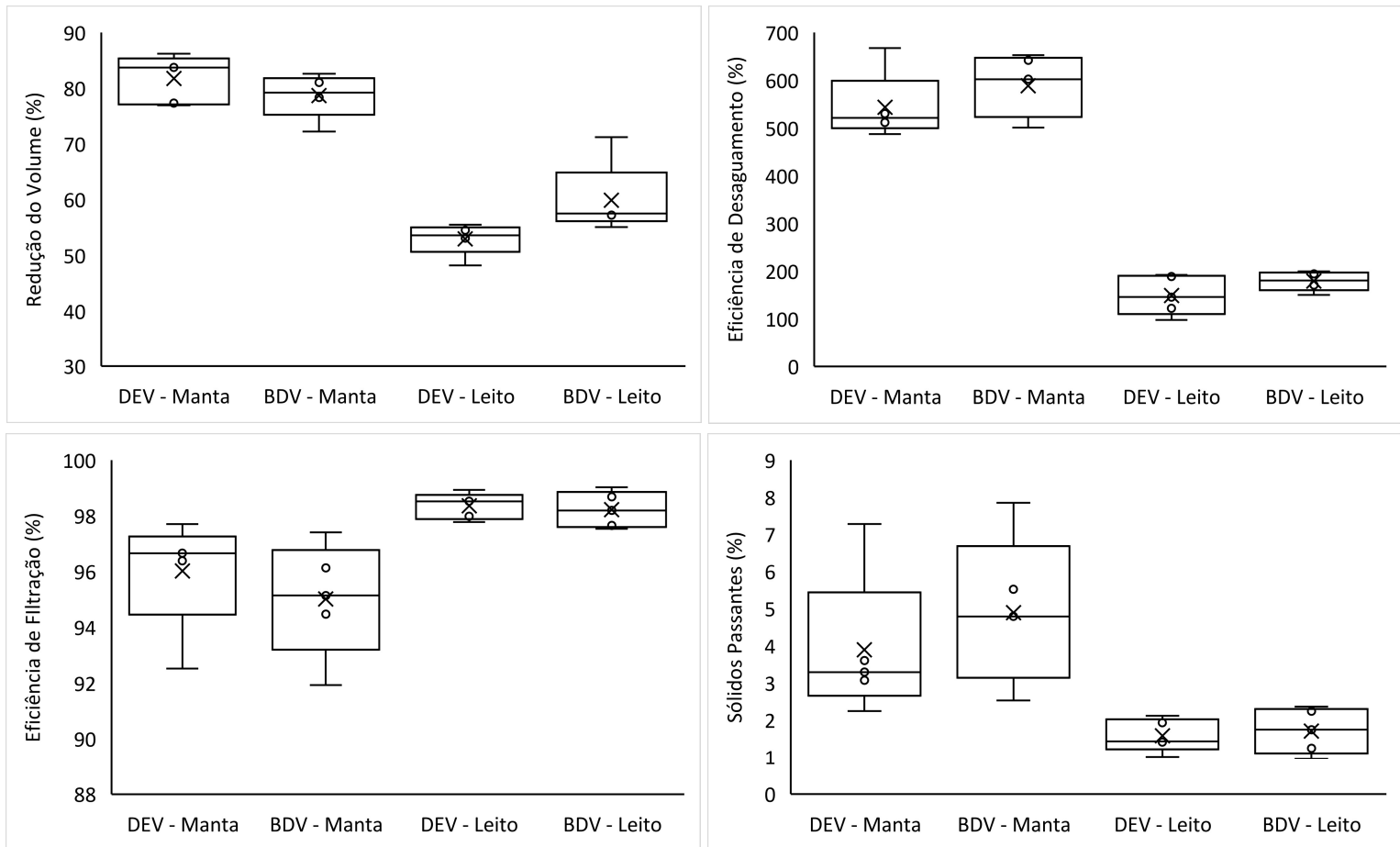
Para a TAS de 1,75 kg ST/m² foi observada uma redução de volume de aproximadamente 60% em 200 min após o início do desaguamento, entretanto para as TAS de 3,5 kg ST/m² este patamar de redução foi atingido aos 750 min, já a TAS de 7,0 kg ST/m² aos 1200 min. Apesar da utilização de uma menor TAS se mostrar vantajosa, considerando a redução do volume em um menor período de tempo (Figura 42), a aplicação deste sistema, em escala maior, seria inviável por demandar grandes áreas. Pode-se inferir também que a TAS aplicada está relacionada com o tempo de formação da camada filtrante de lodo, que é responsável pela diminuição da permeabilidade durante a filtração, reduzindo a vazão do líquido percolado (WEGGEL; DORTCH, 2012).

4.2.2. Etapa 2 – DEV x BDV

Os resultados desta etapa são apresentados na Figura 43 por meio dos índices de desaguamento confrontados com o tipo do lodo e a configuração utilizada no dispositivo de desaguamento. Foram realizados testes estatísticos para comparar a performance do DEV e da BDV independente do lodo, bem como quando relacionada entre pares por tipo de lodo. Por fim, também foi avaliada a performance

dos desaguamentos exclusivamente pelo tipo de lodo, independentemente da configuração do sistema.

Figura 43 – Gráficos com os resultados dos índices de desaguamento (n=5).



Fonte: Autoria própria.

