



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LUCIANA OTONI DE SOUZA

**USO DE GEOTÊXTIL PARA A DESIDRATAÇÃO DE LODO DA ETE
VILA DA BARCA-PA**

Belém-PA
2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LUCIANA OTONI DE SOUZA

**USO DE GEOTÊXTIL PARA A DESIDRATAÇÃO DE LODO DA ETE
VILA DA BARCA-PA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do Título de Mestre em Saneamento Ambiental e Infraestrutura Urbana.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça

Belém-PA
2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

USO DE GEOTÊXTIL PARA A DESIDRATAÇÃO DE LODO DA ETE VILA DA BARCA-PA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do Título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça

Data da avaliação: 15/04/2016

Banca Examinadora

Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça
Instituição: UFPA

Assinatura: _____

Prof. Dr^a. Luiza Carla Girard Mendes Teixeira
Instituição: UFPA

Assinatura: _____

Prof. Dr^a. Luciana Coêlho Mendonça
Instituição: UFSE

Assinatura: _____

Prof. Dr. André Luiz da Silva Salgado Coelho
Instituição: UFPA

Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

À Deus, pelo amor incondicional e pelo dom da Vida.
Aos meus pais, Pedro e Socorro, pela força e incentivo contínuos.
Ao meu amado filho, Samuel Souza de Souza, por ter dado um novo sentido a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus todo poderoso por me permitir vivenciar momentos inesquecíveis;

Aos meus familiares que sempre acreditaram em mim e tinham a certeza de que este dia chegaria. E chegou;

À UFPA e ao PPGEC pela acolhida e satisfação em participar desta jornada incrível;

Ao professor e orientador Neyson Mendonça por acreditar, confiar e persistir junto comigo neste projeto que hoje se concretiza;

À Maccaferri pela doação dos geotêxteis que possibilitou alcançarmos os objetivos pretendidos;

À empresa SNFLONEX junto com seus funcionários Frederico (Fred) e , que além de nos cederem o floculante e polímeros para o condicionamento do lodo, também nos deram sua paciência e amizade;

À FINEP/ FADESP/ CNPq/ CAPES por financiarem nossos gastos com toda a compra de equipamentos, bolsas de iniciação científica e aparato necessários para a conclusão desta pesquisa;

Ao PROSAB que me permitiu navegar em mares dantes desconhecidos, com uma experiência grandiosa e positiva para a vida pessoal e profissional;

Ao Instituto Evandro Chagas (IEC) por ceder seu laboratório e técnicos, principalmente ao Kelson, pelo atendimento e presteza na realização das leituras de metais;

Ao Laboratório de Química Analítica e Ambiental (LAQUANAM) sob a coordenação da professora Simone pelas incontáveis vezes que precisamos de seu espaço para digestão de metais e outros;

Ao professor Augusto por ceder seu laboratório para análise de COT;

Aos professores membros da banca de avaliação por aceitarem o convite e por suas contribuições para enriquecer este trabalho;

Ao Ronilson pelo apoio, incentivo e patrocínio (gastei muita gasolina no período desta pesquisa rrsrrs);

Ao LAESA/GESA pela acolhida e oportunidade de aprofundar meus conhecimentos; Aos antigos e aos mais novos integrantes do GESA que me ajudaram de maneira direta ou indireta, não esquecerei as conversas, risadas, caronas, selfies, coffe breaks ...;

À todos que de alguma forma participaram na conclusão desta pesquisa o meu muito obrigada.

*Sei que o meu trabalho é uma gota no oceano.
Mas sem ele, o oceano seria menor.*

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Verifica o desempenho de desidratação do lodo da ETE Vila da Barca com uso de geotêxtil. O condicionamento do lodo foi feito com o auxílio dos produtos químicos coagulante PAC (PolyAluminium Chloride - Policloreto de alumínio- 10%) e floculante polímero catiônico do tipo FLONEX 4400 SH- 0,1%, que permitiram a formação de flocos bem definidos e maiores em curto intervalo de tempo de agitação em Jar test aproximadamente 9". Para a avaliação e escolha da situação ideal para dosagens no condicionamento foram realizados 25 ensaios com variação das concentrações do lodo bruto e polímero e PAC. Dentre os ensaios, o que se destacou foi o ensaio 3, na segunda dosagem com 95 mg/L de polímero e 8 mg/L de PAC e concentração do lodo de 24.106 mg/L. Para estas dosagens o desaguamento apresentou um filtrado com qualidade satisfatória quanto às características físico-químicas e uma torta com altas concentrações de ST e baixo teor de umidade. No balanço de massa na torta, conseguiu-se obter eficiência do desaguamento do geotêxtil nas 3 primeiras dosagens do ensaio 3 com resultados de 90%, 91% e 91% demonstrando bom desempenho do geotêxtil. Na análise estatística, a formação de duas componentes principais formando o conjunto de todas as variáveis físico-química analisadas dos 3 filtrados resultantes do ensaio 3, demonstraram a homogeneidade, inter-relação e similaridade entre elas, pois conseguem definir com um elevado grau de significância as características do filtrado.

Palavras chave: Geotêxtil, desaguamento, lodo anaeróbio, Vila da Barca.

ABSTRACT

Checks the sludge dewatering performance of ETE Barca Village with use of geotextile. Sludge conditioning was done with the aid of chemical coagulant PAC (polyaluminium chloride - Polyvinyl aluminum- 10%) and the cationic flocculant polymer of the type FLONEX 4400 SH 0.1%, which allowed the formation of well-defined and larger flakes short stirring time interval approximately 9 jar test ". For the evaluation and selection of the ideal situation for dosages on conditioning were performed 25 trials with varying the concentrations of the raw sludge and polymer and PAC. Among the tests, which was stood the test 3, the second dosing with 95 mg / L and 8 mg polymer / L of PAC and concentration of sludge 24,106 mg / L. For these dosages showed a dewatering filtrate with satisfactory quality and the physical and chemical characteristics and a pie with high concentrations of ST and low moisture content. In the mass balance in the cake, it was possible to obtain the geotextile dewatering efficiency in the first 3 doses of the test results 3 with 90%, 91% and 91% showing good performance of geotextile. In the statistical analysis, the formation of two main components forming the set of all physical and chemical variables of 3 filtrates from the 3 trial demonstrated homogeneity, inter-relationship and similarity between them, because they can define with a high degree of significance the filtrate characteristics.

Keywords: geotextile, drainage, anaerobic sludge, Barca Village.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Etapas da desidratação do lodo em geomembrana. a, b e c.....	37
Figura 2	Etapas de condicionamento e desidratação do lodo na UBDL.....	46
Figura 3	Estado e município de localização da ETE.....	47
Figura 4	Localização da ETE - Vila da Barca.....	47
Figura 5	Fluxograma da ETE Vila da Barca.....	48
Figura 6	Equipamento Jar test utilizado para o condicionamento do lodo da ETE Vila da Barca.....	50
Figura 7	Modelo de geotêxtil adaptado in loco pela autor para uso em bancada.....	52
Figura 8	Arranjo da UBDL.....	53
Figura 9	Pontos de coleta do lodo na ETE Vila da Barca.....	54
Figura 10	Coleta e armazenamento do lodo da ETE Vila da Barca.....	54
Figura 11	Teste preliminar para a escolha do melhor polímero para floculação do lodo.....	55
Figura 12	Condicionamento e homogeneização do lodo com PAC e polímero nas cubas de acrílico de 2 L do Jar test.....	57
Figura 13	Ensaio preliminar de desidratação do lodo e coleta do filtrado.....	58
Figura 14	Balanço de massa na UBDL.....	60
Figura 15	Balanço de massa do lodo condicionado.....	61
Figura 16	Desenho esquemático dos índices que participam do processo de desidratação do lodo da Vila da Barca.....	66
Figura 17	Dendograma de agrupamento hierárquico entre as variáveis do lodo no fundo e em camadas ao longo da altura do reator UASB.....	72
Figura 18	Qualidade dos flocos formados no segundo teste com a obtenção do filtrado 2 na proveta.....	78
Figura 19	Relação ST e dosagem de polímero no filtrado.....	82
Figura 20	Torta produzida no processo de desidratação do lodo.....	85
Figura 21	Variáveis analisadas no filtrado resultante do desaguamento do lodo com a apresentação das duas componentes principais formadas.....	88
Figura 22	Agrupamento das variáveis utilizadas para a caracterização físico-química do filtrado obtido da desidratação em geotêxtil do lodo da ETE Vila da Barca- PA.....	90

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1	Principais características de lodo produzido nas estações de tratamento de esgoto.....	26
Quadro 1	Propriedades do geotêxtil.....	51
Tabela 2	Especificações do geotêxtil comercializado.....	52
Tabela 3	Amostras dos polímeros usados nos testes.....	56
Tabela 4	Testes para a escolha do polímero para condicionamento do lodo bruto.....	56
Tabela 5	Dosagens de coagulante e floculante para o condicionamento do lodo...	59
Quadro 2	Variáveis analisadas na caracterização do lodo bruto da ETE Vila da Barca e do filtrado resultante do desaguamento.....	62
Quadro 3	Metodologias para medição de variáveis empregadas na determinação do Índice de Langelier.....	63
Tabela 6	Caracterização do lodo bruto da ETE Vila da Barca e de outras ETES...	70
Tabela 7	Teor de metais encontrados no lodo bruto da ETE Vila da Barca.....	73
Tabela 8	Resultados obtidos para o $pH_{\text{saturação}}$ e para o Índice de Langelier para os filtrados analisados.....	74
Tabela 9	Dados estatísticos de componentes principais para obtenção do IQF.....	75
Tabela 10	Resumo dos principais resultados obtidos nos ensaios de desaguamento com geotêxtil em bancada com lodo da ETE Vila da Barca (PA).....	76
Tabela 11	Taxa de filtração (TF) para a coleta de volume específico do filtrado em cada teste de desidratação.....	78
Tabela 12	Valores de DQO obtidos nos filtrados do sistema de desaguamento de lodo.....	79
Tabela 13	Relação entre DQO e DBO nos filtrados do desaguamento do lodo.....	80
Tabela 14	Relação DQO/DBO e o grau de degradabilidade da matéria orgânica.....	80
Tabela 15	Resultados da DQO e relação DQO/COT nos filtrados estudados.....	81
Tabela 16	Relação SSV/SST no lodo desidratado.....	83
Tabela 17	Resultados obtidos para as variáveis DBO, N e P na caracterização do lodo da ETE Vila da Barca.....	84
Tabela 18	Apresentação da caracterização para balanço de massa do desaguamento.....	85
Tabela 19	Série de variáveis estudadas nesta pesquisa para a caracterização do lodo e formulação dos gráficos estatísticos.....	87

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AWWA	American Public Health Association
APHA	American Water Works Association
BFs	Biofiltro Aerado Submerso
CF	Coliformes Fecais
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COSANPA	Companhia de Saneamento do Pará
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBO _{Filtrada}	Demanda Bioquímica de Oxigênio filtrada
DP	Desvio Padrão
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DQO _{Filtrada}	Demanda Química de Oxigênio filtrada
DS	Decantador Secundário
EEE	Estação Elevatória de Esgoto
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEOTÊXTIL	Material em PEAD usado para desidratação do lodo
HCA	Hierarchical cluster analysis - Análise de agrupamento hierárquico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEC	Instituto Evandro Chagas
LAMAG	Laboratório Multiusuário de Tratabilidade de Águas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ML	Massa do lodo
MO	Matéria Orgânica
NPM	Número Mais Provável
PAC	PolyAluminium Chloride - Policloreto de Alumínio
PCA	Partial Components Analysis - Análise das Componentes Principais
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
SEHAB	Secretaria de Habitação do Município de Belém
ST	Sólidos totais
STF	Sólidos totais Fixos
STV	Sólidos totais Voláteis

SS	Sólidos Suspensos
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SSV	Sólidos suspensos Voláteis
SST	Sólidos Suspensos Totais
SD	Sólidos Dissolvidos
UBDL	Unidade de bancada de tratamento de lodo
UASB	Upflow Anaerobic Sludge - Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo
USEPA	United State Environmental protection Agency

LISTA DE SÍMBOLOS E FÓRMULAS

α	Alfa
Al	Alumínio
As	Arsênio
Ba	Bário
Ca	Cálcio
C	Carbono
°C	Grau célsius
Cd	Cádmio
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Ferro
G	Gramas
H	Hidrogênio
H ⁺	Íon Hidrogênio
HNO ₃	Ácido Nítrico
Hg	Mercúrio
K	Potássio
Kg	Kilograma
m ²	Metro Quadrado
m ³	Metro Cúbico
L	Litro
L/s	Litros por segundo
>	Maior
<	Menor
≥	Maior ou igual
≤	Menor ou igual
±	Mais ou menos
Mn	Manganês
Mg	Miligrama
N	Nitrogênio
n°	Número

Na	Sódio
N-NH ₃	Nitrogênio Amoniacal
N-NO ₂	Nitrogênio Nitrito
N-NO ₃	Nitrogênio Nitrato
O ₂	Gás Oxigênio
P	Fósforo
P-v	P- valor
Pb	Chumbo
Ph	Potencial Hidrogeniônico
Q	Vazão
%	Percentual
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	GERAL.....	21
2.2	ESPECÍFICOS.....	21
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1	LODO DE ETE.....	22
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS DE ETE.....	24
3.3	TRATAMENTO DO LODO DE ETE.....	26
3.4	DESIDRATAÇÃO DO LODO DE ETE.....	29
3.4.1	Polímeros.....	31
3.4.2	Métodos de desidratação do lodo de ETE.....	32
3.4.3	Geomembrana (geotêxtil).....	35
3.5	RESOLUÇÕES CONAMA 375/380 de 2006 e 430 de 2011.....	38
3.6	EXPERIÊNCIAS NO BRASIL.....	40
3.7	BALANÇO DE MASSA.....	41
3.8	ESTATÍSTICA - MÉTODO DAS MULTIVARIADAS.....	42
3.8.1	Análise Multivariada.....	42
3.8.2	Matriz de dados.....	42
3.8.3	Padronização e escalamento.....	42
3.8.4	Medidas de similaridade e dissimilaridade.....	43
3.8.5	Análise de componentes principais (PCA).....	43
3.8.6	Análise Hierárquica de Agrupamentos (HCA).....	44
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45

4.1	DESCRIÇÃO DA ETE VILA DA BARCA.....	46
4.1.1	Localização.....	46
4.1.2	ETE Vila da Barca.....	48
4.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	49
4.2.1	Descrição da Unidade de Bancada de Desaguamento do Lodo (UBDL).....	49
4.3	CARACTERÍSTICAS DO GEOTÊXTIL.....	50
4.3.1	Especificações do geotêxtil.....	50
4.4	CARACTERIZAÇÃO E CONDICIONAMENTO DO LODO.....	53
4.4.1	Caracterização do lodo e preparo das concentrações de coagulante e floculante para o desaguamento.....	53
4.4.2	Testes para a escolha do polímero.....	55
4.4.3	Ensaio de desaguamento.....	57
4.5	FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	60
4.5.1	Balço de massa e Análise estatística.....	60
4.6	ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO FILTRADO.....	63
4.6.1	Índice de Langelier (IL).....	63
4.6.2	Índice de qualidade do filtrado (IQF).....	64
4.6.3	Taxa de filtração (TF).....	66
4.6.4	Relação $DQO_{filtrada} / DQO_{não\ filtrada}$.....	67
4.6.5	Relação DQO/DBO.....	67
4.6.6	Relação DQO/COT.....	68
4.6.7	Relação SST/ST.....	68
4.6.8	Relação SSV/SST.....	69
4.6.9	Relação DBO:N:P.....	69

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO LODO BRUTO.....	70
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO LODO DESIDRATADO EM GEOTÊXTIL.....	74
5.2.1	Índice de Langelier (IL).....	74
5.2.2	índice de qualidade do filtrado (IQF).....	75
5.2.3	Taxa de filtração (TF).....	78
5.2.4	Relação $DQO_{filtrada}/DQO_{não\ filtrada}$	79
5.2.5	Relação DQO/DBO.....	79
5.2.6	Relação DQO/COT.....	81
5.2.7	Relação SST/ST.....	81
5.2.8	Relação SSV/SST.....	82
5.2.9	Relação DBO:N:P.....	83
5.3	BALANÇO DE MASSA.....	85
5.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA: HCA E PCA.....	86
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	92
	REFERÊNCIAS.....	93
	ANEXO A: PROCEDIMENTOS DAS ANÁLISES LABORATORIAIS REALIZADAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

O lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é descrito por Dores-Silva, Landgraf e Rezende (2011) como um produto rico em matéria orgânica, constituindo fonte de nutrientes para solos agricultáveis e que cujo tratamento oferece uma solução razoável e ambientalmente adequada para o destino final do lodo.

O aproveitamento de lodo de estações de tratamento anaeróbio, por exemplo, segundo estudo de Paulino, Castro e Thomaz-Soccol (2001) necessita de novos tratamentos de higienização para o reúso na agricultura ou para outros fins visando reduzir o risco à saúde humana e animal.

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, a maior parte do lodo gerado em ETEs é lançada em lugares inadequados como rios, lagos, rede de drenagem, entre outros, aumentando a possibilidade de contaminação destes ambientes.

De acordo com dados do IBGE (2008), mais de 5000 distritos brasileiros possuem alguma forma de destinação do lodo, com destaque para o lançamento em aterros sanitários. Este fato aumenta as perspectivas positivas para o setor de saneamento, que incluindo o tratamento de lodo como etapa essencial nos processos de tratamento de esgotos, possibilitará o destino final sem maiores prejuízos ao corpo receptor ou ao local de despejo.

A destinação final adequada de lodo vem possibilitando o aprimoramento de técnicas nas fases de tratamento que facilitam a promoção da saúde pública e o destino ambientalmente correto e economicamente viável. Uma destas fases é a desidratação. Para Lodi (2003), a desidratação se baseia na secagem do material que sobrou do processo de tratamento do esgoto com quantidade excedente de água. Zerlottin (2013) descreve o lodo desidratado e seco como material mais fácil para ser destinado a aterros ou a outro espaço adequado.