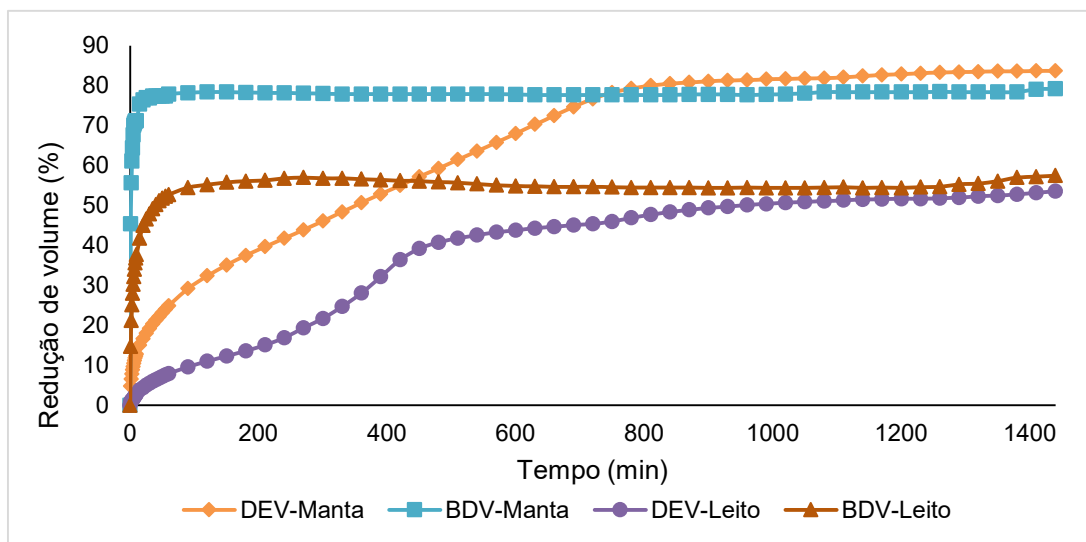
Considerando o DEV e o BDV, não levando em conta os tipos de lodo utilizados, não foram identificadas diferenças significativas para todos os índices de desaguamento. Da mesma forma, quando essa comparação foi feita considerando apenas o lodo de manta, também não foram observadas diferenças significativas. Já para os lodos de leite, a BDV demonstrou um desempenho significativamente melhor na redução de volume (56,1 – 64,8) comparado com o DEV (50,6 – 55,1), valores de 1º e 3º quartis, apresentando $p=0,016$. Ademais, quando analisados apenas os diferentes tipos de lodo (manta e leite), não levando em consideração a configuração do dispositivo de desaguamento, são observadas diferenças significativas em todas as comparações.

Os resultados desta etapa sugerem que para um período de 24h de desaguamento, tanto o DEV quanto a BDV tiveram suas performances semelhantes e não

influenciam diretamente os processos estudados. Já o fator tipo de lodo se mostra o mais influente nos parâmetros de desaguamento analisados. Os índices utilizados estão relacionados principalmente a dois objetivos do desaguamento: reduzir o máximo de volume pela retirada de água livre e obter a melhor qualidade no líquido drenado. Dessa forma, os índices RV e ED se aproximam do primeiro quesito enquanto a EF e a SP do segundo. A partir desta perspectiva pode-se inferir que levando em conta a redução do volume e a concentração de sólidos o lodo de manta mostrou melhores resultados, da mesma forma, o lodo de leite apresentou uma maior eficiência na filtragem e na retenção dos sólidos presentes.

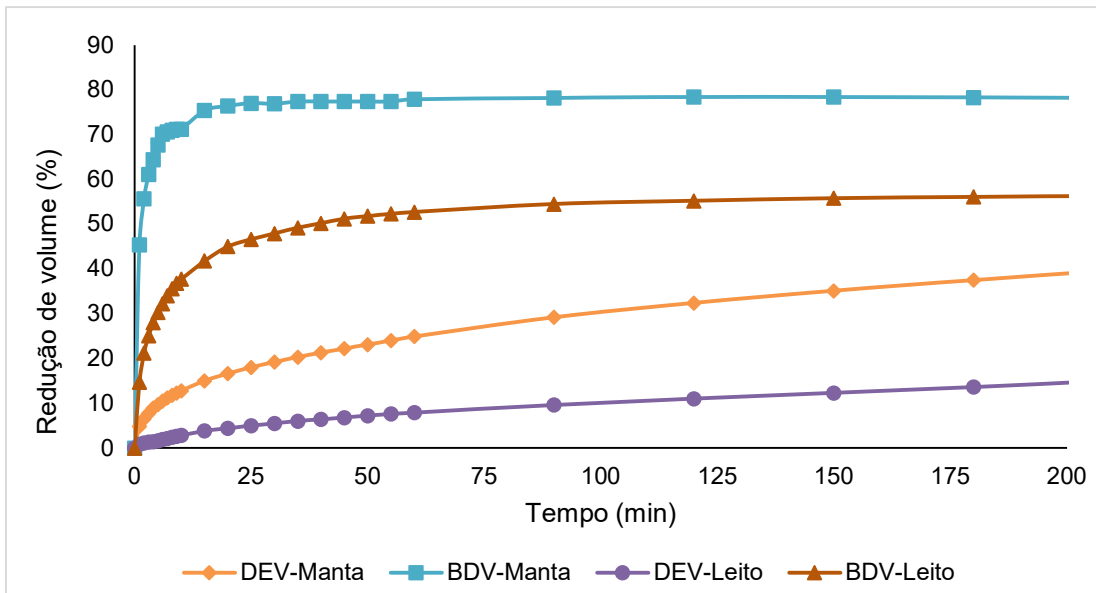
Ao analisar as séries temporais (Figura 44) percebe-se que a BDV realiza o desaguamento em um período curto de tempo, muito inferior aos 1440 minutos medidos durante os experimentos, por isso é apresentada na Figura 45 o mesmo gráfico com foco nos primeiros 200 minutos. Percebe-se que antes dos primeiros 25 minutos as BDVs, independente do lodo utilizado, já chegam ao seu nível final de redução de volume. Enquanto os DEVs alcançam este patamar por volta dos 800 minutos de desaguamento. Percebe-se também uma diferença nos patamares de redução de volume entre os lodos de manta e leite, sendo alcançados por ambos as configurações dos dispositivos.

Figura 44 – Cinética de desaguamento do DEV e da BDV para lodos de manta e leite em 24h (n=5).



Fonte: Autoria própria.

Figura 45 - Cinética de desaguamento do DEV e da BDV para lodos de manta e leite em 200 min (n=5).



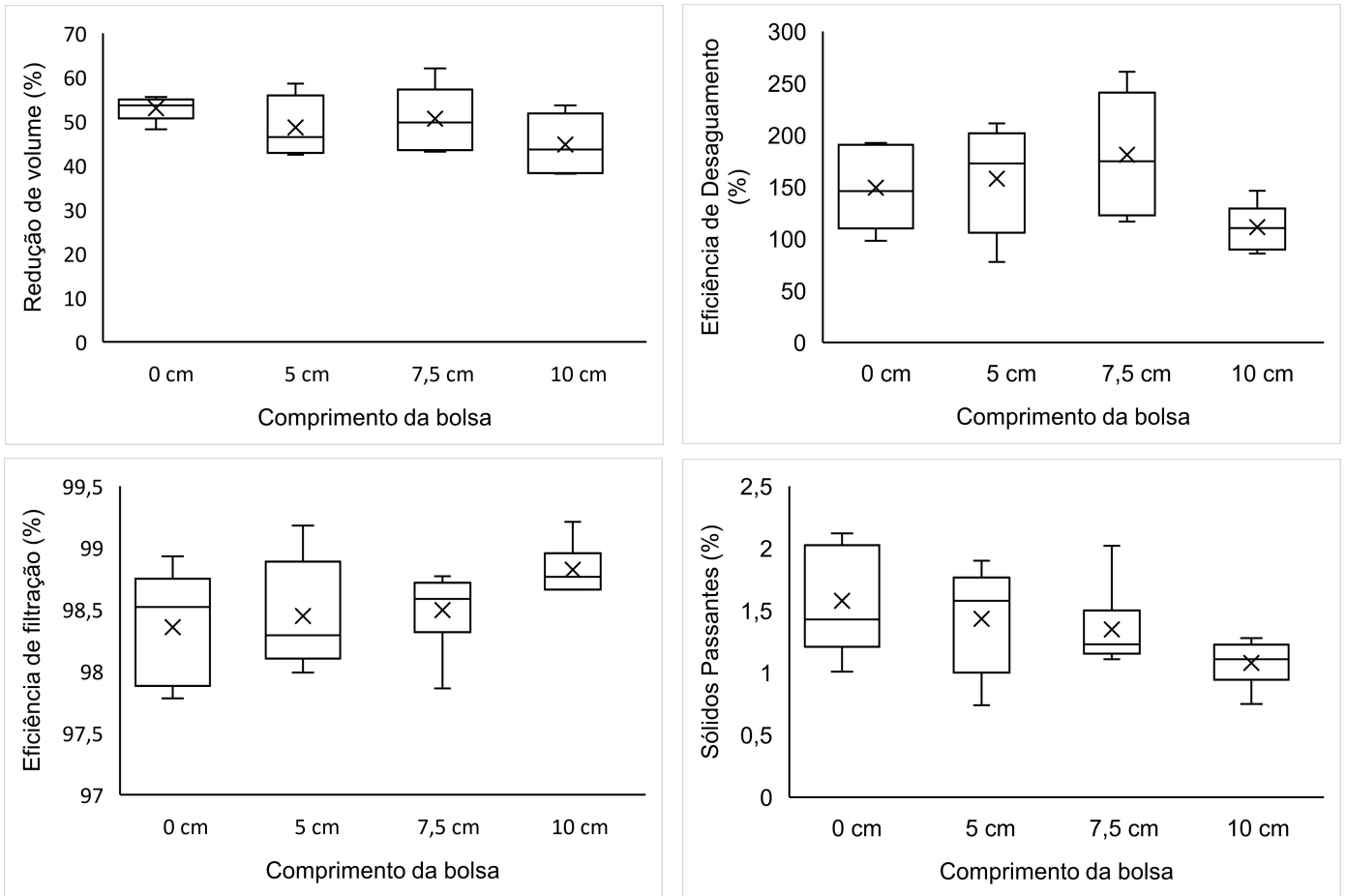
Fonte: Autoria própria.

As diferenças obtidas entre lodos de manta e leite nos desaguamentos, são decorrentes da TAS aplicada, uma vez que nesta etapa foram fixados os volumes a serem desaguados, independentemente do tipo de lodo e da área filtrante do dispositivo de desaguamento. As TAS utilizadas nos DEVs e BDVs com lodo de manta foram da ordem de 3,5 e 0,2 kg ST/m² respectivamente, já para os lodos de leite 10 e 0,5 kg ST/m².