O tratamento do esgoto e os processos de estabilização de lodo geram um material com alto teor de umidade, tornando necessária sua desidratação para posterior deposição em locais adequados. Dentre os processos disponíveis para a desidratação do lodo, o uso de geotêxtil se destaca por proporcionar uma série de benefícios técnicos, operacionais e econômicos.

Segundo Miki *et al.* (2006) o papel da geomembrana na higienização e secagem do lodo é reduzir o seu volume, operar com pequenos ou grandes volumes deste material, diminuir o espaço de armazenamento, possibilitar o reaproveitamento

dos sólidos, controlar a utilização de produtos químicos, reduzir o consumo de energia elétrica, diminuir a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) entre outros.

O estudo tem como objetivo principal avaliar o uso de geotêxtil no processo de desaguamento do lodo da ETE da Vila da Barca. Na cidade de Belém, a prática de desaguamento de lodo ainda é pouco desenvolvida visto que técnicas mais recentes estão sendo difundidas pelo mundo.

A utilização do geotêxtil para a desidratação do lodo da ETE Vila da Barca que faz parte de um projeto habitacional da prefeitura é uma excelente oportunidade para testar este material que possui alta resistência, requer menor área para sua implantação, não necessita de mão-de-obra especializada além da manutenção ser realizada de maneira simples.

Dessa forma, fica constatada a necessidade da realização de estudos com este enfoque, na Região Metropolitana de Belém (RMB), de forma a se caminhar para a utilização de um modelo completo de unidade de gerenciamento de lodo.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar o grau de desidratação do lodo da ETE Vila da Barca, com o uso de geotêxtil.

2.2 ESPECÍFICOS

- Testar o melhor polímero para o condicionamento do lodo;
- Determinar condição otimizada de dosagens de produtos químicos para o desaguamento;
- Caracterizar o lodo da ETE Vila da Barca;
- Analisar a qualidade do filtrado a partir da elaboração de IQF;
- Verificar a taxa de filtração no geotêxtil do lodo condicionado;
- Verificar a qualidade físico-química do filtrado;
- Realizar balanço de massa no lodo desidratado (torta);

3 REVISÃO DE LITERATURA

Todo material orgânico lançado no meio ambiente é decomposto por um aglomerado de micro-organismos capazes de transformar essa matéria em produto reaproveitável pela natureza. Nos sistemas de tratamento de esgotos o princípio de funcionamento é o mesmo que acontece na natureza, porém em um menor tempo e espaço além de gerar um subproduto que sai das ETEs com descarte sem a merecida atenção pelos seus produtores.

Material que é denominado de lodo, passa a ter significância, ambiental e de saúde pública, a partir do momento que grande quantidade é despejada desordenadamente em lugar impróprio como em “aterros sanitários não projetados para este fim, lançamento em grande quantidade em rios e oceanos, incineração entre outros” (HAN *et al.*, 2012, p.10565).

3.1 LODO DE ETE

O surgimento de pontos de lançamento de esgoto sanitário em locais inadequados, como cursos d'água, aponta à necessidade de um tratamento eficiente desse material. A utilização das ETEs vem sendo a opção para a minimização deste problema. Tratar um esgoto significa torná-lo com características apropriadas e aceitáveis para o seu retorno saudável ao meio ambiente.

Durante o tratamento do esgoto é gerado um “resíduo semissólido, pastoso e de natureza predominantemente orgânica, chamado de lodo de esgoto” (ANDREOLI *et al.*, 2001, p. 21). Este resíduo necessita de um tratamento adequado visto que “o lodo de esgoto não só é um poluente que exige ser eliminado sem causar danos, mas é também uma biomassa molhada permitindo-nos ganhar alguns recursos” (XU *et al.*, 2013, p.1850).

No entanto, de acordo com Uggetti *et al.* (2011) a geração excessiva de lodo é uma das principais preocupações no tratamento de esgotos por necessitar de operações complexas e com custos elevados.

Van Haandel e Alem Sobrinho (2006) mostram que o lodo produzido em ETEs pode apresentar três aspectos indesejáveis, como: a) instabilidade biológica (se a fração biodegradável estiver em grande quantidade na massa orgânica do lodo, este se torna putrescível); b) a péssima qualidade higiênica do lodo gerado com presença de vírus, bactérias e parasitas que constituem ameaça para a saúde humana; e c) a baixa concentração de sólidos suspensos no lodo, de forma a produzir grande volume deste material.

A destinação do lodo residual das ETEs é um grande problema ambiental para as empresas, públicas ou privadas, de saneamento. Metcalf & Eddy (2003) enfatizam que muitas vezes o lodo é desconsiderado nos processos de tratamento de esgoto, quando na verdade deveria ser uma etapa fundamental de finalização para um sistema de tratamento tornar-se completo, de maneira que o resíduo final satisfaça os padrões estabelecidos em legislação. Andreoli *et al.* (2001) evidenciam que o destino final do lodo é uma atividade de grande importância e complexidade, pois frequentemente ultrapassa os limites das estações de tratamento e exige a contribuição e participação dos demais setores da sociedade.

Tsutiya (2001) mostra que, entre os produtos gerados no tratamento de esgotos, o lodo é considerado o mais importante devido ao grande volume gerado, complexidade de sua constituição química, física e bacteriológica e do seu gerenciamento, além da elevada concentração de poluentes, carecendo de um estudo particular de caracterização a fim de que possa ser estabelecido o melhor método de tratamento e destinação correta.

Conhecidas a quantidade e as características do lodo bem como a alternativa de tratamento de esgotos adotada, as ferramentas de gestão destes resíduos são definidas pela qualidade dos esgotos e devem ser previstas já na fase de concepção do sistema. Esta é uma forma de evitar os transtornos e diminuir os impactos ambientais negativos provocados pela ausência de planejamento e de estratégia para o uso e a disposição do lodo

Na pesquisa sobre processamento, reciclagem e disposição final de lodo, Andreoli *et al.* (2001) constataram que a maior parte das ETEs em funcionamento no Brasil foi concebida sem os requisitos necessários para garantir uma disposição final segura e adequada dos subprodutos gerados. Comumente são ambientes que recebem esse material para uma secagem simples, sem, no entanto determinar qual será o destino final do material já desidratado.

Cai *et al.* (2013) estudaram a variação do teor de umidade em resíduos de ETE para aproveitamento em compostagem e chegaram a conclusão de que a temperatura relacionada à condutividade, medida a partir de sonda de reflectometria, deve ser levada em consideração uma vez que, para as várias faixas de temperatura analisadas, houve alterações significativas no teor de umidade.

Uma das maneiras de estabilização do lodo para posterior destinação é o processo de humificação realizado pelas minhocas, gerando um vermicomposto. Dores-Silva, Landgraf e Rezende (2011) mostraram que a vermicompostagem tem resultado eficiente para ser utilizada como técnica de estabilização do lodo de esgoto doméstico, permitindo a utilização do mesmo na reciclagem agrícola. Esta é uma descoberta importante na área do saneamento

que consegue aproveitar do próprio meio ambiente, seres (minhocas) capazes de sintetizar o lodo fresco, diminuindo os custos de estabilização com condições sanitárias e ambientais adequadas para o reúso e disposição final.

O aproveitamento de lodo na agricultura é uma técnica de substancial importância para a disposição deste material. No entanto, as fases anteriores a essa disposição são essenciais para a configuração de um material com características favoráveis a essa prática. A desidratação, ou desaguamento, configura uma dessas fases importantes, por isso a necessidade de cuidados e estudos aprofundados sobre as características do lodo é fundamental, uma vez que “a capacidade de desidratação depende do tipo de lodo” (ANDREOLI *et al.*, 2001, p.57). Ou seja, de acordo com o afluente da ETE e de qual o tratamento utilizado no esgoto será produzido um tipo de lodo cujas características devem ser investigadas.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS DE ETE

Nos processos convencionais de tratamento de esgoto, o lodo possui uma classificação de acordo com o grau de tratamento a que foram submetidos. Desta forma são classificados em lodos primários, secundários ou terciários (químicos). A *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) (1995) cita os tópicos: a) quantidade produzida; b) sólidos totais (ST); c) sólidos voláteis (SV); c) pH; d) matéria orgânica (MO); e) micro-organismos patogênicos; f) nutrientes; g) e metais compostos orgânicos tóxicos, como as principais propriedades que devem ser estudadas no lodo.

Para Metcalf & Eddy (2003), o conhecimento da composição química do lodo é fundamental devido a escolha do local de destinação final depender diretamente desta constituição.

A digestão anaeróbia dos esgotos pode ser considerada como um “ecossistema onde diversos grupos de micro-organismos degradam a matéria orgânica complexa com produção de metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células” (CHERNICHARO, 2007, p. 17). Yoo *et al.* (2012) afirmam que este tipo de tratamento além de produzir uma fonte renovável de bioenergia, consome menos energia e produz menos resíduos do que nos tratamentos aeróbios, reduzindo assim os custos e as dificuldades de gestão dos subprodutos.

Mesmo que o processo total do tratamento anaeróbio produza menores quantidades de resíduos, esta parcela não deixa de ter importância quanto à qualidade final do produto. Este

tipo de digestão, como relatam Andreoli *et al.* (2003) e Chong *et al.* (2012) apresenta vantagens significativas por apresentar menores custos de implantação e operação, produzir o biogás (fonte rica de energia combustível) e facilidade operacional.

Andreoli *et al.* (2001) explicam que dos sistemas de tratamento de esgoto, as lagoas de estabilização são as que geram menor acúmulo de lodo. A razão é que o lodo produzido fica retido vários anos, sofrendo digestão e adensamento (diminuição de umidade), reduzindo assim seu volume.

Os sistemas anaeróbios, como apontam os estudos de Metcalf & Eddy (2003), geralmente possuem uma baixa produção de lodo, sendo este parcialmente estabilizado, sendo assim um sistema vantajoso para a produção e disposição final do lodo. Como sistemas de tratamento anaeróbio, podem ser citados o Reator UASB e o Filtro Anaeróbio.

No metabolismo aeróbio, ocorre cerca de 40 a 50% de degradação biológica da matéria orgânica, o que explica o grande volume de lodo dentro do reator precisando descartar o excesso nos sistemas de Lodos Ativados (LA).

“A composição e a produção de lodo em sistemas aeróbios dependem do material orgânico contido no afluente da estação de tratamento e das condições operacionais no sistema” (VAN HAANDEL e ALEM SOBRINHO, 2006, p. 17). A principal característica dos sistemas de tratamento aeróbio é a disponibilidade de oxigênio para a permanência, desenvolvimento e o crescimento das bactérias decompositoras de matéria orgânica.

Liu *et al.* (2012) enfatizam que a disponibilidade de oxigênio dissolvido (OD) é de suma importância para a transferência de oxigênio na massa líquida do esgoto, uma vez que este possibilita a digestão dos contaminantes.

O estudo de Chernicharo (2007) sobre digestão anaeróbia verifica uma enorme incorporação de matéria orgânica, como biomassa microbiana (cerca de 50 a 60%), que vem a se constituir no lodo excedente do sistema. O material orgânico não convertido em gás carbônico, ou em biomassa, deixa o reator como material não degradado (5 a 10%).

Com relação às características do lodo produzido nos sistemas apresentados, cada um possui particularidades permitindo que se estabeleça previamente o tipo de técnica e métodos a serem adotados para que ao final o objetivo do tratamento seja alcançado. A Tabela 1 mostra um resumo das principais características do lodo produzido em ETEs.

Tabela 1 – Principais características de lodo produzido nas estações de tratamento de esgoto

TIPOS DE SISTEMAS	V LODO PRODUZIDO (L/hab.d)	PRODUÇÃO DE LODO (gSS/hab.d)	CONC. ST LODO (%)	ESTABILIDADE
Lagoas facultativas	0,05 - 0,15	20-25	10-20	Necessita Estabilização
Reator UASB	0,2 - 0,6	7-18	3-6	Estabilizado
Lodos ativados convencionais	3,1 - 8,2	35-40	~20	Necessita Estabilização
Lodos ativados de Aeração prolongada	3,3 - 5,6	38-45	0,8-1,2	Estabilizado
Lagoa anaeróbia	0,1 - 0,3	13-45	15-20	Estabilizado
Filtro biológico de alta carga	1,4 - 5,2	20-30	1-3	Necessita Estabilização

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (2003); Além Sobrinho (2001) e Von Sperling (2001)

Mesmo que esta caracterização sirva como base para melhorar os aspectos desejados do lodo no controle da disposição final, a pesquisa de Andreoli *et al.* (2001) demonstra que a maioria das estações de tratamento de esgotos em operação no país foi concebida sem as condições ou equipamentos necessários para um bom monitoramento quanti-qualitativo dos subprodutos.

3.3 TRATAMENTO DO LODO DE ETE

Os métodos para a retirada do excesso de umidade, bem como, do aumento da concentração de sólidos na mistura (lodo seco) vêm sendo aprimorados com procedimentos e matérias-primas menos caras e mais sustentáveis, como por exemplo, o desaguamento natural que “são dependentes do clima, aspecto que favorece sua adoção em regiões quentes e secas” (ANDREOLI *et al.*, 2003, p. 6), possibilitando a escolha de tecnologias de tratamento de esgotos que, além de produzir menor quantidade de resíduos, utilizam fontes de energia alternativa (biogás e solar) para a desidratação e higienização do lodo.

A busca de alternativas para diminuir a quantidade de lodo é constante e exaustiva. Normalmente o lodo passa por etapas de tratamento que ao final garantem uma quantidade mínima desejada tanto para o aumento da eficiência da ETE como para uma destinação segura. As etapas de tratamento do lodo que garantem características desejáveis para uma destinação segura são o adensamento, a estabilização, o condicionamento, a desidratação, a higienização.

O adensamento é uma etapa que visa “diminuir a quantidade de água dos resíduos por meios físicos” (DAVID, 2002, p. 9), para assim reduzir o volume nas unidades posteriores do tratamento gerando um “lodo concentrado” (LUPATINI *et al.*, 2009, p. 115). Como vantagem apresenta a diminuição do consumo de produtos químicos e de energia na fase do desaguamento. Os tipos de adensamento são: por gravidade, flotação, ar difuso, centrífuga, adensador de esteira e tambor rotativo.

A estabilização tem como objetivo reduzir a quantidade de patógenos, eliminar os maus odores e inibir, diminuir ou dificultar o potencial de putrefação do lodo (VON SPERLING *et al.*, 2001).

A estabilização é realizada por meio da redução biológica do conteúdo de sólidos voláteis, da oxidação química da matéria orgânica, da adição de produtos químicos para impedir que os organismos sobrevivam e do uso de calor para desinfetar ou esterilizar.

Tsutiya (2001) revela que há muito são utilizados produtos químicos na estabilização de lodo (normalmente a cal virgem), porém altera substancialmente suas características físico-química com elevação da temperatura, pH e a concentração de amônia. Este produto depois de ser estabilizado (após desidratação e desinfecção) passa a ser denominado biossólido. Caso isso não aconteça, a denominação dada é lodo, torta ou apenas sólidos.

Uma facilitação para a diminuição da porcentagem de água no lodo é o condicionamento, que “é um processo utilizado para melhorar as características de separação das fases sólido-líquida do lodo. É realizado através de meios físicos ou químicos” (VAN HAANDEL e ALEM SOBRINHO, 2006, p. 43).

O condicionamento é um processo composto por uma etapa de coagulação e outra de floculação. A coagulação tem por objetivo “desestabilizar as partículas por meio da diminuição das forças eletrostáticas de repulsão. Isto ocorre por intermédio da compressão da dupla camada elétrica que envolve superficialmente cada partícula” (GONÇALVES *et al.*, 2001, p. 58), facilitando sua aproximação. A floculação permite a aglomeração dos colóides e dos sólidos finos por meio de baixos gradientes de agitação. O tratamento químico consiste na adição de sais de alumínio e ferro ou polímeros orgânicos junto ao lodo (BITTON, 2001), ocorrendo então a “desestabilização das partículas do lodo com formação de flocos com dimensões maiores” (MIKI *et al.*, 2006, p. 41).

Desidratação é a etapa na qual é feita a remoção da umidade do lodo, com o uso de equipamentos tais como: centrífuga, filtro prensa ou *beltpress* entre outros, existindo ainda a maneira natural para desaguar que comumente são os leitos de secagens.

De acordo com Nielsen e Willoughby (2005), leito de secagem não convencional com plantas tem sido utilizado para desidratação (drenagem e evapotranspiração) e mineralização de lodo na Dinamarca desde 1988, quando o primeiro sistema de tratamento de lodo foi implantado.

O funcionamento deste tipo de sistema ocorre basicamente na saída da ETE, quando o lodo é bombeado para a superfície de cada leito de secagem. Sobre essa superfície, o lodo se acumula e a água é drenada pelo fundo do leito. As plantas são fundamentais para melhorar a eficiência do sistema e reduzir o volume de lodo. Estas contribuem para a desidratação do lodo devido à evapotranspiração e por melhorar a capacidade de filtração do lodo desidratado.

O movimento das plantas com o vento faz com que apareçam aberturas no lodo, melhorando a oxigenação. A aeração do leito por meio de fissuras na superfície do lodo e da liberação de oxigênio pelas raízes das plantas permite que micro-organismos aeróbios se desenvolvam próximos as raízes e no próprio lodo, auxiliando a mineralização deste. É, portanto, uma boa alternativa para a otimização dos custos no uso de leitos de secagem, como comprova a pesquisa de Calheiros et.al (2011, p.34) que enfatizam como vantagens a “redução do volume de lodo sem a adição de produtos químicos e com baixo consumo de energia”.

Todavia, na concepção de Uggetti *et al.* (2010), há carência de critérios de projeto e configurações padronizadas em relação aos leitos de secagem cultivados. Estes afirmam que mais pesquisas são necessárias para melhorar o conhecimento sobre o projeto e a gestão dos leitos, a fim de aumentar a eficiência do tratamento. Fato que não diminui a importância deste método como mais uma alternativa para melhorar a qualidade final do lodo.

Entre as etapas de tratamento da fase sólida nas ETEs, “o condicionamento e o desaguamento ocupam lugar de destaque” (VAN HAANDEL e ALEM SOBRINHO, 2006, p. 49).