4.2.3. Etapa 3 – DEV + BDV

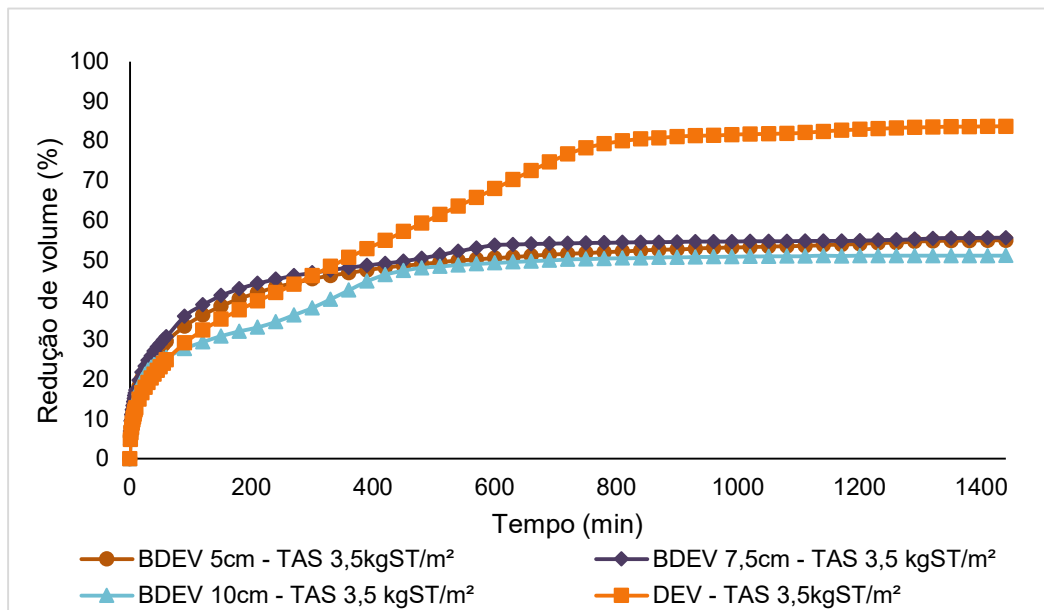
Esta etapa representa as análises da integração entre o DEV e a BDV, permitindo avaliar a influência do comprimento da bolsa na performance do desaguamento, bem como um panorama geral entre as três configurações utilizadas nesta pesquisa (DEV, BDV e BDEV). Os resultados dos índices de desaguamento utilizados para avaliar comprimentos diferentes são apresentados por meio de diagramas de caixa na Figura 46.

Figura 46 – Índices de desaguamento em relação aos comprimentos da bolsa (n=6).



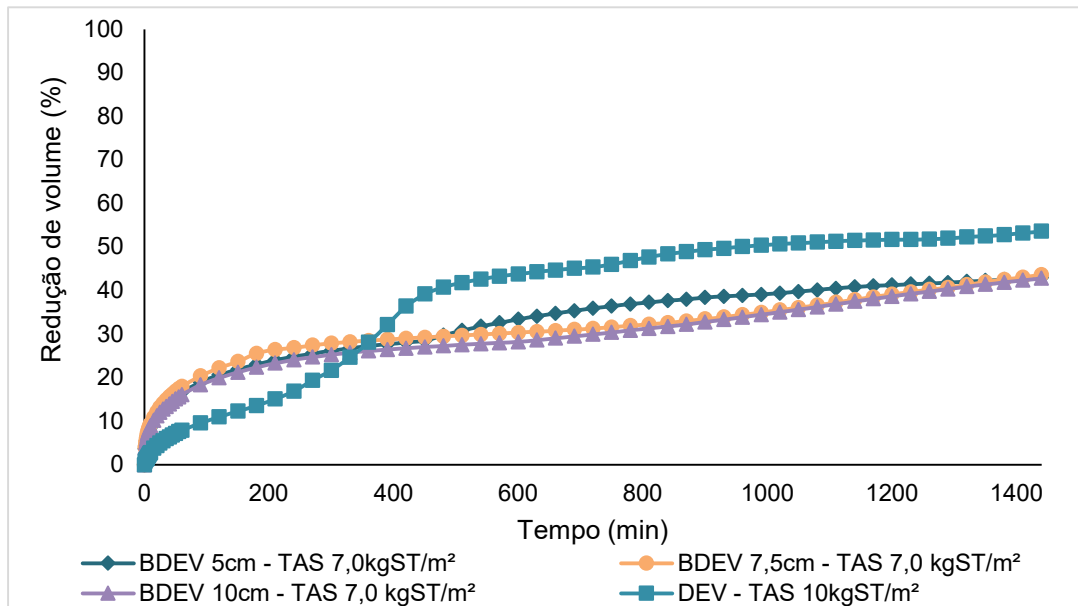
Fonte: Autoria própria

Figura 47 – Gráfico da redução de volume ao longo das 24h para TAS de 3,5 kgST/m² (n=3).



Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Gráfico da redução de volume ao longo das 24h para TAS de 7,0 – 10,0 kg ST/m² (n=3).