Suntti, Magri e Philippi (2011) apresentaram as eficiências, em escala piloto, de dois filtros preenchidos com macrófitas e puderam verificar uma nova alternativa para o tratamento de lodos que possuem matéria orgânica instável, alta concentração de umidade e organismos patogênicos, incluindo nesse processo o desaguamento e a mineralização do lodo. Mostraram que quanto maior o tempo de residência do lodo dentro do reator menor a concentração da fração orgânica (SV/ST) de sólidos em relação à fração inorgânica, o que significa que grande parte da matéria orgânica do lodo já estava estabilizada e, portanto facilitaria a desidratação.

Após a desidratação, a matéria orgânica do lodo, passa por outra etapa, a higienização, para possibilitar um destino sanitário e permitir a reutilização adequada do lodo. Este processo serve para complementar a estabilização do material, objetiva reduzir significativamente a densidade de micro-organismos patogênicos, tornando o produto final seguro para as diferentes aplicações desejadas (PASSAMANI *et al.*, 2002).

Tendo cumprido todas as etapas de tratamento, o lodo é considerado um produto confiável para a disposição final adequada. Essa destinação vem encontrando alternativas de aproveitamento do lodo que antes era despejado de forma indiscriminada.

A destinação para a recuperação de áreas degradadas foi foco de estudo de Andreoli *et al.* (2001) onde a adição dos bio sólidos possibilita o estabelecimento de uma estrutura de solo que promove uma melhor circulação do ar e da água e facilita a proliferação da microflora do solo, liberando nutrientes essenciais à vegetação e aos micro-organismos. “A aplicação dos bio sólidos nestas áreas tornam o solo mais apto à fixação de plantas acelerando o processo de recuperação destas áreas” (MACHADO, 2001, p. 94).

Luduvica *et al.* (2001) apontam que o potencial agrônomo do lodo é válido e deve ser usufruído de maneira correta e cuidadosa sem que haja danos ao meio ambiente, à saúde pública e prejuízos financeiros ao produtor.

A taxa de crescimento nos plantios com a aplicação de lodo de esgoto é maior e mais duradoura se comparada à fertilização mineral, apresentando um novo desenho do aproveitamento dos resíduos oriundos de tratamento de esgoto doméstico.

Com relação à utilização de lodo na agricultura, Poggiani *et al.* (2006) alertam para o fato de que mesmo o reúso do lodo sendo uma alternativa viável e promissora, isto aconteceria nas aplicações em plantações florestais, desde que seja apenas implantado na produção de madeira para não correr o risco de afetar a saúde humana.

3.4 DESIDRATAÇÃO DO LODO DE ETE

O tratamento da fase líquida do esgoto e os processos de estabilização do lodo geram um material com alto teor de umidade, necessitando de desidratação. “O lodo digerido, geralmente, atinge teores de umidade em torno de 96%, ou seja, 4% de teor de sólidos” (MACHADO, 2001, p. 56).

A capacidade de desidratação varia com o tipo de lodo, e isso é uma contribuição para o aprimoramento da caracterização deste resíduo. Gonçalves *et al.* (2001) mencionam que os principais ganhos com a prática da desidratação são: a) a redução do custo com transporte do

material até a destinação final; b) a melhoria nas condições de manejo do lodo, haja vista a maior facilidade em transportá-lo depois do desague; c) o aumento do poder calorífico do lodo por meio da redução da umidade; d) e a redução do volume para disposição em aterro sanitário, reúso na agricultura ou a outro fim que couber.

A desidratação é necessária, porém devido à natureza gelatinosa do lodo, sólido quando está em repouso e líquido quando sofre alguma agitação (FERRANTI, 2005), seu desaguamento é muito difícil, por isso a escolha do método de desidratação é uma etapa que deve ser cautelosamente estudada.

O lodo de descarte, dado ao seu elevado grau de estabilização, pode ser encaminhado sem qualquer tipo de tratamento prévio às unidades de secagem, pois “possui facilidade de desidratação e, geralmente, reduzido volume, em razão de sua alta concentração” (SOARES *et al.*, 2001, p. 314).

A seleção do processo de desidratação depende do tipo de lodo e da área disponível para a implantação deste sistema. Para ETEs de pequeno porte localizadas em regiões onde não há restrição quanto à área, processos naturais como leitos de secagem são considerados a melhor alternativa. Da mesma forma, ETEs de médio e grande porte situadas nas grandes cidades utilizam a desidratação mecânica. Os principais métodos utilizados para a desidratação em nosso país são os leitos de secagem, lagoas de lodo, centrífugas, prensas desaguadoras e filtros prensas.

Para a otimização da etapa de desidratação, muitas vezes, é utilizada a etapa de condicionamento como forma de fornecer características favoráveis ao lodo para uma desidratação eficaz. O condicionamento de acordo com Gonçalves *et al.* (2001), pode ser realizado com o uso de produtos químicos ou processos físicos, dentre os quais o mais comum é o aquecimento do lodo.

Lodos ativados ou lodos mistos (lodo primário + lodo ativado) de descarte dificilmente podem ser “concentrados à teores de sólidos superiores a 4% ou 6% de ST sem a utilização de condicionadores” (GONÇALVES *et al.*, 2001, p. 58). Geralmente são usados os polieletrólitos catiônicos que promovem a floculação e melhoram a clarificação e as características do escoamento da fase líquida.

O tipo de condicionamento influencia diretamente na eficiência dos processos de desidratação, e deve ser adaptado a cada tipo de lodo, em função da sua composição físico-química e estrutural além do método de desidratação a ser utilizado (SOARES *et al.*, 2001). Por isso, a seleção do tipo de condicionamento que será usado deve se basear em critérios de custos de capital, operação e manutenção do sistema como um todo.

Os principais coagulantes utilizados são os sais metálicos, a cal e os polímeros orgânicos (polieletrólitos). Os coagulantes inorgânicos mais comuns são o sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato ferroso, sulfato férrico, cal virgem/hidratada, sendo os mais utilizados o cloreto férrico e a cal.

3.4.1 Polímeros

Os polímeros, na descrição de Gonçalves (2001), são compostos de origem orgânica, sintéticos, de alto peso molecular, que podem ser usados como coagulantes ou no auxílio da floculação. Dependendo da carga superficial predominante, os polímeros são classificados em catiônicos, aniônicos e não-iônicos.

Os polímeros podem ser naturais (amidos) ou sintéticos, sendo classificados também segundo a carga elétrica que possuem em sua solução líquida (catiônicos, aniônicos e não iônicos), sua densidade de carga elétrica (baixa, média e alta) ou ainda de acordo com seu peso molecular (baixo, médio, alto, muito alto). “Para melhorar a desidratabilidade dos lodos, geralmente se aplica apenas um tipo de polímero” (GUIMARÃES, 2007, p. 25).

O sistema de preparo de polímero, como explicam Silva e Segato (2002), tem por finalidade produzir, através de equipamentos microprocessados, a concentração necessária da solução de polímero para ser adicionada ao lodo digerido que alimenta o sistema de desidratação.

A pesquisa de Miki e Alem Sobrinho (2000) comprovou que a utilização de polímeros permitiu trabalharem taxas iniciais de filtração mais altas, resultando num tempo de filtração em torno de 120 minutos, conseguindo-se trabalhar com tempos de ciclo mais curtos. As análises de Miki *et al.* (2006) provaram que a utilização de polímeros na etapa de condicionamento de lodo possibilitou a produção de tortas com teor de sólidos superior a 30%, com a aplicação de dosagem de polímero e cloreto férrico de 4,8 kg/t e 63 kg/t, respectivamente (dosagens em relação à massa seca original de lodo). Com base em tais resultados, estimou-se que a utilização desse tipo de condicionamento poderia resultar em significativa redução dos custos operacionais referentes ao consumo de produtos químicos e transporte do lodo.

Alguns polímeros catiônicos comercializados têm alto poder de floculação, sendo utilizados em vários pontos de um processo de clarificação de água e efluentes. Têm-se polímeros específicos para desidratação do lodo, sendo amplamente utilizado em prensas desaguadoras, filtro prensa e centrifugas (MIKI *et al.*, 2006). Estes polímeros são utilizados

com grande sucesso na operação de remoção de lodo de sistemas de tratamento secundário, tendo possibilitado grandes aumentos na eficiência de remoção de sólidos dos decantadores secundários de um tratamento biológico. Suas aplicações são em sistemas de desidratação de lodo, sedimentadores e decantadores, eliminação de metais no tratamento de água e efluentes e em flotadores. As vantagens deste tipo de polímeros relaciona-se com a alta performance na forma de pó ou em emulsão e a otimização nas dosagens.

Os polímeros aniônicos têm alto poder de floculação, sendo utilizados em vários pontos de um processo de clarificação de água e efluentes, principalmente em lodos químicos (VON SPERLING *et al.*, 2001).

Têm-se polímeros específicos para remoção de sólidos oriundos de sistemas de corte, como rochas e granito, sendo amplamente comercializados em sistemas para remoção de metais pesados. Este tipo de polímero é utilizado com sucesso na operação de remoção de lodo inorgânico de sistemas de tratamento primário com grande taxa de remoção de sólidos dos decantadores, nos sistemas de galvanoplastia, sedimentadores e decantadores, eliminação de sólidos e sujeira no tratamento de água em conjunto com coagulantes inorgânicos.

Os polímeros não iônicos tem alto poder de floculação tornando-os essenciais em vários pontos de um processo de clarificação de água e efluentes (MIKI *et al.*, 2006). Também são amplamente comercializados em sistemas para neutralização parcial ou total de particulados em operações de filtração, na operação de remoção de lodo inorgânico de sistemas de tratamento primário, obtendo grandes aumentos na eficiência de remoção de sólidos dos decantadores, em sistemas de tratamento de água para consumo humano, sedimentadores, trabalha em conjunto com polieletrólitos catiônicos em estações de tratamento de efluentes, entre outros.

3.4.2 Métodos de desidratação do lodo de ETE

A seleção do polímero e a conclusão da etapa de condicionamento tornam o lodo apto a passar para a próxima etapa de tratamento, a desidratação. A desidratação para Ferreira e Andreoli (1999) é de suma importância caso necessite de continuação do tratamento e ainda da diminuição de volume para facilitar o transporte e a destinação final do lodo. Os meios naturais para que o lodo seja desaguado, tais como leitos de secagem e lagoas de lodo, tem baixo custo, porém ocupam grandes áreas. O princípio é basicamente o escoamento da água livre, com a participação da evaporação da água para gerar uma torta de lodo com elevados

teores de sólidos totais (WANKE e GONÇALVES, 2011). São vários os métodos empregados para a diminuição do volume de lodo, entre os quais:

a) Leitos de secagem

É a prática mais utilizada de desidratação atualmente. Os leitos de secagem têm sido implantados para a remoção de água do lodo. A configuração tradicional do leito de secagem (camada suporte, material de filtração e sistema drenante) vem sendo atualizada com o uso de novas tecnologias e matérias primas.

Calheiros *et al.* (2011) constataram que a utilização de leitos de secagem com o cultivo de camomila possui um alto desempenho para a desidratação de lodo de esgoto doméstico, com um alto grau de desaguamento.

A possibilidade de mudança no arranjo tradicional levou Cordeiro (2001) a estudar a eficiência da desidratação em leitos de secagem com uso de uma camada de geotêxtil acima da camada filtrante do leito, o chamado leito modificado, e constatou que o uso de uma camada de brita em baixo da manta geotêxtil é mais eficiente que a configuração com brita, areia e camada geotêxtil. Isso porque o tempo de drenagem do líquido diminui com a retirada da camada de areia.

O lodo removido apresenta teor de sólidos que varia de 40 a 75% de acordo com o clima e o período de secagem (LUDUVICE *et al.*, 2001).

Entre as desvantagens deste método estão área requerida, a exigência de estabilização prévia do lodo, a influência significativa do clima no desempenho operacional do processo, a retirada da torta seca é um processo lento e requer muita mão-de-obra, o risco elevado de liberação de odores desagradáveis e proliferação de moscas, o risco de contaminação do lençol freático caso o fundo dos leitos e o sistema de drenagem não sejam bem executados.

b) Centrífugas

São equipamentos que se destinam à desidratação do lodo, separando os sólidos da água por diferença da força centrífuga. São os únicos equipamentos utilizados tanto para o adensamento como para a desidratação de lodo. O princípio de operação da centrífuga permanece o mesmo, sendo comum a instalação de centrífugas em série, a primeira para o adensamento do lodo e a segunda para desidratação. Von Sperling, Fernandes e Andreoli

(2001) apresentaram uma concentração para os sólidos afluentes à centrífuga nos valores de 3% a 5% e a concentração de sólidos no lodo desidratado entre 20% a 30%.

A eficiência da centrífuga na remoção de umidade está intimamente ligada à concentração de sólidos voláteis no lodo. Quanto maior for o grau de estabilização do lodo a ser desaguado, melhor será o desempenho da centrífuga.

Quanto às vantagens citadas por Ludovice *et al.* (2001) da desidratação por centrífuga podem ser citadas a ocupação de áreas de até 40 m², a facilidade de instalação, elevada carga aplicada, pouca utilização de coagulantes e pouca atenção dos operadores. Ruídos e vibrações, desgaste da rosca transportadora, ajustes iniciais complexos e o elevado consumo de energia configuram entre as principais desvantagens deste método.

c) Prensa desaguadora

O processo de operação da prensa desaguadora pode ser dividido em três etapas: zona de peneiramento, zona de baixa pressão e zona de alta pressão (GONÇALVES *et al.*, 2001). A zona de separação por simples peneiramento localiza-se na entrada da prensa, onde o lodo é aplicado sobre a tela superior e a água livre percola sob ação da gravidade através dos furos existentes na tela. A seguir, o lodo é encaminhado para a zona de baixa pressão, na qual o restante da água livre é removido e o lodo, suavemente comprimido entre as telas superior e inferior. Na zona de alta pressão, formada por vários roletes de diferentes diâmetros em série, o lodo é comprimido progressivamente entre as duas telas com o objetivo de liberar a água intersticial. Finalmente, o lodo desaguado é removido por meio de raspadores e as telas são lavadas com jatos de água a alta pressão. As vantagens dessa técnica como o baixo custo de aquisição e energia, e pequenas áreas para implantação são mencionadas por Ludovice *et al.* (2001). Os mesmos autores apontam o nível de ruído, a produção de aerossol e a presença de um ambiente insalubre como principais desvantagens.

d) Filtro prensa

Os filtros prensas possuem um bom desempenho no desaguamento do lodo, sendo um dos métodos mecânicos de desidratação com maior eficiência na remoção de umidade no lodo. O ciclo de operação do filtro-prensa de acordo com Ludovice *et al.* (2001) varia entre 3 e 5 horas, podendo ser dividido em três etapas básicas: enchimento, filtração sob pressão máxima e descarga de torta.

O peso do equipamento, seu custo de aquisição e a necessidade de substituição regular das telas de filtração fazem com que o uso de filtro prensa seja limitado à ETEs de médio e grande porte. As principais vantagens são a torta com alta concentração de sólidos (35%), superior à dos outros equipamentos mecânicos, elevada captura de sólidos, qualidade do efluente líquido (clarificado), baixo consumo de produtos químicos para condicionamento do lodo.

e) Secagem térmica

A secagem térmica é considerada o principal processo de higienização e serve como método para secagem de lodo. Andreoli *et al.* (2003) explicam que isto se deve à união da alta eficiência de higienização com a redução do volume inicial do lodo provocada pela perda de água. É um método para a diminuição de peso e volume de lodos e conseqüentemente a diminuição dos custos de transporte e disposição final. Sendo assim é caracterizado por David (2002) como um processo para a melhoria da qualidade do lodo transformando este em biossólidos.

Na classificação de Fernandes e Souza (2001, p. 28) “os sistemas de secagem térmica podem ser secadores de contato direto, em que o ar quente fica em contato direto com o lodo, arrastando a umidade, eventuais gases e a poeira; Secadores de contato indireto, em que o calor é transmitido por intermédio de uma placa trocadora de calor, plana ou cilíndrica”.

No entanto, o custo operacional deste sistema é alto se comparado aos outros métodos de desidratação, apresentando como principal desvantagem o alto consumo de combustível para a geração de calor. Para que se obtenha êxito na operação, é necessário o conhecimento da umidade de equilíbrio (teor de umidade limite em dadas condições de temperatura e umidade do ar do ambiente) (DAVID, 2002).

3.4.3 Geomembrana (geotêxtil)

Geomembrana é um material flexível e manufaturado, fabricado a partir de produtos sintéticos ou betuminosos cuja função é possibilitar uma camada impermeável para controlar a percolação e o fluxo de líquidos e em alguns casos, também de gases (VAN SANTVOORT, 1994).

A Associação Brasileira das Indústrias de não tecidos e Tecidos (ABINT) faz uma revisão histórica sobre a utilização mundial de geotêxteis que é apresentada a seguir:

- Anos 50: Aplicações de Geotêxteis como elementos de filtro para proteção anti-erosiva em obras hidráulicas em alguns países;
- Anos 60: Aplicação de geotêxteis como elemento separador e de reforço entre materiais com características mecânicas e físicas diferentes, principalmente em obras viárias. Fato importante nesta década foi o início da utilização dos geotêxteis não tecidos na Europa;
- Anos 70: Aplicações em reforço de grandes aterros e barragens, utilização em camadas múltiplas em taludes e muros de contenção, introdução como elemento prolongador da vida útil de recapeamentos asfálticos e superestruturas ferroviárias; 1971 - iniciou-se a Era dos Geossintéticos no Brasil com a fabricação do primeiro geotêxtil não tecido; 1977 - foi realizado, na França, a International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics, quando o prof.º Jean Pierre Giroud criou e propôs a utilização dos termos Geotêxtil e Geomembrana;
- Anos 80: Utilização dos Geossintéticos na recuperação de áreas poluídas e na construção de obras de contenção e proteção ambiental; 1982 tivemos a II Internacional Conference on Geotextiles nos EUA; 1983 a criação da IGS, então denominada International Society on Geotextiles; 1986 a III International Conference on Geotextiles, na Áustria;
- Anos 90: O impulso gerado pelos estudos teóricos apresentados, de casos históricos e novas aplicações, desencadearia o surgimento de uma multiplicidade de produtos e usos que, ao se combinarem, têm gerado inúmeras novas utilizações importantes; 1995 - o 2º Simpósio Brasileiro sobre Aplicações de Geossintéticos, em São Paulo; 1999 - o 3º Simpósio Brasileiro sobre Geossintéticos / 1º Simpósio Sul-americano de Geossintéticos, foram realizados no Rio de Janeiro.

Segundo Miki *et al.* (2006), o uso de geotêxtil na desidratação de lodo teve origem nos materiais utilizados na construção de diques de contenção na Holanda.

As geomembranas do tipo polietileno de alta densidade (PEAD) são consideradas o produto mais eficaz na prevenção da poluição ambiental, tendo o seu uso exigido pelos órgãos ambientais para diversos tipos de obras. Essa exigência se deve, de acordo com Guimarães (2007), a sua alta resistência à maioria dos produtos químicos, a esforços mecânicos e aos raios ultravioleta.

A geomembrana de PEAD é utilizada em sistemas impermeabilizantes que segundo seus fabricantes, foi desenvolvida para proporcionar maior proteção do meio ambiente e minimizar a penetração dos líquidos e gases, evitando que estes atinjam o solo e as águas

subterrâneas, garantindo a eficiência de sistemas de tratamento do lodo na fase de desidratação, disposição e armazenagem de resíduos agrícolas, agroindustriais e industriais diversos. Na Figura 1, são apresentadas as etapas do processo de desidratação usando geomembrana.

Figura 1 - Etapas da desidratação do lodo em geomembrana. Figuras a, b e c.



Fonte: <http://www.maccaferri.com.br/home>, 2010.

O método de desaguamento por geotêxtil consiste em encher uma grande bolsa de geotêxtil costurado, com capacidade de reter grande quantidade de material. Este quando enchido com material carregado de partículas, libera o líquido retendo o lodo em seu interior (TOMINAGA, 2010). Assim podem-se resumir as etapas de funcionamento do BAG: 1º) fase de confinamento: o lodo devidamente condicionado é bombeado para o interior do tubo; 2º) fase de desaguamento: o lodo condicionado libera a água que passa por meio da membrana geotêxtil e 3º) fase de consolidação: após o preenchimento total do tubo com o lodo condicionado, o tubo permanece em repouso pelo tempo necessário de desidratação, para aumentar o teor de sólidos do lodo no interior do tubo.

Devido às características como capacidade de alongamento de fibras, superior a 200% e a opção de solda ainda em fábrica, os geotêxteis do tipo Policloreto de Vinila (PVC) são instaladas com rapidez e praticidade no local aonde ocorrerá a etapa de desaguamento, o que resulta na queda do custo de mão-de-obra e equipamentos através do ganho de tempo na instalação, permitindo também que o prazo de entrega da obra seja mais rápido (TOMINAGA, 2010).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT-NBR ISO 10318:2013), os geotêxteis são classificados em:

- Geotextil tecido (GTW) é um produto oriundo do entrelaçamento de fios;
 - a. Geotêxtil Tricotado [GTK]: Produto oriundo do entrelaçamento de fios por tricotamento;
- Geotextil não tecido (GTN) é composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos.
 - a. Agulhado [GTNa]: Fibras interligadas mecanicamente, por processo de agulhagem;
 - b. Termoligado [GTNt]: Fibras interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento;
 - c. Resinado [GTNr]: Fibras interligadas por meio de produtos químicos.

Os filtros têxteis são confeccionados seguindo características em função do processo de fabricação, visando não somente a espessura do fio, mas também visando a confiabilidade na retenção de um determinado diâmetro da partícula, sendo a espessura determinada pelo fabricante (Urashima, 2002).

Algumas das vantagens da geomembrana são: a alta capacidade de resistência contra agentes e corrosão química, suportar altas temperaturas, possuir longo tempo de vida útil, facilidade de instalação, flexibilidade, baixa permeabilidade, baixo custo, entre outras.

3.5 RESOLUÇÕES CONAMA 375/380 de 2006 e 430 de 2011

O cuidado com o lodo gerado no tratamento de esgoto representa a concretização dos esforços de trabalhos de pesquisa ao longo dos últimos anos na área do saneamento. O lodo de esgoto sanitário precisa ser tratado como um produto que possui potencial aumento de produção que de acordo com a Resolução 375 do CONAMA (2006):

[...] é uma característica intrínseca dos processos de tratamento de esgotos e tende a um crescimento no mínimo proporcional ao crescimento da população humana e a solução para sua disposição é medida que se impõe com urgência.

A referida Resolução tem como objetivo definir critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário, permitindo a utilização segura do lodo tanto no aspecto sanitário como na saúde pública.

O uso do lodo é uma pauta que deve ser cuidadosamente discutida. A população, onde o lodo ou produto for utilizado para fins agrícolas, por exemplo, deve solicitar todas as informações da empresa responsável pela destinação por meio de mecanismos como a

prestação de informações sobre os benefícios que terão, quais riscos estarão expostos, tipo e classe do lodo de esgoto que será empregado, critérios de aplicação, procedimentos para evitar a contaminação do meio ambiente e do homem pela presença de micro-organismos e o controle de proliferação de vetores.

No Brasil a Resolução 375 assim como a 380 ambas de 2006, sendo esta última uma retificação da primeira, vem sendo aplicada de maneira lenta, resultando em atos sem responsabilidade ambiental passíveis de processos legais pelo órgão ambiental competente. Isso gera um impasse muito grande na realização das atividades de estruturação e desenvolvimento na área do saneamento principalmente em relação aos lodos.

Pesquisas apontam que a relação custo/benefício da aplicação de lodo na agricultura é muito rentável, favorecendo ao mesmo tempo o produtor e o governo, pois ajuda a resolver parte dos problemas relacionados com a destinação do lodo e a população passa a viver em um ambiente mais saudável ambientalmente.

Em seu trabalho, Manzochi (2008) destaca o baixo custo final do tratamento e destinação final do lodo de ETE para uso agrícola com o valor em reais de R\$ 305,57/ton em massa seca, favorecendo assim a aplicação desta resolução.

Um dos artigos presentes na Resolução 380/06 trata das características apresentadas pelo lodo bruto proveniente de tratamento de esgoto cujos valores devem ser atendidos e seguidos rigorosamente a fim de que se possa ter um lodo com qualidade suficiente e compatibilidade química, física e bacteriológica para aplicação no solo.

A resolução 380/06 ainda trata da obrigatoriedade da criação de Unidades de Gerenciamento de Lodo (UGL) que deverão ser previamente licenciadas pelo órgão ambiental competente sem a qual será impossível a realização das atividades.

Para o lançamento e disposição de efluentes em natureza, corpos hídricos e receptores a Resolução 430 de 2011 do CONAMA define as diretrizes e dá outras providências acerca das condições e padrões de lançamento que este material deve atender afim de não acarretar prejuízos irreversíveis ao meio ambiente.

A mesma Resolução afirma em seu artigo 2º que apesar de a disposição de material em solo não ser sujeita aos seus parâmetros e padrões de lançamento, esta prática, todavia, não pode causar poluição ou contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

No artigo 5º, a Resolução 430/11 prevê que os efluentes a serem lançados na natureza, não poderão conferir ao corpo receptor características de qualidade em desacordo com as metas obrigatórias progressiva, intermediária e final, do seu enquadramento.

Fazer cumprir o que está escrito na legislação é tarefa difícil, visto que a adequação das características de tratabilidade do produto final do tratamento de esgotos aos padrões estabelecidos requer o desenvolvimento e aplicação de projetos com fins sustentáveis, conscientização dos responsáveis pela produção do lodo e altas eficiências do sistema de tratamento, o que muitas vezes não é alcançado devido às punições serem amenas àqueles que são negligentes quanto às leis ambientais e por não haver um controle de descarte de lodo em locais inadequados.

3.6 EXPERIÊNCIAS NO BRASIL

Pesquisadores vêm desenvolvendo estudos relacionados à tecnologia e inovação para o tratamento de lodo. No Brasil, a aplicação de métodos mais eficazes, menos caros e mais sustentáveis são descobertos, inventados e adaptados para as particularidades de cada região.

Miki e Alem Sobrinho (2000) apontaram a ETE Barueri como um exemplo a ser seguido, pois apresenta um bom nível de eficiência realizando o condicionamento do lodo com cal e cloreto férrico com dosagens em torno de 25% e 10% respectivamente e a desidratação em filtro prensa de placas, com tempo de ciclo de 4 horas, além de produzir tortas com 40% de teor de sólidos e densidade de 1,20 kg/L.

O estudo de Pieper (2008) mostrou a viabilidade ambiental, econômica e técnica da implantação de geotêxteis, tipo BAG para o desaguamento do lodo proveniente de Estação de Tratamento de Água (ETA), obtendo resultados satisfatórios.

Suntti *et al.* (2011) realizaram estudo com lodo de fossa séptica do Centro de Treinamento (CETRE) da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) em Florianópolis, e constataram que, devido ao elevado tempo de permanência do lodo no tanque séptico (mais de dez anos), encontraram baixa fração de sólidos totais voláteis (STV), o que é benéfico para o desaguamento do lodo nos BAGs.

No desaguamento com uso de geotêxtil em lodo de estação de tratamento de água, Costa *et al.* (2012) apresentaram uma experiência relevante em relação à economia e ao enquadramento das variáveis nos padrões estabelecidos pela legislação em Petrópolis. Por meio desta técnica, conseguiram chegar à reutilização de 85% do total de 7740 litros de água que eram utilizados para lavagem de filtros, uma porcentagem significativa para uma ETA de vazão de 5 L/s. Este estudo mostrou que o uso da manta geotêxtil na desidratação do lodo de ETA apresentou eficiência com remoção de até 99% dos contaminantes e quanto a clarificação dos efluentes houve excelente desempenho.

Vanzetto (2012) desenvolveu uma metodologia para realizar a análise tecnológica das alternativas de desaguamento de lodos produzidos em ETEs. Essa metodologia é composta por sete fases: (Fase 1) Definição do problema local; (Fase 2) Identificação dos agentes decisivos e Objetivos; (Fase 3) Levantamento e triagem inicial das alternativas; (Fase 4) Definição dos critérios e pesos; (Fase 5) Construção da Matriz Payoff e Avaliação das alternativas; (Fase 6) Apresentação dos resultados e agentes Decisivos; e (Fase 7) Modificações na Metodologia de Análise Tecnológica. Essas fases visam orientar um potencial usuário da metodologia a realizar a análise das alternativas de desaguamento para uma determinada ETE, sendo esta capaz de indicar as alternativas de desaguamento que melhor atendem, concomitantemente, a todos os critérios estabelecidos de acordo com suas características e com as preferências dos atores envolvidos.

Estes estudos impulsionaram as tentativas de aplicação da desidratação com geotêxtil em lodos de ETE no Brasil que, na maioria dos casos, apresentaram sucesso quanto à eficiência na remoção dos sólidos, DQO e DBO.

3.7 BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa é uma importante técnica que relaciona as quantidades de matérias envolvidas em um dado processo, onde o engenheiro realiza uma contabilidade das massas totais e particular de cada componente, tendo em mente o princípio da conservação da massa, como detalha Justi, 2012.

O balanço de massa pode ser classificado quanto ao procedimento de entrada e saída de matéria, quanto à dependência das variáveis do processo em relação ao tempo e podem ser apresentados em Balanço diferencial e Balanço integral (JUSTI, 2012).

Como não há reações químicas no processo de desaguamento de lodos, há equilíbrio de massas entre afluente e efluente líquido e sólido. Pode-se então resumir a seguinte equação de balanço de massa (RICHTER, 2011) (Equação 1):

Equação 1: Balanço de massa

$$\text{LODO BRUTO} - \text{FILTRADO} = \text{TORTA}$$

Com o balanço de massa completo, pode-se obter a eficiência que cada geotêxtil teve no processo de desaguamento. Para o cálculo da eficiência de desaguamento (ED), foi utilizado o conceito descrito por Moo-Young *et al.* (2002) que avalia o grau de desaguamento

por meio da comparação entre o percentual de sólidos totais do lodo antes do desaguamento com o percentual de sólidos totais do lodo retido no geotêxtil, como mostra a Equação 2.

Equação 2: Equação da eficiência de desaguamento do geotêxtil

$$ED = \frac{PS \text{ final} - PS \text{ inicial}}{PS \text{ inicial}} \times 100$$

Onde:

PS inicial= Quantidade de lodo em termos de ST antes do processo de desaguamento (mg/L)

PS final= Quantidade de lodo em termos de ST depois do processo de desaguamento (mg/L)

3.8 ESTATÍSTICA – MÉTODO DAS MULTIVARIADAS

3.8.1 Análise multivariada

Análises Multivariadas consistem em estudos que abrangem dados de diversas variáveis de muitos indivíduos ou objetos (AYRES, 2011). Como existe um grande número de análises multivariadas, foram escolhidas a Análise de Agrupamento (HCA) e das Componentes Principais (PCA) por entender que possibilitam comparar e definir as similaridades entre as variáveis aqui estudadas.

3.8.2 Matriz de dados

Os dados consistem em V variáveis executadas sobre A amostras (objetos do estudo), de modo que a esta série de dados pode ser representada na forma de uma matriz de dimensão A x V (A linhas correspondentes a amostras e V colunas correspondentes às variáveis). A j-ésima variável é representada por um vetor coluna. A i-ésima amostra é representado por um vetor linha chamado vetor resposta e assim pode ser descrito como um ponto no espaço n-dimensional.

3.8.3 Padronização e escalamento

Muitas vezes, a variância das variáveis da matriz apresenta amplitude extremamente diferente uma das outras. Nestes casos, a aplicação de técnicas estatísticas multivariadas

poderá ser influenciada pelas variáveis de maior variância o que dificulta a extração de informação do sistema estudado. Uma maneira de resolver estes problemas, mantendo a informação estatística dos dados é realizar a transformação dos dados originais da matriz de modo que a variância das variáveis seja balanceada. Uma das transformações mais comuns é padronizar os dados pela média e desvio padrão de cada variável, gerando novas variáveis centradas no zero e com variâncias iguais a 1. Este tipo de padronização é conhecida como autoescalamento.

3.8.4 Medidas de similaridade e dissimilaridade

Cada objeto é representado por um ponto no espaço n-dimensional e, portanto, pode ser agrupado com outros que estejam próximos e que mais se assemelham. O critério de melhor associação a ser utilizado é a medida de distância Euclidiana, que a interpretação básica dada é: menores distâncias entre os pontos estão associadas a um elevado grau de similaridade, enquanto que maiores distâncias indicam o comportamento oposto (MOITA NETO E MOITA, 1998; MINGOTI, 2005).

3.8.5 Análise de componentes principais (PCA)

A análise por componentes principais (PCA) é uma das formas mais comuns aplicadas na análise de informações, sendo principalmente utilizada pela sua capacidade de compactação dos dados em função da existência de correlação entre diversas variáveis estudadas. Esta técnica estatística consiste basicamente em reescrever as variáveis originais da matriz em novas variáveis a partir de uma transformação de coordenadas de modo a obter um número menor de variáveis capaz de conter as informações de todas as outras. Essa técnica objetiva principalmente explicar a estrutura de variância e covariância das variáveis pela construção de combinações lineares das variáveis originais denominadas componentes principais (CP) (MINGOTI, 2005).

As CPs são combinações lineares das variáveis originais e são obtidas em ordem decrescente de máxima variância de forma que a componente principal 1 (CP1) detém mais informação estatística que a componente principal 2 (CP2), que por sua vez tem mais informação estatística que a componente principal 3 (CP3) e assim por diante. Desta forma, ao utilizar a PCA, é necessário avaliar o quanto de informação das variáveis originais está preservado nas componentes principais obtidas e isto pode ser feito pela variância total explicada pelas mesmas. A primeira componente principal apresenta a maior variância

possível dos dados e por isso preserva mais informação do sistema (MASSART *et al.*, 1997; MOITA NETO E MOITA, 1998).

A grande aplicabilidade da análise de componentes principais remete ao fato de que frequentemente se obtém mais de 90% das informações contidas nas n-variáveis originais em apenas dois ou três componentes principais. O gráfico da componente principal 1 versus a componente principal 2 fornece uma janela privilegiada (estatisticamente) para observação dos pontos no espaço n dimensional (MOITA NETO E MOITA, 1998).

3.8.6. Análise Hierárquica de Agrupamentos (HCA)

A análise hierárquica de agrupamentos (HCA) é uma técnica estatística que objetiva identificar os possíveis agrupamentos (*cluster*) dos elementos de uma matriz de forma que os elementos pertencentes a um mesmo grupo sejam similares entre si em relação às variáveis e os elementos em grupos diferentes sejam heterogêneos às estas mesmas variáveis. Ou seja, a HCA possibilita determinar similaridades e dissimilaridades de uma série de dados (MINGOTI, 2005). Para isto, utilizam-se as distâncias entre os elementos da matriz os quais são representados em diagramas conhecidos como Dendogramas. Há várias maneiras de medir essa distância, entretanto, a mais utilizada é a distância euclidiana.

Os Dendogramas são especialmente úteis na visualização de semelhanças entre amostras ou objetos representados por pontos em espaço com dimensão maior do que três, onde a representação de gráficos convencionais não é possível (MOITA NETO e MOITA, 1998). Os Dendogramas representam as similaridades/dissimilaridades entre os pares de elementos da matriz. Esse processo é repetido até que todos os elementos sejam conectados formando um único agrupamento. Há vários métodos de agrupamentos hierárquicos: ligação simples ou vizinho mais próximo (*single linkage*), ligação completa ou vizinho mais distante (*complete linkage*) e média (aritmética ou ponderada) das distâncias (*average linkage*) (MINGOTI, 2005).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo metodológico adotado está dividido em cinco etapas. No primeiro momento, são apresentadas as características da ETE Vila da Barca de onde foi coletado o lodo, tais como a localização, o conjunto habitacional de onde a ETE recebe a contribuição, capacidade de tratamento, fluxograma do processo e descrição das etapas de tratamento do esgoto.