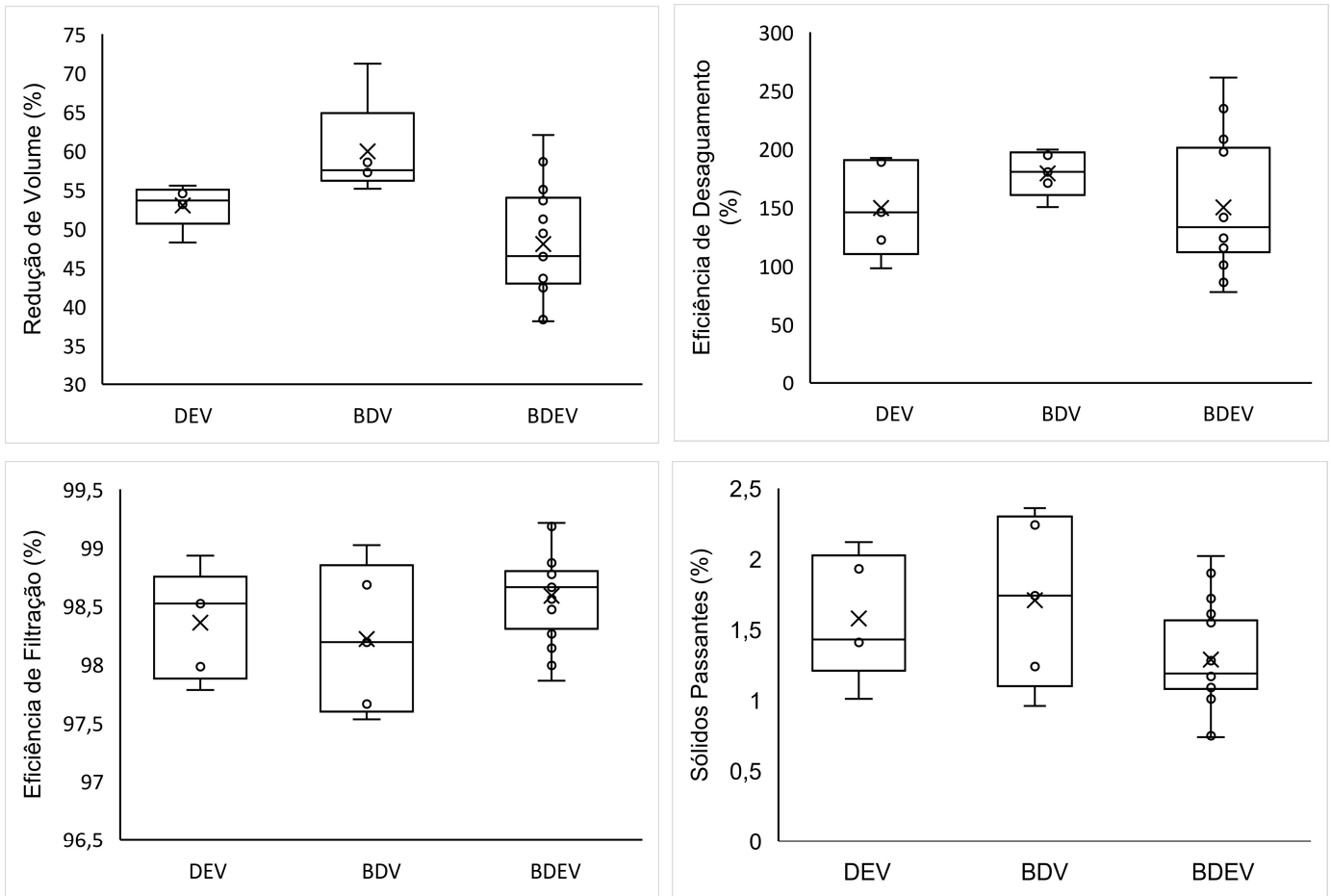


Fonte: Autoria própria.

Quando observados os comprimentos das bolsas utilizados, os testes estatísticos não apresentaram diferenças significativas nos parâmetros avaliados, mesmo separados quanto agrupados por TAS. Este resultado nos permite inferir que o comprimento da bolsa não influencia diretamente os parâmetros utilizados para avaliar os desaguamentos após 24h, ou seja, a área lateral da bolsa não interfere significativamente nos processos. Fazendo com que a aplicação da bolsa no lugar da simples manta, como usado no DEV, não mostre benefício que justifique o seu emprego. Da mesma forma, ao observar as Figura 47 e Figura 48, que separam os desaguamentos por faixa de TAS, demonstram uma superioridade do DEV em relação ao BDEV, apontando nos dois casos uma superação das curvas de redução de volume aos 350 min.

Por fim, quando consideradas as três configurações para os dispositivos de desaguamento utilizadas nesta pesquisa, não foram obtidas diferenças significativas quando comparados por tipo de lodo aplicado (Figura 49). A comparação geral, sem distinção do tipo de lodo, apresentou diferenças significativas em todos os índices, entretanto, a configuração BDEV utilizou apenas lodo de leite em seus ensaios, atrapalhando a avaliação uma vez que este parâmetro de entrada implica em variações no desempenho do desaguamento.

Figura 49 – Índices de eficiência relacionados às configurações dos sistemas de desaguamento com geotêxteis para lodos de leite (n=5).



Fonte: Autoria própria.

Outro ponto a ser esclarecido é que os ensaios realizados na BDV tiveram TAS muito menores que os outros dois dispositivos, apresentando melhor desempenho nos primeiros minutos de desaguamento, porém chegando a patamares equivalentes aos outros ao longo das 24h observadas.

5. CONCLUSÃO

A avaliação dos desaguamentos de lodos de UASB, de forma natural, sem o uso de condicionantes químicos, utilizando mantas geotêxteis em configurações diversas resultou nas seguintes conclusões:

Os lodos caracterizados durante esta pesquisa tiveram resultados compatíveis com outros trabalhos que utilizaram lodos similares, apresentando valores condizentes nos parâmetros analisados. O teor de ST dos lodos teve mediana de 1,94% e 5,09% para o lodo de manta e leito respectivamente, ambos com relação SV/ST com mediana de 69%, dentro da faixa do relatado para o teor de ST e ligeiramente acima no que tange a relação SV/ST para lodos anaeróbios.

Os resultados dos testes de aptidão ao desaguamento e a distribuição das frações de água no lodo apresentaram valores condizentes com outras pesquisas, entretanto não demonstraram correlação forte com os índices de eficiência de desaguamento utilizados neste trabalho.

A caracterização reológica realizada com os lodos de UASB indicou que o seu comportamento reológico apresenta boa concordância com os modelos de Bingham e Herschel-Bulkley, demonstrando comportamento pseudoplástico com tensão limite de cisalhamento, sendo que este último, ocorre em lodos com teor de ST a partir de 2%.

Quanto aos desaguamentos, foi confirmada a importância secundária do material geotêxtil empregado na drenagem natural dos lodos, fazendo com que o tipo da manta utilizada não tenha influenciado diretamente os resultados avaliados. Já a TAS demonstrou desde a primeira etapa que tem grande influência no processo, estando relacionada a maior carga de sólidos por unidade de área e consequentemente a formação de uma torta retida mais espessa e com maior resistência a filtração. Desta forma, percebe-se nos resultados, de maneira geral, que quanto maior a TAS menor é a redução do volume e melhor é a qualidade do filtrado.