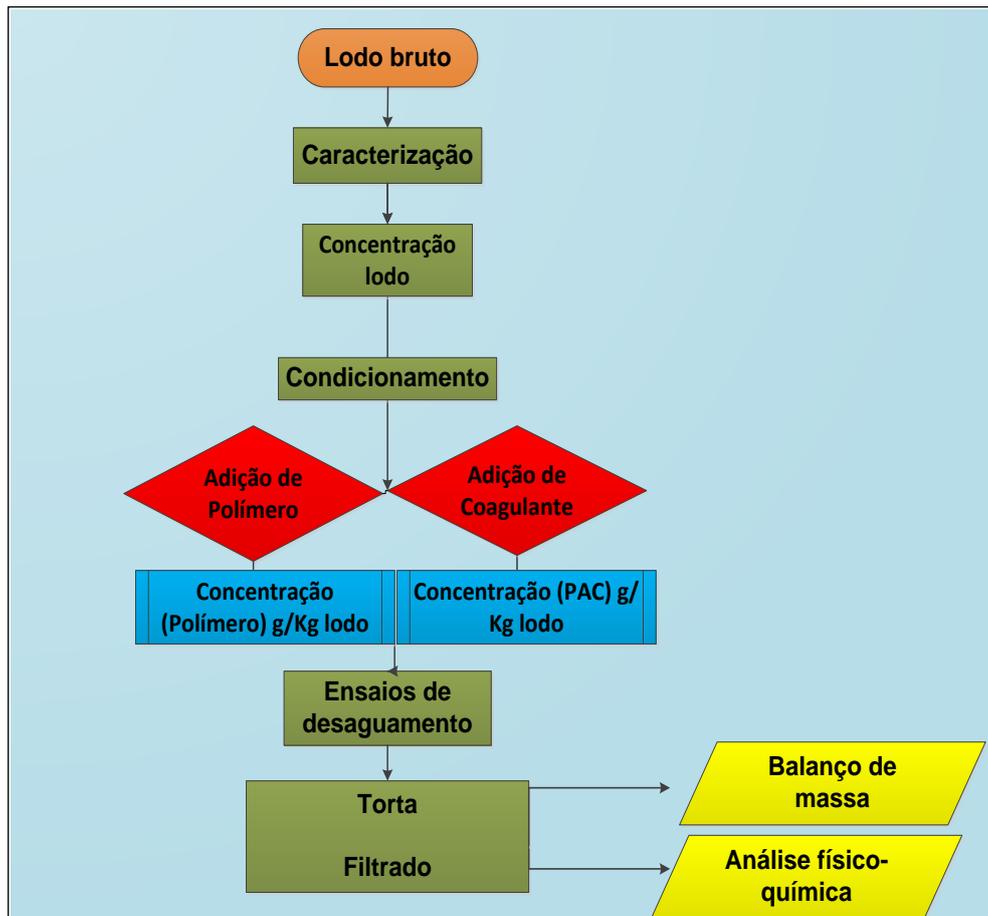
A segunda etapa compreende as características da unidade de bancada do tratamento de lodo de ETE (UBDL), apresentando o fluxograma das operações realizadas, o desenho esquemático, bem como os principais equipamentos utilizados neste sentido.

A terceira etapa trata da caracterização e preparo das concentrações de lodo para o desaguamento, mostrando os métodos analíticos utilizados na determinação das concentrações desejadas no que se refere à dosagem de polímeros catiônicos e coagulante para o melhor desempenho da UBDL.

A quarta etapa apresenta as especificações dos principais tipos de geotêxtil comercializados, além dos ensaios de desaguamento com as respectivas concentrações de produtos químicos usados no condicionamento do lodo que fora encaminhado para cada um dos geotêxteis, permitindo a comparação da eficiência de desidratação em cada um deles.

Na última etapa, têm-se o balanço de massa que é mostrado por meio de fluxograma representativo das variáveis consideradas na UBDL, bem como o tratamento estatístico, para a análise da eficiência de cada geotêxtil no processo de desaguamento, como ferramenta de verificação e comparação dos resultados obtidos. Todas estas etapas estão apresentadas no fluxograma da Figura 2:

Figura 2: Etapas de condicionamento e desidratação do lodo na UBDL.



4.1 DESCRIÇÃO DA ETE VILA DA BARCA

4.1.1 Localização

Parte da pesquisa foi realizada no Município de Belém, no Estado do Pará no bairro do Telégrafo, na Estação de Tratamento de Esgotos da Vila da Barca (ETE Vila da Barca) com as coordenadas 1° 25' 42" S e 48° 29' 28" W. Foi escolhida como área do nosso estudo por ser uma das ETES contempladas pelo Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB).

O período de coleta das amostras para a caracterização e desaguamento do lodo bruto foi realizado em março de 2015 e agosto de 2015, sendo feitas duas coletas (uma em cada mês), com um volume de 50L de lodo por coleta.

O objeto de estudo é o lodo pré-adensado do conjunto habitacional “Vila da Barca” implantado pela Prefeitura Municipal de Belém através da Secretaria Municipal de Habitação

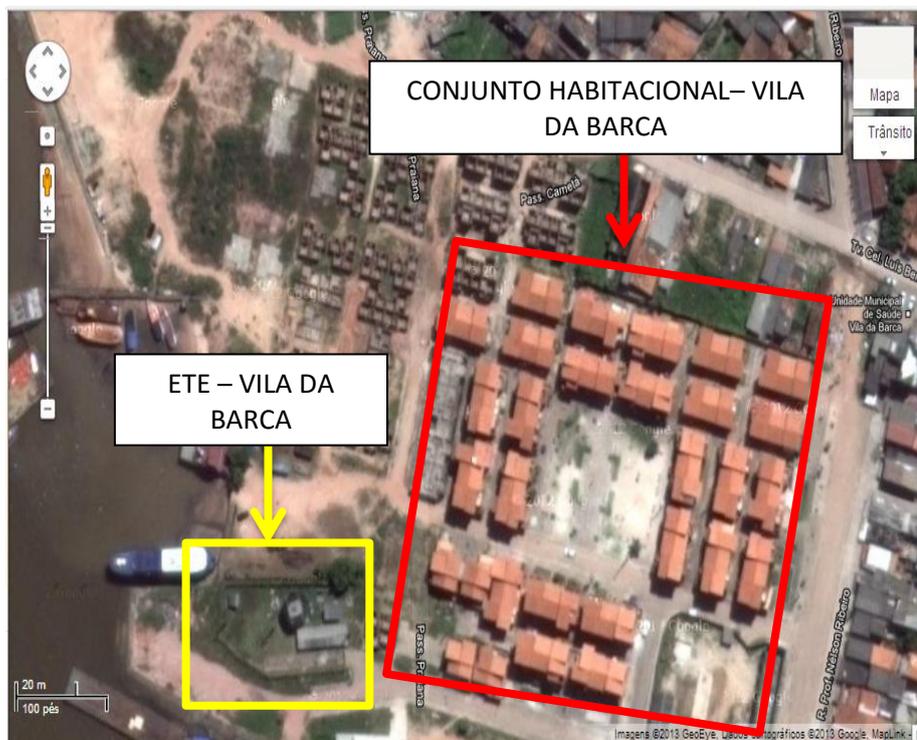
(SEHAB) para atender cerca 2,5 mil pessoas que vivem às margens e no entorno da Baía do Guajará, onde se localiza a maior concentração de casas de palafitas da capital. Foram entregues 136 imóveis que correspondem a 20% das 624 unidades residenciais projetadas, constituídas de prédios de dois e três pavimentos, cada apartamento possui dois quartos, banheiro, cozinha, sala e área de serviço. As Figuras 3 e 4 apresentam o Estado/município e a localização da ETE, respectivamente.

Figura 3: Estado e município de localização da ETE



Fonte: Google maps.

Figura 4: Localização da ETE - Vila da Barca



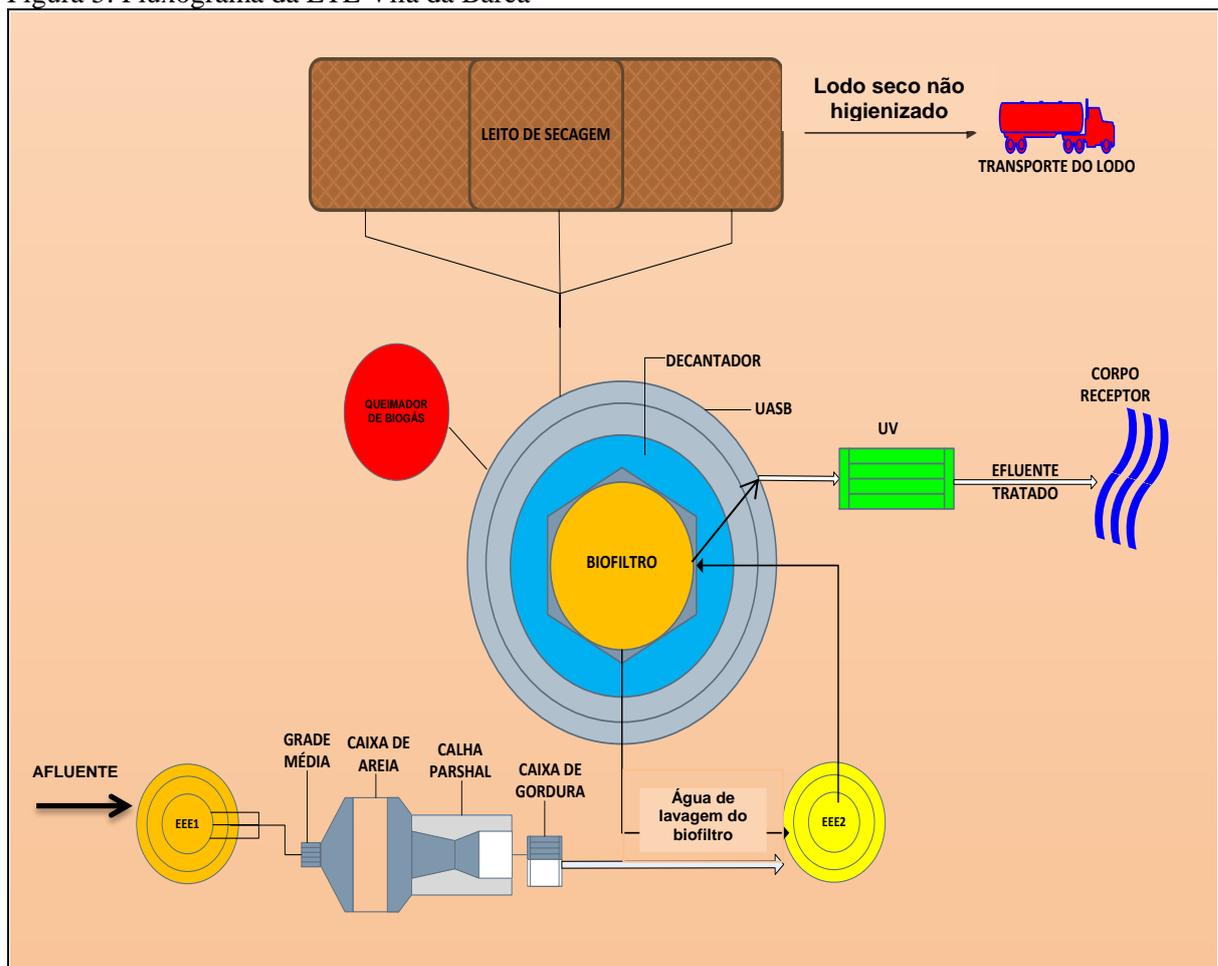
Fonte: Google maps.

4.1.2 ETE Vila da Barca

O sistema de tratamento de esgoto, conforme descrito no projeto original, foi dimensionado para tratar uma vazão de aproximadamente 6,0 L/s na primeira fase do projeto, sendo esta capacidade duplicada na segunda fase. Na primeira fase, a ETE tem a capacidade para atender a contribuição de uma população com aproximadamente 3.000 habitantes, já na segunda fase do projeto, este atendimento será duas vezes maior, ou seja, passará a atender 6.000 habitantes.

A ETE é composta pelo sistema de pré-tratamento, estação elevatória de esgoto e água de lavagem do biofiltro, reator UASB, biofiltro aerado submerso, decantador secundário, desinfecção por ultravioleta, desidratação e estabilização do lodo de descarte em leito de secagem e tratamento de biogás, como apresentado no esquema da Figura 5.

Figura 5: Fluxograma da ETE Vila da Barca



4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Apresentado em etapas que compreendem a descrição da UBDL, a análise estatística realizada para a comparação dos desempenhos de desaguamento nos geotêxteis e a verificação das variáveis estudadas com a análise de resultados.

4.2.1 Descrição da Unidade de Bancada de Desaguamento do Lodo (UBDL)

Os ensaios foram realizados na Unidade de Bancada de Desaguamento do Lodo (UBDL), desenvolvida e construída nas dependências do laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LAESA) da Universidade Federal do Pará (UFPA) para simular as condições de campo.

A UBDL compreende uma unidade de desaguamento pouco estudada no estado do Pará, pois utiliza como material de filtração o geotêxtil ou BAG na etapa de desaguamento do lodo.

A UBDL é composta por geotêxteis do tipo MACTUBE que foram doadas por um fabricante internacional deste material, sendo adicionado em cada um deles um volume fixo de lodo, a fim de variar e testar diferentes concentrações deste material e avaliar a melhor condição de desaguamento.

Como os geotêxteis utilizados têm características específicas para esta pesquisa, ou seja, dimensões em escala de bancada, a quantidade de lodo a ser adicionada em cada uma deles, de acordo com a sua capacidade de saturação só foi conhecida quando se iniciou a fase de desidratação.

Provetas com capacidade individual de 2 L foram utilizadas para a coleta do filtrado (líquido proveniente do desaguamento do lodo nos geotêxteis).

Os geotêxteis ficaram apoiados dentro de funis de vidro comum 18 mm x 1000 mL com seus apoios específicos como bases em Plástico e haste em inox 75 cm e anel de ferro com mufa 10 cm.

O formato dos geotêxteis é de cone cujas dimensões são: altura da ponta até a circunferência 16,5 cm; diâmetro da circunferência: 40 cm. Estas medidas foram adaptadas in loco pelo pesquisador de maneira que o cone de geotêxtil coubesse no funil de vidro.

O processo de preparação do lodo que consta na fase de condicionamento, com a adição de produtos químicos, foi feito em Jar test com misturador (agitador) rápido para homogeneizar o lodo. Este equipamento se constitui basicamente de 6 jarras plásticas em

formato cúbico com capacidade total de 2 L cada e um conjunto de 6 hastes acopladas com hélices que rotacionam e misturam o lodo contido nas jarras. A rotação e o tempo de agitação podem ser monitorados e previamente programados de acordo com a floculação pretendida (Figura 6).

Figura 6: Equipamento Jar test utilizado para o condicionamento do lodo da ETE Vila da Barca.



De maneira resumida, o fluxograma da UBDL começa com o lodo coletado na ETE Vila da Barca sendo trazido para o LAESA, onde a unidade de bancada está implantada e as análises das variáveis físico-químicas foram feitas. Após as análises para a caracterização do lodo bruto, o restante do material foi encaminhado para o Jar test para o condicionamento e tão logo a alimentação nos geotêxteis até a sua capacidade total. Após tempo suficiente para a desidratação do lodo por gravidade no geotêxtil, foram coletados em provetas o material líquido (FILTRADO) e o material sólido retido no geotêxtil (TORTA).

4.3 CARACTERÍSTICAS DO GEOTÊXTIL

4.3.1 Especificações do geotêxtil (GT)

O lodo passou por processo de desidratação com a retirada do excesso de umidade com o auxílio de Geotêxtil. O critério de escolha na utilização deste BAG (sacos de geotêxtil) como material de filtração foi a área de ocupação, que diminui substancialmente em relação à área de implantação de um leito de secagem, por exemplo, e a carga que este material suporta se comparado à métodos mais antigos utilizados para a desidratação de lodo. O desaguamento

foi feito por gravidade tendo como única força de contribuição na retirada da água o peso do próprio lodo.

Segundo a ABINT, o geotêxtil possui características importantes que devem ser levadas em conta no momento de sua utilização, segue algumas delas:

Para cada propriedade física indicamos a norma mais utilizada atualmente, a simbologia eventualmente adotada pela IGS-Associação Internacional de Geossintéticos e a unidade de apresentação do ensaio.

a) **ESPESSURA** - t_{GT} : a espessura nominal do Geotêxtil é determinada pela norma brasileira NBR 12569 e expressa em milímetros.

b) **POROSIDADE** - N_{GT} : é usualmente determinada pela norma alemã DIN 53855 e expressa em porcentagem do volume total do Geotêxtil.

c) **PONTO DE AMOLECIMENTO**: é adotado o ponto de amolecimento da matériaprima do Geotêxtil, expresso em graus Célsius.

d) **GRAMATURA OU PESO POR UNIDADE DE ÁREA** - M_A : é determinada pela norma brasileira NBR 12568 e expressa em gramas por metro quadrado.

Para esta pesquisa, um fabricante internacional de geomembranas/geotêxteis doou duas caixas destes materiais do tipo MacTube. O MacTube é um tubo fabricado com geotêxtil que é um material de alta tenacidade, inerte às degradações biológicas e resistente aos ataques de produtos químicos como álcalis e ácidos. As propriedades do geotêxtil podem ser assim divididas de acordo com a ABINT, 2001 (Quadro 1):

Quadro 1: Propriedades do geotêxtil.

FÍSICAS	HÍDRAULICAS	MECÂNICAS	DURABILIDADE
Gramatura do geotêxtil	Permeabilidade normal	Resistência e alongamento à tração	Fluência
Ponto de amolecimento	Permissividade	Módulo de rigidez	Resistência a agentes químicos
Espessura do geotêxtil	Permeabilidade planar	Resistência à propagação do rasgo	Resistência à agentes biológicos
Porosidade do geotêxtil	Transmissividade	Resistência ao puncionamento	Resistência aos raios UV
Retenção de asfalto	Abertura de filtração	Resistência ao estouro	Resistência à abrasão

Fonte: Adaptado de ABINT, 2001.

As especificações das geomembranas comercializadas são mostradas na Tabela 2.

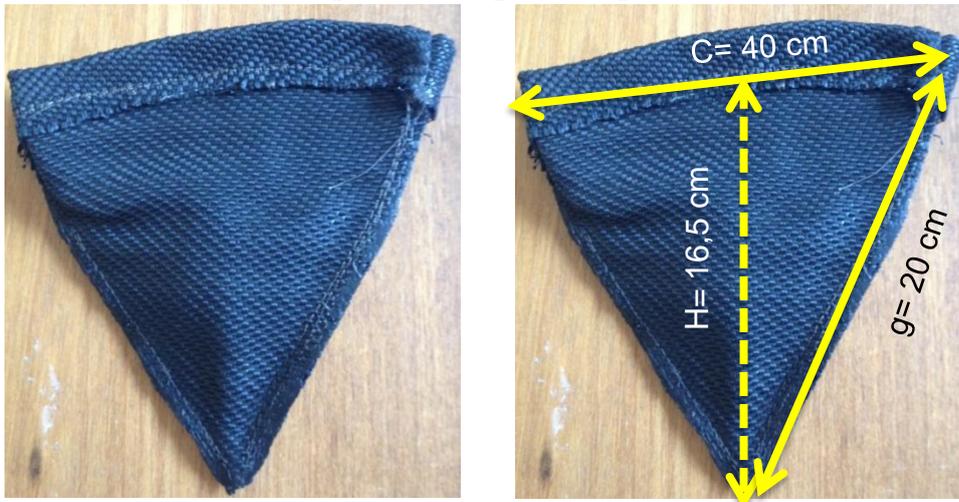
Tabela 2: Especificações do geotêxtil comercializado e do geotêxtil utilizado.

Tipo	C (m)	l (m)	L (m)	H (m)	V (m ³)	Taxa de fluxo (L/m/m ²)	Abertura aparente de filtração (mm)	Permissividade s ⁻¹
A	18,3	8,6	61	2,3	880			
B	18,3	8,3	31	2,3	440			
C	13,7	6	6	2,1	578			
D	13,7	6	31	2,1	289			
E	9,1	4	28	2	139			
F	9,1	4	15	2	75			
G	9,1	4	9	2	47			
H	6,9	2	7	1,6	20	900	0,35	0,35
I	9,1	4	22	2	110			
J	13,7	6	15	2,1	140			

Fonte: <http://www.maccaferri.com.br/home>, 2010.

Para o caso da desidratação do lodo da ETE Vila da Barca utilizou-se uma adaptação do modelo de MAC BAG W1 7.10 do tipo H com os tamanhos adequados para os ensaios em escala bancada feitos in loco pelo próprio pesquisador (Figura 7).

Figura 7: Modelo de geotêxtil adaptado in loco pela autor para uso em bancada.

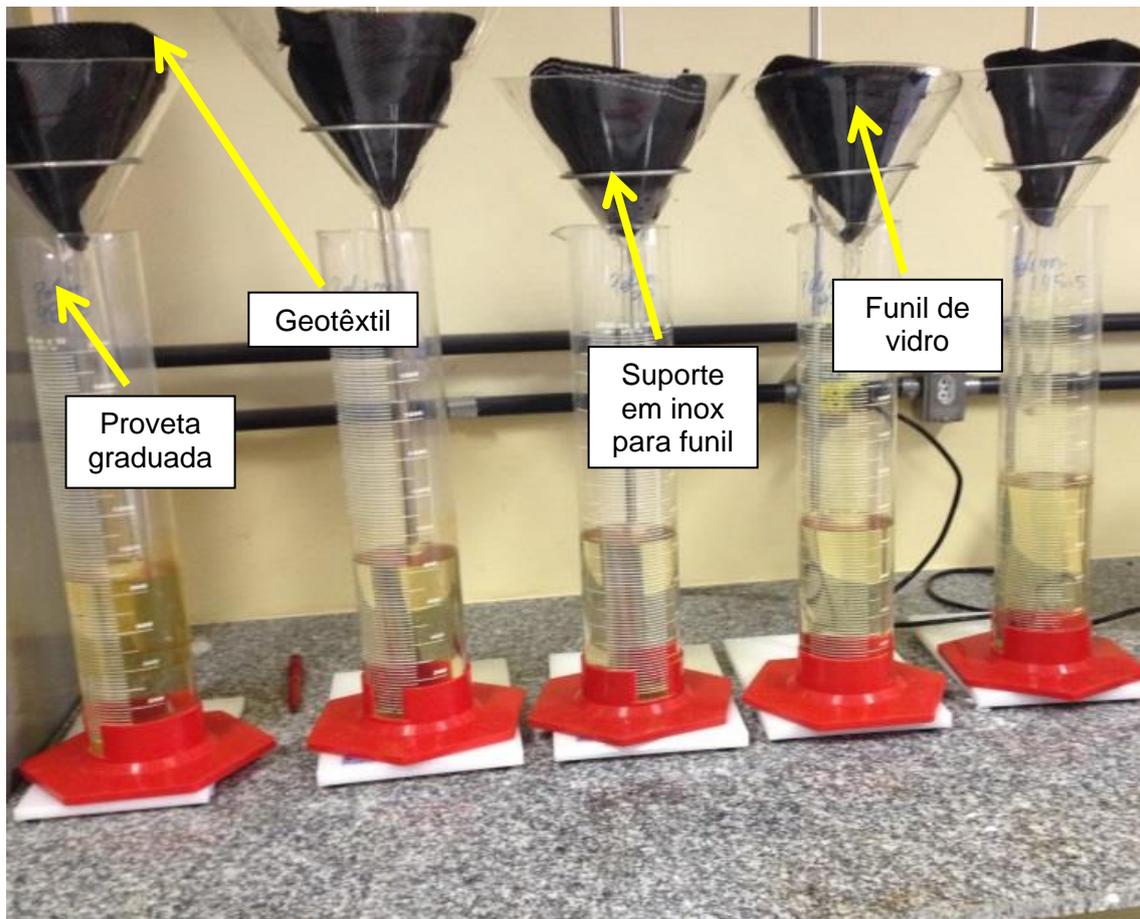


Este tipo de geotêxtil tem seus tecidos produzidos através do entrelaçamento de filamentos de polipropileno de alta tenacidade, em ângulos retos. Os bocais de entrada são radiais e costurados ao tubo, facilitando seu preenchimento. Permite o escoamento do líquido através dos poros do geotêxtil, retendo o material sólido em seu interior, reduzindo o teor de umidade e apresentando como resultado uma água clarificada.

Como resultado da desidratação, o geotêxtil libera água clarificada com baixo teor de sólidos. Esta água dependendo das suas propriedades pode ser prontamente descartada, reaproveitada ou retornar à estação de tratamento. Após o processo de desidratação e consolidação, os sólidos foram encaminhados para seu destino final (descarte ou

reaproveitamento). A seguir, na Figura 8, pode-se observar a unidade de bancada de desaguamento de lodo instalada no laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFPA.

Figura 8: Arranjo da UBDL



4.4 CARACTERIZAÇÃO E CONDICIONAMENTO DO LODO

4.4.1 Caracterização do lodo e preparo das concentrações de coagulante e floculante para o desaguamento

O procedimento de coleta do lodo bruto foi realizado mediante a composição de volumes coletados na tubulação de descarga do reator UASB no leito de secagem (Figura 9) constituídas pelo lodo acumulado no fundo do reator, portanto, um lodo pré-adensado, totalizando um volume de 100 L de amostra, coletadas em dois momentos, para a realização de todos os ensaios desta pesquisa.

Figura 9: Pontos de coleta do lodo na ETE Vila da Barca



Após ser coletado, o lodo bruto foi acondicionado em bombona de PEAD (polietileno de alta densidade) com capacidade de 50 L (Figura 10) e imediatamente transportado ao LAESA-UFPA para a execução dos ensaios experimentais.

Figura 10: Coleta e armazenamento do lodo da ETE Vila da Barca.



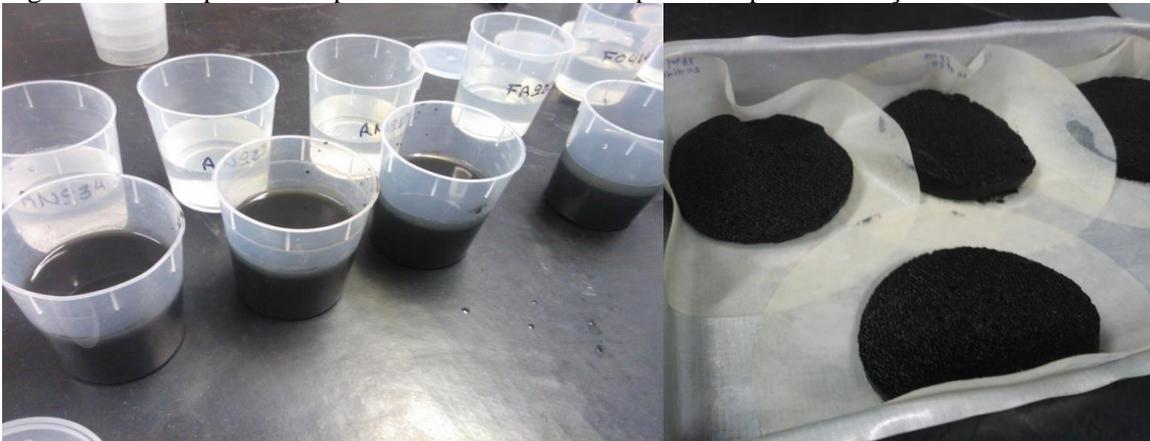
Para a caracterização do lodo bruto foram determinadas, no LAESA-UFPA, as variáveis físico-químicas: Teor de sólidos (TS) e de umidade (TU) utilizando a metodologia adaptada da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/98), Sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV), Relação SSV/SST, Metais, Densidade do lodo (ρ) e Concentração do lodo (C), sendo estes parâmetros analisados de acordo com o Standard Method (APHA, 1998).

4.4.2 Testes para a escolha do polímero

Para a escolha do flocculante que fora adicionado na etapa de condicionamento do lodo realizou-se o teste de polímeros a fim de obter um lodo com características favoráveis no processo de desaguamento.

a- Usou-se uma série de polímeros do tipo catiônico, aniônico e não iônico com concentração de 0,1% o equivalente a 0,2 g de polímero que foram pesados em balança analítica como apresenta a Figura 11;

Figura 11: Teste preliminar para a escolha do melhor polímero para floculação do lodo.



b- Fazer uma mistura com 200 mL de água, agitando o recipiente e ir adicionando aos poucos os 0,2 g de polímero. Depois agitar bem a solução;

c- A dosagem foi medida em ppm de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{ppm} = \frac{[\text{flocculante}] (\%) \times V. \text{dosado}}{V. \text{tratado}} \times 10000$$

$$\text{ppm} = \frac{0,1 (\%) \times 1 \text{ mL}}{200 \text{ mL}} \times 10000 = 5 \text{ ppm/mL}$$

d- Foi feito um teste preliminar submetendo todas as amostras de lodo à mesma condição de volume e ppm. Usou-se 10 amostras de lodo com os seguintes resultados apresentados na Tabela 3:

Tabela 3: Amostras dos polímeros usados nos testes.

AMOSTRAS DE LODO	POLÍMERO	VOLUME (mL)	TOTAL ppm
1ª amostra	AN934	20	100
2ª amostra	AN923	20	100
3ª amostra	AN910	20	100
4ª amostra	FA920	20	100
5ª amostra	FO4140	20	100
6ª amostra	FO4290	20	100
7ª amostra	FO4400	20	100
8ª amostra	FO4490	20	100
9ª amostra	F04550	20	100
10ª amostra	FO4650	20	100

Neste teste observou-se que o processo de separação sólido-líquido na maioria das amostras de lodo apresentou floculação ruim. Excluiu-se todos os polímeros aniônicos e o não iônico por serem os que tiveram menor eficiência na formação dos flocos (Tabela 4).

Tabela 4: Testes para a escolha do polímero para condicionamento do lodo bruto.

Polímero	Inversão *	Dosagem (mL)	Floculação	Resistência	Dosagem (mL)	Floculação	Resistência	Dosagem (mL)	Floculação	Resistência	Desaguamento (8 mL)	Desaguamento (13 mL)	Desaguamento (18 mL)
AN934	4	20	RUIM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AN923	4	20	RUIM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AN910	4	20	RUIM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FA920	4	20	RUIM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FO4140	4	20	REGULAR	5 INV.	10	NÃO FUNC.	2 INV.	13	BOA	3 INV.	2 INV.	50ml em 51,6" -3min obteve-se 84 ml	50ml em 4,18" -3min obteve-se 113 ml
FO4290	4	20	REGULAR	4 INV.	10	NÃO FUNC.	3 INV.	13	RUIM	3 INV.	2 INV.	50ml em 25,3" -3min obteve-se 109 ml	50ml em 6,63" -3min obteve-se 113 ml
FO4400	4	20	REGULAR	3 INV.	10	NÃO FUNC.	2 INV.	13	BOA	3 INV.	2 INV.	50ml em 25,09" -3min obteve-se 107 ml	50ml em 5" -3min obteve-se 110 ml
FO4490	4	20	REGULAR	4 INV.	10	NÃO FUNC.	3 INV.	13	RUIM	3 INV.	2 INV.	50ml em 27,43" -3min obteve-se 110 ml	50ml em 7,34" -3min obteve-se 94 ml
FO4550	4	20	REGULAR	2 INV.	10	NÃO FUNC.	2 INV.	13	RUIM	2 INV.	1 INV.	50ml em 17,21" -3min obteve-se 112 ml	50ml em 6,13" -3min obteve-se 108 ml
FO4650	4	20	REGULAR	2 INV.	10	NÃO FUNC.	3 INV.	13	RUIM	2 INV.	1 INV.	50ml em 30,97" -3min obteve-se 100 ml	50ml em 13,37" -3min obteve-se 97 ml

e- Os ensaios com os polímeros catiônicos para confirmar o seu melhor desempenho na formação de flocos no lodo apresentam:

* Número de inversões usadas para fazer a solução de água mais polímero;

OBS: Todas as amostras foram usadas no pré-teste com volume máximo dosado da solução no lodo (água + floculante) de 20 mL;

OBS 1: A amostra 4140 apresentou no pré-teste uma flocação regular a partir da dosagem de 12 mL de solução com o floculante;

OBS 2: A amostra 4290 apresentou no pré-teste uma flocação regular à boa a partir da dosagem de 10 mL de solução com o floculante;

OBS 3: A amostra 4490 apresentou no pré-teste uma flocação boa a partir da dosagem de 15 mL de solução com o floculante;

OBS 4: Resistência significa quantas inversões são necessárias para se quebrar a cadeia do polímero (quebra do floco);

OBS 5: O teste de desaguamento teve um tempo constante para o desaguamento total de 3 min, e para um volume inicial de 50 mL.

4.4.3 Ensaios de desaguamento

Os testes foram realizados em escala de bancada no equipamento Jar test com rotação média de 150 rpm para a mistura e homogeneização de 1 L de lodo durante aproximadamente 15 s de agitação com as soluções de Policloreto de Alumínio (PAC) com concentração de 10% (relação ótima de 20 mL PAC/L lodo) e polímero catiônico do tipo SNF FO4400 com concentração igual a 0,1%, coagulante e floculante, respectivamente (Figura 12).

Figura 12: Condicionamento e homogeneização do lodo com PAC e polímero nas cubas de acrílico de 2 L do Jar test.



Com cinco geotêxteis ou BAGs, cinco ensaios e vinte e cinco dosagens de produtos químicos foram realizados na fase preliminar dos ensaios de desidratação para a escolha da

melhor condição de dosagens na otimização da retirada de água, houve a alternância na utilização destes produtos para o condicionamento do lodo. Em certos ensaios, usou-se apenas polímero; em outros houve a adição de polímeros mais PAC, a fim de testar a eficiência destes produtos na formação de flocos no lodo (Figura 13).

Figura 13: Ensaio preliminar de desidratação do lodo e coleta do filtrado.



A concentração de lodo foi variando ao longo dos ensaios a partir de diluições proporcionais, como segue:

Primeiro ensaio $C_{1\text{lodo}} = 60.265 \text{ mg/L}$;

Segundo ensaio $C_{2\text{lodo}} = 0,5 C_1$;

Terceiro ensaio $C_{3\text{lodo}} = 0,4 C_1$;

Quarto ensaio $C_{4\text{lodo}} = 0,25 C_1$;

Quinto ensaio $C_{5\text{lodo}} = 0,20 C_1$;

No condicionamento, a adição de polímeros catiônicos tem o objetivo de aumentar a concentração de sólidos no lodo com uma relação ótima entre gramas de polímeros adicionados para cada quilo de lodo produzido. Para esta pesquisa foram testadas as seguintes relações de:

Dosagem 1: **2 g polímero/Kg lodo**; Dosagem 2: **4 g polímero/Kg lodo**; Dosagem 3: **6 g polímero/Kg lodo**; Dosagem 4: **8 g polímero/Kg lodo**; Dosagem 5: **10 g polímero/Kg lodo**.

A partir da escolha da melhor condição de desaguamento, o ensaio com melhor desempenho e suas três primeiras dosagens fora utilizado, sendo feitas em duplicata, passou-se então ao uso de seis geotêxteis (dois para cada dosagem), para a coleta de filtrado e torta e a realização das análises físico-químicas.

A partir destas dosagens (a serem atendidas) e com as concentrações de lodo utilizadas em cada dosagem, descobriu-se a situação ideal da solução de polímero para cada um dos cinco ensaios (Tabela 5).

Tabela 5: Dosagens de coagulante e floculante para o condicionamento do lodo.