Quando observados os dispositivos de desaguamentos utilizados neste trabalho, percebe-se que para um período de 24h não há diferenças significativas entre os

índices de eficiência utilizados, contudo é sabido que a BDV foi utilizada com TAS muito inferior as outras configurações. O que é percebido nas curvas de redução de volume ao longo do tempo, onde a BDV atinge o patamar de redução de volume com por volta de 1/8 do tempo dos outros dispositivos.

Considerando o DEV e a BDEV, que possibilitaram a utilização das mesmas TAS, conclui-se que o incremento de uma bolsa geotêxtil vertical no lugar da simples manta plana não apresenta melhora significativa no que tange a eficiência dos desaguamentos. Dessa forma, o DEV se apresenta como uma solução mais simples e robusta que o BDEV, por não ser necessária a costura e o menor consumo de material geotêxtil.

Por fim, o desaguamento de lodos de UASB, por meio de sistemas de drenagem utilizando geotêxteis, em escala de bancada apresentou resultados promissores, apresentando valores consideráveis na redução de volume do lodo, sem a utilização de condicionantes químicos.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004**: Resíduos sólidos - Classificação. 2004.

ACHON, Cali Laguna; COIMBRA, Paulo Ricardo Santos; KELLNER, Erich. Influence of the geotextile blanket and sludge height in anaerobic sludge dewatering using drainage bed. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 849-860, ago. 2019.

AGARWAL, Saurabh; ABU-ORF, Mohammad; NOVAK, John T. Sequential polymer dosing for effective dewatering of ATAD sludges. **Water Research**, [s.l.], v. 39, n. 7, p. 1301-1310, abr. 2005.

ANDREOLI C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento**: processamento, reciclagem e disposição final. PROSAB 2 – TEMA IV. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001

ARDILA, Maria Alejandra Aparicio; SOUZA, Samira Tessarolli de; SILVA, Jefferson Lins da; VALENTIN, Clever Aparecido; DANTAS, Angela di Bernardo. Geotextile Tube Dewatering Performance Assessment: an experimental study of sludge dewatering generated at a water treatment plant. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 19, p. 8129, out. 2020.

BARROSO, Marcelo Melo. **Influência das micro e macropriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BENAMOUN, Lyes; ARLABOSSE, Patricia; LÉONARD, Angélique. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 28, p. 29-43, dez. 2013.

BERTANZA, Giorgio; PAPA, Matteo; CANATO, Matteo; COLLIVIGNARELLI, Maria Cristina; PEDRAZZANI, Roberta. How can sludge dewatering devices be assessed? Development of a new DSS and its application to real case studies. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 137, p. 86-92, maio 2014.

BRAGA, Wallace Marcelino. **Utilização de parâmetros reológicos para verificar a aptidão ao desaguamento de lodos de uma estação de tratamento de esgotos do tipo UASB+BFs condicionados com polieletrólitos**. 2003. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

BRASIL. **Lei n. 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Política nacional de resíduos sólidos [recurso eletrônico]. 2. ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2010. 73 p.

CERQUEIRA, Pedro Lindstron Wittica. **Custos de desaguamento e higienização**

de lodo em ETEs com reatores UASB seguidos de pós tratamento aeróbio: Subsídios para estudos de concepção. 2019. 181 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

CHENG, Yingchao; LI, Huan. Rheological behavior of sewage sludge with high solid content. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 71, n. 11, p. 1686-1693, 31 mar. 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2007. 380p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5).

CHRISTENSEN, Morten Lykkegaard; KEIDING, Kristian; NIELSEN, Per Halkjær; JORGENSEN, Mads Koustrup. Dewatering in biological wastewater treatment: a review. **Water Research**, [S.L.], v. 82, p. 14-24, out. 2015

CIEŚLIK, Bartłomiej Michał; NAMIEŚNIK, Jacek; KONIECZKA, Piotr. Review of sewage sludge management: Standards, regulations and analytical methods. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 90, p. 1-15, mar. 2015.

COLLIVIGNARELLI, Maria Cristina; CANATO, Matteo; ABBÀ, Alessandro; MIINO, Marco Carnevale. Biosolids: what are the different types of reuse?. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 238, p. 117844, nov. 2019.

CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, Cleverson Vitório (coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. p. 121-142.

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

EBERHARD, Ursin; SEYBOLD, Hansjoerg J.; FLORIANCIC, Marius; BERTSCH, Pascal; JIMÉNEZ-MARTÍNEZ, Joaquin; ANDRADE, José S.; HOLZNER, Markus. Determination of the Effective Viscosity of Non-newtonian Fluids Flowing Through Porous Media. **Frontiers In Physics**, [S.L.], v. 7, p. 1-9, 30 maio 2019.

EDWARDS, Joel; OTHMAN, Maazuza; CROSSIN, Enda; BURN, Stewart. Anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludge: a comparative life cycle assessment in the context of a waste service provision. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 223, p. 237-249, jan. 2017

ESHTIAGHI, Nicky; MARKIS, Flora; YAP, Shao Dong; BAUDEZ, Jean-Christophe; SLATTER, Paul. Rheological characterisation of municipal sludge: a review. **Water Research**, [S.L.], v. 47, n. 15, p. 5493-5510, out. 2013.

FARNO, Ehsan; LESTER, Daniel Robert; ESHTIAGHI, Nicky. Constitutive modelling and pipeline flow of thixotropic viscoplastic wastewater sludge. **Water Research**,

[S.L.], v. 184, p. 116-126, out. 2020.

FIJALKOWSKI, Krzysztof; RORAT, Agnieszka; GROBELAK, Anna; KACPRZAK, Malgorzata J. The presence of contaminations in sewage sludge – The current situation. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 203, p. 1126-1136, dez. 2017.

GHERGHEL, Andreea; TEODOSIU, Carmen; GISI, Sabino de. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 228, p. 244-263, ago. 2019.

GROBELAK, Anna; CZERWIŃSKA, Karolina; MURTAŚ, Aneta. General considerations on sludge disposal, industrial and municipal sludge. **Industrial And Municipal Sludge**, [S.L.], p. 135-153, 2019.

GROSSER, Anna. The influence of decreased hydraulic retention time on the performance and stability of co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge and organic fraction of municipal waste. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 203, p. 1143-1157, dez. 2017.

GONÇALVES, R. F. *et al.* Remoção da umidade de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: FCO, 2001. Volume VI, cap. 5, p.159-259.

JAYARAMAN, Kandasamy; GÖKALP, Iskender. Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 89, p. 83-91, jan. 2015.

JIANG, Jiankai; WU, Jing; PONCIN, Souhila; LI, Huai Z.. Rheological characteristics of highly concentrated anaerobic digested sludge. **Biochemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 86, p. 57-61, maio 2014.

KOERNER, George R; KOERNER, Robert M. Geotextile tube assessment using a hanging bag test. **Geotextiles and Geomembranes**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 129-137, abr. 2006.

KURODA, Emília Kiyomi *et al.* Drenagem / secagem de lodo de decantadores de ETAs em manta geotêxtil. **Revista DAE**, v. 62, n. 194, p. 24-35, 2014.

LAWSON, C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. **Geosynthetics International**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 384-427, dez. 2008.

LEITÃO, R. C.; SANTAELLA, S. T.; VAN HAANDEL, A. C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G.. The effect of operational conditions on the hydrodynamic characteristics of the sludge bed in UASB reactors. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 64, n. 9, p. 1935-1941, 1 nov. 2011.

LIANG, Fenglin; SAUCEAU, Martial; DUSSEYRE, Gilles; ARLABOSSE, Patricia. A uniaxial cyclic compression method for characterizing the rheological and textural behaviors of mechanically dewatered sewage sludge. **Water Research**, [S.L.], v.

113, p. 171-180, abr. 2017.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3.ed. São Paulo: Editora Átomo, 2010.

LIN, Qintie; PENG, Huanlong; ZHONG, Songxiong; XIANG, Jiangxin. Synthesis, characterization, and secondary sludge dewatering performance of a novel combined silicon–aluminum–iron–starch flocculant. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 285, p. 199-206, mar. 2015.

LOBATO, Livia Cristina da Silva; RIBEIRO, Thiago Bressani; SILVA, Bruno Sidnei da; FLÓREZ, Carlos Andrés Días; NEVES, Priscilla Natalie Pereira; CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 3: gerenciamento de lodo e espuma. **Revista Dae**, [S.L.], v. 66, n. 214, p. 30-55, 2018.

LOUZADA, Larissa Miranda. **Influência da codigestão anaeróbia de biomassa mixotrófica no desaguamento do lodo de descarte de um UASB tratando esgoto sanitário**. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

MACHADO, Livia Rodrigues Dias; TRANNIN, Isabel Cristina de Barros. Agricultural potential of an industrial sewage sludge in compliance with CONAMA Resolution no. 375/2006. **Semina: Ciências Agrárias**, [S.L.], v. 36, n. 62, p. 4177, 16 dez. 2015.

MAHMOUD, Akrama; HOADLEY, Andrew F.A.; CONRARDY, Jean-Baptiste; OLIVIER, Jérémy; VAXELAIRE, Jean. Influence of process operating parameters on dryness level and energy saving during wastewater sludge electro-dewatering. **Water Research**, [S.L.], v. 103, p. 109-123, out. 2016

MANGONE, Franco; FERREIRA, Jimena; FERRARI, Adrián; GUTIÉRREZ, Soledad. Modelling and optimization of a geotextile dewatering tubes process. **Computer Aided Chemical Engineering**, [S.L.], v.43, p. 1371-1376, 2018.

MOO-YOUNG, Horace K; A GAFFNEY, Douglas; MO, Xinghua. Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 20, n. 5, p. 289-303, out. 2002.

MORTARA, Fernando Cintra. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios**. 2022. 241 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MOUZAOU, M.; BAUDEZ, J.C.; SAUCEAU, M.; ARLABOSSE, P. Experimental rheological procedure adapted to pasty dewatered sludge up to 45 % dry matter. **Water Research**, [S.L.], v. 133, p. 1-7, abr. 2018.

MURUGESAN, K.; SELVAM, A.; WONG, J.W.C. Biotechnological Approaches to

Sludge Dewatering. **Current Developments In Biotechnology And Bioengineering**, [S.l.], p. 367-390, 2017.

MUTHUKUMARAN, A. E.; ILAMPARUTHI, K. Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering. **Geotextiles and Geomembranes**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 210-219, ago. 2006.

NASCIMENTO, Altina Lacerda; SOUZA, Adijailton José de; OLIVEIRA, Fernando Carvalho; COSCIONE, Aline Renée; VIANA, Douglas Gomes; REGITANO, Jussara Borges. Chemical attributes of sewage sludges: relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 258, p. 120746, jun. 2020.

NÓBREGA, Carolina Garcia Melo. **Influência do processo de hidrólise na capacidade do desaguamento do lodo de descarte de um UASB codigerindo esgoto sanitário e lodo algáceo**. 2020. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Programa de Pós Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.

OLIVEIRA, Alessandra da Silva; OLIVEIRA, André Luiz de. Desaguamento de lodo de efluente saneante domissanitário em Leito de Drenagem. **Revista Dae**, [S.L.], v. 65, n. 208, p. 68-82, out. 2017

PANDEY, Manoj Kumar; JENSSEN, Petter Deinboll. Reed Beds for Sludge Dewatering and Stabilization. **Journal Of Environmental Protection**, [S.L.], v. 06, n. 04, p. 341-350, abr. 2015.

ROSA, André Pereira; LOBATO, Livia Cristina da Silva; BORGES, Jorge Martins; MELO, Gilberto Caldeira Bandeira de; CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso estação de tratamento de efluentes laboreaux (Itabira). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 315-328, jun. 2016.