1° ENSAIO					
	DOSAGEM 1	DOSAGEM 2	DOSAGEM 3	DOSAGEM 4	DOSAGEM 5
SST _{lodo} mg/L	60.266,0	60.266,0	60.266,0	60.266,0	60.266,0
V _{sol} Polímero mL	121,0	241,0	362,0	482,0	603,0
V _{sol} PAC mL	20	20	20	20	20
M _[P] /M _{lodo} gP/kgLodo	2,01	4,00	6,01	8,00	10,01
2° ENSAIO					
	DOSAGEM 1	DOSAGEM 2	DOSAGEM 3	DOSAGEM 4	DOSAGEM 5
SST _{lodo} mg/L	30.133,0	30.133,0	30.133,0	30.133,0	30.133,0
V _{sol} Polímero mL	61	121	181	241	302
V _{sol} PAC mL	10	10	10	10	10
M _[P] /M _{lodo} gP/kgLodo	2,01	4,00	6,01	8,00	10,01
3° ENSAIO					
	DOSAGEM 1	DOSAGEM 2	DOSAGEM 3	DOSAGEM 4	DOSAGEM 5
SST _{lodo} mg/L	24.106,0	24.106,0	24.106,0	24.106,0	24.106,0
V _{sol} Polímero mL	48,5	97	145,5	194	242,5
V _{sol} PAC mL	8	8	8	8	8
M _[P] /M _{lodo} gP/kgLodo	2,01	4,00	6,01	8,00	10,01
4° ENSAIO					
	DOSAGEM 1	DOSAGEM 2	DOSAGEM 3	DOSAGEM 4	DOSAGEM 5
SST _{lodo} mg/L	15.066,0	15.066,0	15.066,0	15.066,0	15.066,0
V _{sol} Polímero mL	30,5	61	91,5	121	151
V _{sol} PAC mL	5	5	5	5	5
M _[P] /M _{lodo} gP/kgLodo	2,01	4,00	6,01	8,00	10,01
5° ENSAIO					
	DOSAGEM 1	DOSAGEM 2	DOSAGEM 3	DOSAGEM 4	DOSAGEM 5
SST _{lodo} mg/L	12.053,0	12.053,0	12.053,0	12.053,0	12.053,0
V _{sol} Polímero mL	24,3	48,4	72,4	96,4	121,4
V _{sol} PAC mL	4	4	4	4	4
M _[P] /M _{lodo} gP/kgLodo	2,01	4,00	6,01	8,00	10,01

M_[P]/M_{lodo}: Relação massa/massa de polímero com o lodo.

A partir destas variações de dosagens, chegou-se a melhor condição: Ensaio 3, nas três primeiras dosagens foram os que tiveram melhor desempenho no desaguamento do lodo e

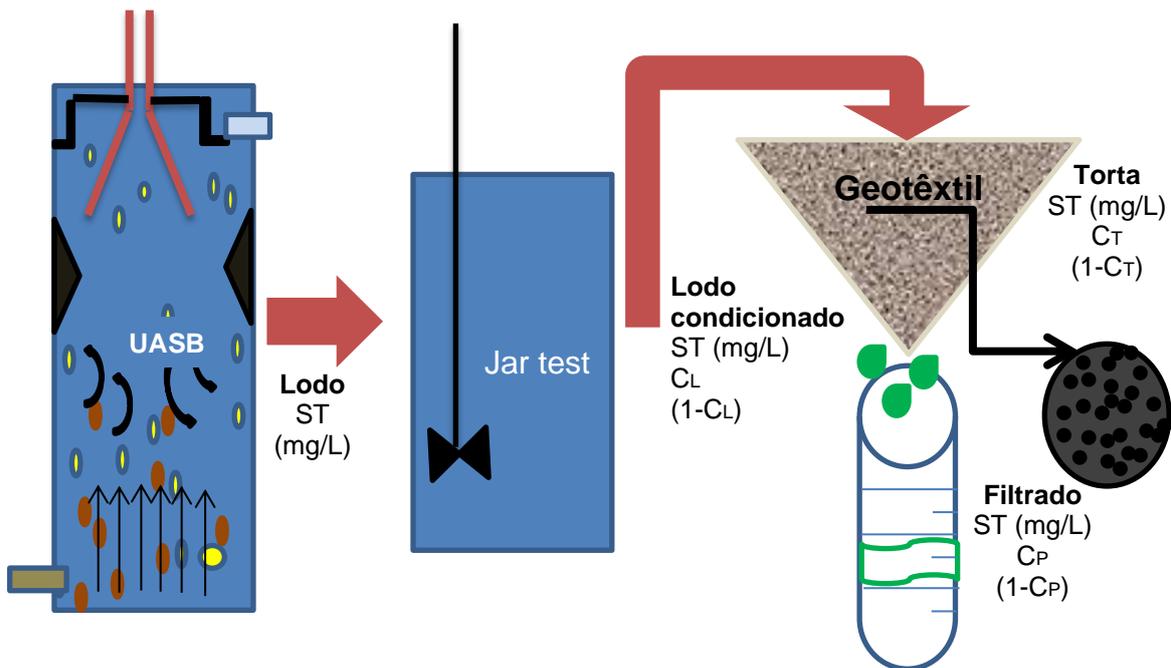
portanto, estes serão usados no ensaio final otimizado em duplicata, com uso de seis geotêxteis para a coleta e análise do filtrado e torta.

4.5 FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.5.1 Balanço de massa e Análise estatística

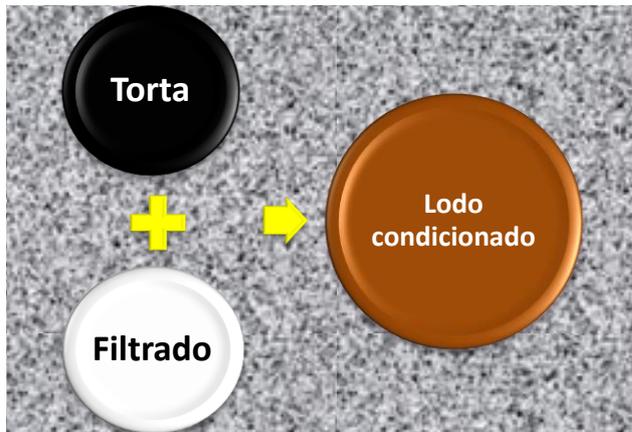
Para a apresentação da eficiência do processo de tratamento do lodo foi realizado o balanço de massa deste sistema, com a verificação da variação da concentração de ST no lodo condicionado para o desaguamento, na massa de torta gerada nesta operação e no filtrado produzido em cada um dos seis geotêxteis. O fluxograma do balanço de massa para este estudo está apresentado na Figura 14:

Figura 14: Balanço de massa na UBDL



O correto balanço de massa para as citadas séries de sólidos dar-se-á pela soma dos valores das concentrações dos sólidos no filtrado e na torta, totalizando as concentrações encontradas no lodo condicionado, uma vez que no processo de desidratação do lodo não exista reações químicas. Na teoria, a quantidade de lodo que entra nos geotêxteis deve ser igual a soma das concentrações que saem em forma de material sólido (torta) e líquido (filtrado), logo a Figura 15 apresenta o esquema do balanço de massa:

Figura 15: Balanço de massa do lodo condicionado.



(Equilíbrio geral)

$$C_L \times (1 - C_L) = T \times (1 - C_T) + P \times (1 - C_P)$$

(Equilíbrio da componente água)

Onde:

C_L : Fração de sólido no lodo

$(1 - C_L)$: Fração de água no lodo

T : Fração de sólido na torta

$(1 - C_T)$: Fração de água na torta

P : Fração de sólido no filtrado

$(1 - C_P)$: Fração de água no filtrado

Para a análise das eficiências encontradas no balanço de massa, foram utilizadas a análise hierárquica de agrupamentos (HCA) e análise de componentes principais (PCA); quanto à eficiência dos geotêxteis no processo de desaguamento, usou-se a estatística analítica e descritiva como ferramenta de verificação e comparação dos resultados obtidos.

Por tratar-se da análise de mais de duas variáveis, a abordagem consiste na comparação de todas. Nestes casos, a técnica indicada para a interpretação dos resultados é a Análise de Variância ou ainda ANOVA, que constitui um dos métodos mais utilizados para a interpretação de dados quando são testadas várias amostras (AYRES, 2011).

O balanço de massa completo termina quando se obtém massa constante na torta gerada após o desaguamento do lodo. Para a comprovação da eficiência dos geotêxteis nos ensaios de desaguamento, o teor de sólidos contidos na torta deve ter percentuais elevados se comparados às concentrações de sólidos totais no filtrado além de ter teor de umidade mais baixo que o material coletado nas provetas.

As variáveis físico-químicas analisadas no lodo da ETE Vila da Barca, enviado para desaguar nos geotêxteis foram: No lodo bruto analisou-se o Teor de sólidos (TS) e de Umidade (TU), Sólidos totais (SST), sólidos fixos (SSF) e voláteis (SSV), Relação SSV/SST,

Metais, Densidade do lodo (ρ), Concentração do lodo (C), Massa específica; na torta foi feito o balanço de massa com a concentração de sólidos totais (ST), Teor de umidade (TU) e teor de sólidos (TS); quanto ao produto do desaguamento (filtrado) foram analisadas as variáveis pH, temperatura, DQO, DBO, SST, cor verdadeira e aparente, turbidez, Dureza, N-amoniaco, fósforo, alcalinidade, nitrato, carbono orgânico total e metais, como mostra o Quadro 1.

Quadro 2: Variáveis analisadas na caracterização do lodo bruto da ETE Vila da Barca e do filtrado resultante do desaguamento.

VARIÁVEL	UNIDADE	VARIÁVEL	UNIDADE
LODO BRUTO		TORTA	
ST	mg/L	ST	mg/L
SST	mg/L	---	---
SSF	mg/L	---	---
SSV	mg/L	---	---
TU	%	TU	%
TS	%	TS	%
SSV/SST	---	---	---
Concentração do lodo	mg/L	---	---
Densidade do lodo	---	---	---
Massa específica do lodo	g/mL	---	---
Metais	mg/L	---	---
FILTRADO			
pH	---	Nitrato	mg/L
T	°C	COT	mg/L
DQO	mg/L	Metais	mg/L
DQO _{Filtrada}	mg/L	Taxa de filtração	m ³ /m ² .d
DBO	mg/L	Cor verdadeira	mgPt/L
DBO _{Filtrada}	mg/L	Cor aparente	mgPt/L
SST	mg/L	Dureza Ca	mg CaCO ₃ /L
SSF	mg/L	Dureza Mg	mg Mg(OH) ₂ /L
SSV	mg/L	Turbidez	NTU
ST	mg/L	Fósforo Total	mg/L
STF	mg/L	Alcalinidade Total	mg/L
STV	mg/L	N Amoniacal	mg/L
SDT	mg/L		

Com os valores obtidos nas análises, aplicou-se o método estatístico de Análises multivariadas com a técnica de análise de conglomerado ou análise hierárquica de agrupamento, além da análise de componentes principais (PCA) para a apresentação e organização das variáveis com maior nível de significância nos resultados das amostras de lodo.

4.6 ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO FILTRADO

Neste tópico estão reunidos os equacionamentos responsáveis por gerarem numericamente índices que qualificam o produto do desaguamento do lodo da ETE Vila da Barca além da apresentação das principais relações que merecem discussão quanto às variáveis que caracterizam este material.

4.6.1 Índice de Langelier (IL)

Um importante índice calculado a partir da relação entre os valores de pH da amostra analisada e pH de saturação do carbonato de cálcio (CaCO_3) é o chamado Índice de Langelier. Trata-se de um modelo derivado das teorias sobre saturação de CaCO_3 na água.

Quadro 3: Metodologias para medição de variáveis empregadas na determinação do Índice de Langelier.

Variáveis analisadas	Unidade	Método	Referência
T	°C	Termômetro	---
pH	---	Potenciométrico	---
Alc.Total	mg/L	Titulação	APHA (1998)
Dureza Ca	mg/L CaCO_3	Colorimetria	Manual HACH
SDT	mg/L	Gravimetria	APHA (1998)

Conforme método proposto por Langelier (1936), o pH de saturação é representado pela Equação 3:

Equação 3: pH de saturação de CaCO_3 da amostra.

$$\text{pH}_s = \frac{0,0125 \cdot \sqrt{\text{SDT}}}{1 + 0,005 \cdot \sqrt{\text{SDT}}} + \frac{593}{273 + T} + 9,3 - \log(0,4 \cdot \text{Ca}) - \log(\text{Alc})$$

Onde:

SDT: Concentração de sólidos dissolvidos (mg/L);

T: Temperatura da amostra (°C);

Ca: Concentração de Cálcio, medida a partir da análise de dureza da amostra (mg/L CaCO_3);

Alc: Alcalinidade total da amostra (mg/L CaCO_3).

Equação 4, representa o cálculo para a obtenção do índice de Langelier (IL):

Equação 4: Índice de Langelier

$$IL = pH + pH_s$$

4.6.2 índice de qualidade do filtrado (IQF)

A partir das análises do filtrado, material recolhido após o desaguamento em geotêxtil do lodo coletado em proveta graduada, elaborou-se um índice para apresentar a qualidade do material dentro de um intervalo de confiança pré-determinado. Fator de concentração do lodo, Eficiência de desaguamento quanto à redução de volume e de massa e Taxa de aplicação hidráulica foram calculados a partir de análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios de bancada.

Assim, desenvolveu-se o Índice de qualidade do filtrado (IQF) a partir da determinação de ST, turbidez e cor aparente, mediante a aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA), cuja técnica estatística multivariada permite resumir a informação dessas três variáveis num conjunto menor de (k) variáveis compostas derivadas a partir do conjunto original, resultando no IQF.

O índice de qualidade do filtrado consiste em obter um valor numérico cuja representação significa que quanto menor o valor de IQF melhor a qualidade do líquido resultante da filtração em geotêxtil. Tais cálculos foram realizados no software Minitab 17 for Windows.

As equações que levam aos cálculos dos índices supracitados estão descritas a seguir:

Equação 5: Fator de concentração do lodo em (%).

$$FC(-) = \left(\frac{LODO_{TORTA}}{LODO_{ENSAIO}} \right)$$

Em que:

FC(-) : fator de concentração de lodo (%);

LODO_{TORTA}: concentração em termos de sólidos totais na torta (%);

LODO_{ENSAIO}: concentração em termos de sólidos totais no lodo a ser desaguado (%).

Equação 6: Eficiência de desaguamento do geotêxtil em relação a redução de massa.

$$E(\%)_M = \left(\frac{M_{BAG}}{M_L} \right) \cdot 100$$

$$M_{BAG} = M_L - M_{FIL} = (C_L \cdot V_L) - (C_{FIL} \cdot V_{FIL})$$

Em que:

$E(\%)_M$: eficiência do desaguamento do geotêxtil em termos de redução de massa (%);

M_{BAG} : massa em termos ST retida no geotêxtil (g);

M_L : massa lodo em termos ST submetida ao desaguamento (g);

M_{FIL} : massa em termos ST obtido no líquido filtrado (g);

C_L : concentração de ST no lodo a ser desaguado (g/L);

V_L : volume inicial de lodo a ser desaguado (L);

C_{FIL} : concentração de ST no filtrado (g/L);

V_{FIL} : volume de líquido obtido no desaguamento (L);

Equação 7: Eficiência de desaguamento do geotêxtil em relação a redução de massa.

$$E(\%)_V = \left(\frac{V_{BAG}}{V_L} \right) \cdot 100$$

$$V_{BAG} = V_L - V_{FIL}$$

Em que:

$E(\%)_V$: eficiência do desaguamento do geotêxtil em termos de redução de volume (%);

V_{BAG} : volume de lodo retido no geotêxtil (L);

V_L : volume inicial de lodo a ser desaguado (L);

V_{FIL} : volume de filtrado obtido no desaguamento (L);

Equação 8: Taxa de aplicação hidráulica média no geotêxtil

$$TAH_{BAG} = \frac{\left(\frac{V}{T} \right)}{A} \cdot 86,4 = \frac{\left(\frac{V_1}{T_1} \right) + \left(\frac{V_2}{T_2} \right)}{A} \cdot 86,4$$

Em que:

TAH_{BAG} : taxa de aplicação hidráulica média no geotêxtil ($m^3/m^2 \cdot d$);

V_1 : primeiro volume de filtrado pré-estabelecido (L);

V_2 : segundo volume de filtrado pré-estabelecido (L);

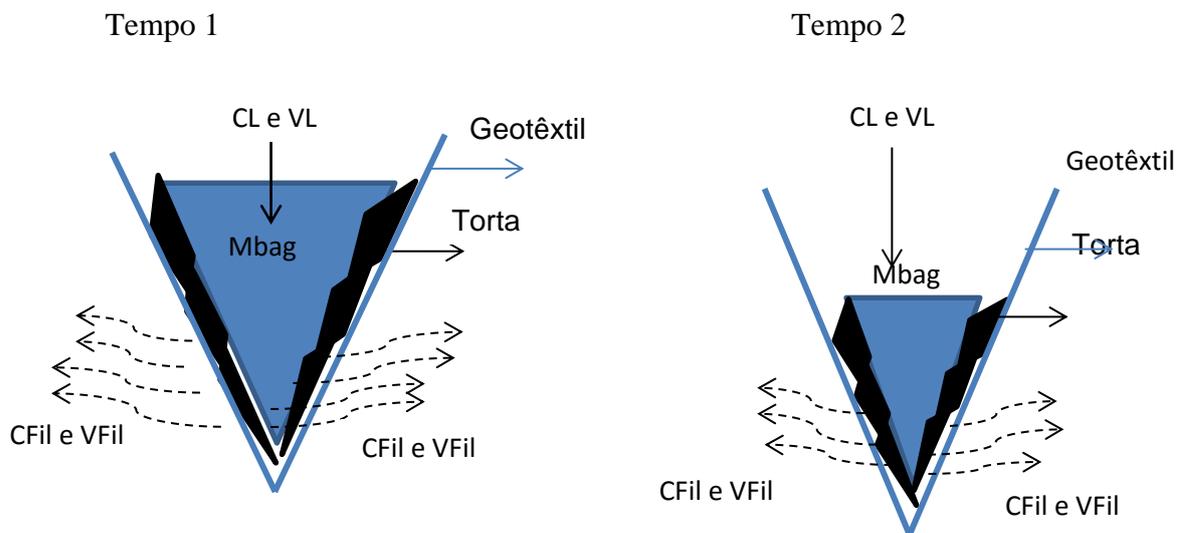
T_1 : tempo registrado para obtenção do V_1 (s);

T_2 : tempo registrado para obtenção do V_2 (s);

A : área superficial dos protótipos de geotêxtil de bancada (cm^2);

A seguir, apresenta-se o desenho esquemático dos índices mencionados (Figura 16).