SANTOS, Bruna. **Avaliação da Aplicação do Sistema de Leito de Drenagem como Tratamento de lodo da Estação de Tratamento de Água bom Jardim em Uberlândia - MG**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SATYAMURTHY, R.; BHATIA, S. K. Effect of polymer conditioning on dewatering characteristics of fine sediment slurry using geotextiles. **Geosynthetics International**, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 83-96, abr. 2009.

SEMBLANTE, Galilee U.; HAI, Faisal I.; NGO, Huu H.; GUO, Wenshan; YOU, Sheng-Jie; PRICE, William E.; NGHIEM, Long D.. Sludge cycling between aerobic, anoxic and anaerobic regimes to reduce sludge production during wastewater treatment: performance, mechanisms, and implications. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 155, p. 395-409, mar. 2014.

SILVEIRA, Cristiane; KURODA, Emília Kiyomi; ABE, Camila Hiromi; YOSHIKI, Leonardo; HIROOKA, Elisa Yoko. Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 297-306, jun. 2015.

SKINNER, Samuel J.; STUDER, Lindsay J.; DIXON, David R.; HILLIS, Peter; REES, Catherine A.; WALL, Rachael C.; CAVALIDA, Raul G.; USHER, Shane P.; STICKLAND, Anthony D.; SCALES, Peter J. Quantification of wastewater sludge dewatering. **Water Research**, [S.L.], v. 82, p. 2-13, out. 2015.

SLATTER, P. T. Sludge pipeline design. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 44, n. 10, p. 115-120, nov. 2001.

SPAVIER, Luciana Callegari. **Distribuição das Diferentes Frações de Água em Lodos de Estações de Tratamento de Águas Residuárias**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

SPINOSA, Ludovico; AYOL, Azize. Rheological characterization of sludge. **Industrial And Municipal Sludge**, [S.L.], p. 225-252, 2019.

TCHOBANOGLIOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5th. New York: McGraw Hill, 2014. 2048p.

TO, Vu Hien Phuong; NGUYEN, Tien Vinh; VIGNESWARAN, Saravanamuth; NGO, Huu Hao. A review on sludge dewatering indices. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 74, n. 1, p. 1-16, 7 mar. 2016.

TOMINAGA, Emy. **Análise dos procedimentos para avaliação de desempenho de sistemas fechados com geotêxtil para desaguamento**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

GUIMARÃES, M. G. A.; URASHIMA, D. C.; VIDAL, D. M. Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems. **Geosynthetics International**, [S.L.], v. 21, n. 5, p. 310-320, out. 2014.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande: Epgraf, 1994.

VERONEZ, F. A. **Desempenho de um reator UASB tratando esgoto sanitário e realizando concomitantemente o adensamento e a digestão do lodo de descarte de biofiltros aerados submersos**. 2001. f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F.; Capítulo 2: Lodo de Esgotos: Características e Produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.;

FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

VON SPERLING, M. Biological Wastewater Treatment Series. Volume two: **Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal**. Londres, Inglaterra: IWA Publishing, 2007.

WACIAWEK, Stanisław; GRÜBEL, Klaudiusz; DENNIS, Philip; VINOD, V.T.P.; ČERNÍK, Miroslav. A novel approach for simultaneous improvement of dewaterability, post-digestion liquor properties and toluene removal from anaerobically digested sludge. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 291, p. 192-198, maio 2016.

WANG, Hou-Feng; HU, Hao; WANG, Hua-Jie; BAI, Ya-Nan; SHEN, Xiao-Fei; ZHANG, Wei; ZENG, Raymond Jianxiong. Comprehensive investigation of the relationship between organic content and waste activated sludge dewaterability. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 394, p. 122547, jul. 2020.

WANG, Tianfeng; SHAO, Liming; LI, Tianshui; LÜ, Fan; HE, Pinjing. Digestion and dewatering characteristics of waste activated sludge treated by an anaerobic biofilm system. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 153, p. 131-136, fev. 2014.

WANKE, Renate. **Drenagem Natural da Água Livre de Lodos de Reator UASB Condicionado com Polieletrólitos em Desaguidor Estático Vertical com Tela**. 2005. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

WEGGEL, J. Richard; DORTCH, Jacob. A model for filter cake formation on geotextiles: experiments. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 31, p. 62-68, abr. 2012.

WEGGEL, J Richard; DORTCH, Jacob; GAFFNEY, Douglas. Geotextiles and Geomembranes Analysis of fluid discharge from a hanging geotextile bag. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, n. 1, p. 65-73, 2011.

WU, Boran; DAI, Xiaohu; CHAI, Xiaoli. Critical review on dewatering of sewage sludge: influential mechanism, conditioning technologies and implications to sludge re-utilizations. **Water Research**, [S.L.], v. 180, p. 115912, ago. 2020.

WU, Silin; CHEN, Yilin; ZHU, Yuyang; ZHANG, Pei; SCHEUERMANN, Alexander; JIN, Guangqiu; ZHU, Wei. Study on filtration process of geotextile with LBM-DEM-DLVO coupling method. **Geotextiles And Geomembranes**, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 166-179, fev. 2021.

YEE, T.W.; LAWSON, C.R. Modelling the geotextile tube dewatering process. **Geosynthetics International**, [S.L.], v. 19, n. 5, p. 339-353, out. 2012.

ZHANG, Quanguo; HU, Jianjun; LEE, Duu-Jong; CHANG, Yingju; LEE, Yu-Jen.

Sludge treatment: current research trends. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 243, p. 1159-1172, nov. 2017.

ZHOU, Xu *et al.* A review on sludge conditioning by sludge pre-treatment with a focus on advanced oxidation. **RSC Advances**, [S.L.], v. 4, n. 92, p. 50644-50652, 2014.