Figura 16: Desenho esquemático dos índices que participam do processo de desidratação do lodo da Vila da Barca.



Fonte: Adaptado de K. B. Cantrell, J. P. Chastain, K. P. Moore (2008)

Em que:

CL: Concentração do lodo bruto;

VL: Volume do lodo bruto;

CFil: Concentração do Filtrado;

VFil: Volume do Filtrado;

Mbag: Massa do geotêxtil.

4.6.3 Taxa de filtração (TF)

A filtração, segundo Di Bernardo (2005), é um processo onde a passagem rápida de água drenada deve, de preferência, ser realizada com ação de profundidade, pois caso contrário gerará carreiras de filtração curtas, com baixa produção efetiva de água.

Para a determinação da taxa de filtração de lodo deve haver um monitoramento com intervalo de tempo cronometrado de líquido recolhido em proveta graduada, nos intervalos de tempo pretendidos. Este é um ensaio reproduzível e que pode ser realizado quantas vezes se

achar necessário coletar um determinado volume de líquido que sirva para verificar o tempo que leva para completa filtração até se obter uma quantidade de dados satisfatórias para análise da taxa de filtração.

Para a determinação da taxa de filtração do lodo da Vila da Barca, houve um monitoramento com intervalo de tempo cronometrado de líquido recolhido em proveta graduada, em dois momentos pré-estabelecidos:

- 1º) Quando o intervalo de tempo para a coleta do filtrado atingir volume de 300 mL;
- 2º) Quando o intervalo de tempo para a coleta de filtrado atingir volume de 600 mL.

4.6.4 Relação $DQO_{\text{filtrada}} / DQO_{\text{não filtrada}}$

Esta relação serve para verificar no material estudado a interação entre a fração de matéria orgânica dissolvida e a total. Indica a predominância de material solúvel, ou seja, de material dissolvido na amostra.

A partir do líquido filtrado coletado, determinou-se a DQO que deve ser dividida em duas frações:

- 1 DQO_{filtrada} - O filtrado produto do desaguamento do lodo deve passar por filtração à vácuo com uso de membrana de papel, no líquido desta filtração é analisada a DQO;
- 2 $DQO_{\text{não filtrada}}$ - O filtrado produto do desaguamento do lodo é usado sem a filtração à vácuo para a análise de DQO.

A partir dos resultados destas duas análises a relação vai nos apresentar valores que indicam quantidade de matéria orgânica presente sendo fácil ou de difícil degradabilidade.

4.6.5 Relação DQO/DBO.

Esta é uma relação indireta e informa sobre a degradabilidade contida no material analisado.

Por ser um poluente comumente encontrado em águas residuais, efluentes e no próprio lodo, a matéria orgânica é medida através das análises de Demanda química de oxigênio (DQO) e Demanda bioquímica de oxigênio (DBO). A DQO é uma análise mais rápida e que detecta faixa de constituintes inorgânicos e orgânicos presentes na amostra estudada. Já a DBO é mais demorada geralmente 5 dias para obter seus resultados, abrange a leitura dos materiais orgânicos geralmente biodegradáveis, servindo como parâmetro para o controle de

qualidade do efluente para lançamento em corpo hídrico, porém depende da leitura inicial da DQO da amostra para ser realizada.

4.6.6 Relação DQO/COT

Em amostras líquidas, a quantidade de carbono elementar é desprezível e somente a quantidade de carbonos orgânicos e inorgânicos é considerada. Somados constituem a totalidade de carbono presente em meio aquoso ou carbono total (CT).

Na água a determinação dos resultados de carbono orgânico tem sua importância no diagnóstico para a utilização de água purificada (AP) e para a injeção desta mesma água (API). Benedetti (2012) explica que os resultados de COT neste caso servem como um dos requisitos a serem atendidos quanto à avaliação da qualidade da água.

Além disso, outras funções para a análise de carbono orgânico em uma amostra são: contaminação de água por compostos sintéticos, fluxo de carbono no sistema, presença de contaminantes biológicos pela formação de biofilmes, mau estado de conservação e ineficiência de um sistema de purificação.

Em esgotos ou lodo, a análise de carbono orgânico total é uma determinação indireta para determinação de matéria orgânica presente em uma amostra, sendo preferencialmente aplicada para amostras com pequenas concentrações deste material. Serve para diferenciar o tipo de matéria orgânica presente no material estudado já que ambas as variáveis analisam a presença de matéria dissolvida.

Se a análise da eficiência de um sistema de tratamento na remoção de matéria orgânica for feita apenas com base na DQO, deve-se considerar que compostos inorgânicos reduzidos, tanto na forma dissolvida quanto particulada, podem contribuir significativamente para a DQO (CHERNICHARO *et al.*, 2006).

A relação com a demanda química de oxigênio (DQO) está diretamente relacionada às frações de matéria orgânica presentes na amostra estudada. Esta relação em águas residuárias apresenta valores máximos entre 3 e 3,5 (Henze e Comeau, 2008).

4.6.7 Relação SST/ST

Esta relação serve para avaliar a presença de sólidos, caracterizando-o quanto à sua forma (particulado ou dissolvido). Quanto maior for a relação, maior a quantidade de material particulado presente na amostra estudada.

A presença de sólidos suspensos em uma amostra favorece o aumento nos resultados das variáveis como cor e turbidez o que dificulta os processos de tratamento, gerando um material com qualidade comprometida, não sendo, por exemplo, um efluente com características adequadas ao lançamento ao meio ambiente de acordo com padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais competentes.

4.6.8 Relação SSV/SST

A relação entre sólidos suspensos voláteis e sólidos suspensos totais (SSV/SST) indica a origem do material estudado (fração orgânica ou inorgânica). Quanto maior esta relação, maior será a quantidade de matéria orgânica, sendo esta a responsável pelo mau odor do lodo.

De acordo com Von Sperling (2002), os valores médios da relação SSV/SST encontram-se na faixa de 0,6 a 0,75. Esgoto com baixa concentração de sólidos suspensos proporciona o aumento da relação de SSV/SST no lodo, pois segundo o mesmo autor, para idade de lodo muito avançadas (acima de 30 dias) esta relação aumenta devido a quantidade de sólidos suspensos ao longo do tempo ir diminuindo.

4.6.9 Relação DBO:N:P

A relação entre demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio (N) e fósforo representa a correlação entre os principais nutrientes na composição de um lodo de esgoto, informa sobre o potencial do lodo ser tratado por via biológica aeróbia.

Para analisar uma amostra e saber se esta apresenta quantidades satisfatórias de cada um destes nutrientes sem perigo de alterar a qualidade do ambiente que receberá este material, a relação DBO:N:P é utilizada a fim de que se respeitem as concentrações pré-definidas para cada uma destas variáveis.

Para que o tratamento de efluentes seja eficiente, como regra geral, a relação mássica entre os nutrientes deve obedecer a relação: $DBO : N : P = 100 : 5 : 1$, ou seja, para cada 100 g de matéria orgânica (DBO) presente no efluente (para este caso, no lodo) são necessários 5 g de nitrogênio (N) e 1 g de fósforo (P).

A aplicação de lodo em função da quantidade de N necessária para o desenvolvimento das culturas pode alterar o comportamento do fósforo (P) em virtude de sua acumulação no solo (COSTA, 2008).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação de todos os dados coletados durante a fase de testes da Unidade de Bancada para Desaguamento de Lodo (UBDL) encontram-se neste capítulo. Dividiu-se os resultados nos seguintes itens:

- Caracterização, onde as variáveis analisadas no lodo da Vila da Barca estão mensuradas e a comparação com valores em outras ETEs;
- Caracterização do filtrado no processo de desidratação do lodo em bancada com a apresentação das 24 variáveis analisadas;
- Caracterização da torta resultante dos ensaios de desidratação
- Balanço de massa da torta;
- Análise estatística das variáveis analisadas na caracterização do lodo.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO BRUTO

Os resultados referentes à caracterização do lodo bruto da ETE Vila da Barca estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Caracterização do lodo bruto da ETE Vila da Barca e de outras ETEs.

	PESQUISA ATUAL	PEREIRA (2013)	PROSAB (2001)
VARIÁVEIS	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA
SST (mg/L)	61.875	12.139	74.100
SSF (mg/L)	32.711	5.174	36.800
SSV (mg/L)	29.165	7.005	37.300
SSV/SST (%)	52	60	50
ρ (g/mL)	1,03	1,02	1,02
TU (%)	94	99	91
TS (%)	6	1,2	9
SD (mL/L)	1.000	332	614

Os valores da relação SSV/SST igual a 0,52, encontram-se em conformidade com as concentrações geralmente apresentadas para o lodo bruto de esgoto de reator UASB entre 0,78 e 0,87 (OLIVEIRA e FORESTI, 2004). O lodo analisado, portanto, apresenta estabilidade, devido grande parte da matéria orgânica ter sido digerida ainda dentro do UASB já que este possui idade do lodo (θ_c) de 423 dias considerando a concentração de SSV

presente no efluente do reator UASB igual a 23 mg/L, média de SSV no lodo do fundo do reator de 29.164,0 mg/L e vazão de projeto igual a 6 L/s.

Os valores presentes nesta ETE nos informam que o longo tempo de permanência do lodo no reator UASB degradou grande quantidade de matéria orgânica devido não existir procedimento sistematizado para descarte de lodo de excesso fazendo que ocorra acúmulo deste material por períodos superiores aos 423 dias, isso para a vazão de projeto do reator e SSV no efluente de aproximadamente $23 \pm DP$ mg/L, caracterizando como lodo “velho”, o que explica os baixos valores para a relação SSV/SST.

Vincent *et al.* (2012) apresenta, em seu estudo, valores para sólidos voláteis em lodo de esgoto doméstico equivalentes a 21.300 mg/L próximos aos encontrados na ETE Vila da Barca. Valores para sólidos totais são encontrados na faixa de 31.000 mg/L (ASTALS *et al.*, 2012), porém o lodo bruto do nosso estudo apresentou maiores concentrações deste parâmetro devido ser proveniente do fundo do reator UASB. Há estudos, no entanto, que apresentam valores médios de sólidos totais e voláteis de 87.400 mg/L e 48.769 mg/L (PONTES, 2003) não muito distantes dos valores obtidos.

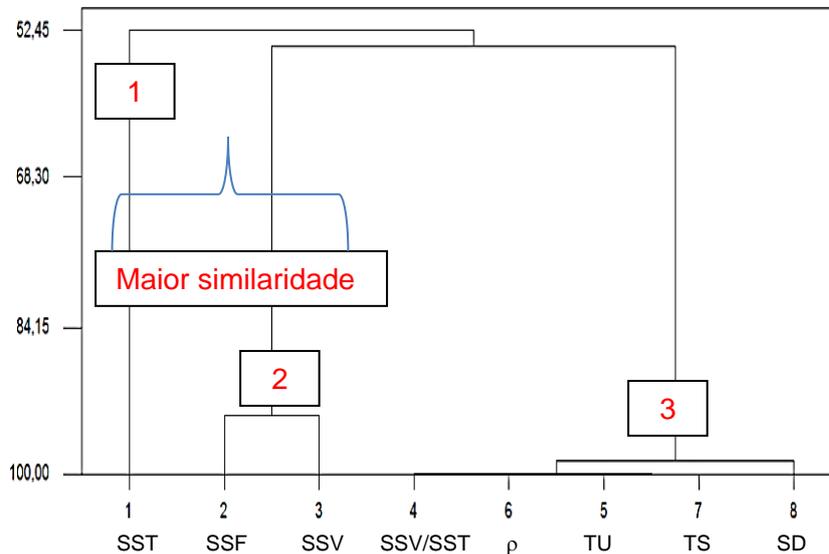
A concentração de sólidos totais e voláteis da ETE Vila da Barca na primeira etapa das coletas apresentou porcentagens de 4,0% e 2,1%, respectivamente. Já na segunda etapa este percentual teve um significativo aumento com valores entre 8,5% e 3,7%. Isso porque o tempo de permanência do lodo no reator na segunda etapa foi maior se comparado à primeira, o que permitiu o aumento da concentração dos sólidos, justificando assim os valores encontrados.

Os valores encontrados nas análises de sólidos suspensos (totais, fixos e voláteis) na ETE Vila da Barca no estudo de Pereira (2013) estão bem abaixo dos verificados em nossas análises, pois se baseou na amostragem feita em camadas ao longo da altura do reator UASB o que permitiu a coleta de um lodo menos concentrado em relação aos sólidos, tendo por isso maior teor de umidade.

A análise de agrupamento hierárquico ou de “Cluster” mostrou uma pequena variação dos valores de distância euclidiana das frações de sólidos, considerando este como um grupo com características parecidas e alto grau de similaridade entre si como apresenta a Figura 17.

Figura 17: Dendograma de agrupamento hierárquico entre as variáveis do lodo no fundo e em camadas ao longo da altura do reator UASB.

Comparativo entre as variáveis do lodo bruto do fundo do UASB e em camadas



O gráfico da Figura 16 foi elaborado a partir da matriz de dados padronizados da Tabela 5, pela análise de agrupamento, fazendo um comparativo com os valores médios das variáveis, obtidos no estudo do lodo em dois pontos de coleta do UASB, um no fundo e o outro em camadas ao longo da altura deste reator na ETE Vila da Barca.

A formação de três grupos com as oito variáveis (exceto metais) estão apresentadas na análise de “Cluster” (Figura 16), onde mostrou uma coerente separação das características físico-químicas do lodo com o primeiro grupo contendo os sólidos totais, o segundo com sólidos fixos e voláteis e o terceiro com as demais variáveis. Os dois primeiros grupos apresentam unidades com maior similaridade entre si por isso a disposição destes no dendrograma encontra-se mais organizada, já o terceiro grupo mostra as variáveis mais dispersas demonstrando menor nível de semelhança entre si.

Em termos sanitários, isso quer dizer que o lodo analisado possui características que atendem aos padrões estabelecidos em legislação para o uso do lodo em atividades agrícolas e outras formas de (re) uso que requeiram como critério baixas concentrações de metais em sua constituição.

Na caracterização do lodo de esgoto de reator anaeróbico de leito fluidizado (RALF) da ETE Padilha Sul em Curitiba, as porcentagens encontradas para sólidos totais e voláteis corresponderam a 42,6% e 2,5%, respectivamente (BITTENCOURT *et al.*, 2012). Como esta ETE apresenta uma contribuição muito superior à ETE Vila da Barca (tem uma capacidade

para atender aproximadamente 300.000 habitantes), justifica-se os valores mais elevados. Os demais valores apresentam-se dentro da faixa esperada para lodo bruto conforme a literatura (LUDUVICE, 2007; ASTALS *et al.*, 2012).

Na caracterização química referente às análises de metais no lodo bruto foram obtidos os seguintes valores (Tabela 7).

Tabela 7: Teor de metais encontrados no lodo bruto da ETE Vila da Barca.

AMOSTRAS	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Teor encontrado (mg/Kg, base seca)							
A 1	238	2,49	48	147	12	34	934
A 2	228	2,12	40	135	12	32	853
CONAMA 375/06 (VMP)	1300	39	1000	1500	420	300	2800
Environmental Protection Agency, 2007 (VMP)	---	85	---	4300	420	840	7500

As amostras A estão em duplicata e referem-se à primeira coleta de lodo.
VPM- Valor máximo permitido

Na Vila da Barca, por se tratar de um empreendimento habitacional onde as atividades domésticas geram resíduos com baixas concentrações de frações inorgânicas como os metais, não é percebido contribuição significativa deste material (WANG *et al.*, 2013), justificando assim as baixas concentrações de metais pesado encontradas neste lodo.

As faixas de concentrações de cromo no lodo da Vila da Barca estão bem abaixo dos valores máximos permitidos pela legislação CONAMA 375/06 e do que mostra a literatura (ALCÂNTARA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2009; HAN *et al.*, 2012), logo a preocupação neste caso é bem menor com relação aos efeitos colaterais como risco de oxidação do cromo a uma forma mais tóxica (cromo VI) o que causaria a contaminação do solo e da água. Porém, o monitoramento dos metais deve ser periódico a fim de que as concentrações sejam mantidas dentro desta faixa.

As baixas concentrações de Pb encontradas conferem caráter satisfatório para este metal se comparado com valores geralmente apresentados em estudos de caracterização química de lodo de esgoto (JECFA, 1993; MELO *et al.*, 2004; HAN *et al.*, 2012) possibilitando ao lodo da Vila da Barca ser utilizado e (re) inserido ao meio ambiente, após seu devido tratamento.

De acordo com os valores máximos permitidos para metais em lodos de esgoto sanitário pela Resolução CONAMA 375/06 e pelo *Code of Federal Regulations Part 503*

(Environmental Protection Agency, 2007), os resultados mostraram-se satisfatórios e em conformidade para os elementos estudados na ETE Vila da Barca, o que ratifica a presença predominante de material orgânico que compõe o esgoto doméstico tratado nesta estação de tratamento, não apresentando à princípio risco à saúde humana. Esta informação é importante uma vez que uma das principais dificuldades de se destinar adequadamente o lodo se deve à presença de patógenos e de metais pesado em grandes concentrações (HAN *et al.*, 2012).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DESIDRATADO EM GEOTÊXTIL

Após o processo de desidratação do lodo, foram obtidos dois produtos: o material filtrado e o material sólido retido no geotêxtil. Na análise da eficiência da desidratação de lodo em geotêxtil, necessita-se do conhecimento de parâmetros para comparação com os resultados das variáveis obtidas através de técnicas laboratoriais.

Os valores encontrados para algumas das variáveis analisadas serão discutidos a partir da relação ótima entre essas. Os demais serão analisados separadamente e comparados com os valores expressos em legislação e outros trabalhos.

5.2.1 Índice de Langelier (IL)

Nesta pesquisa obteve-se um líquido gerado a partir do condicionamento do lodo da Vila da Barca com Policloreto de Alumínio (PAC) e Polímero catiônico orgânico é de suma importância que se conheça a qualidade desta água para comprovar a eficiência do método de desidratação por geotêxtil com uso de produtos químicos e a produção de um efluente com características adequadas para lançamento em corpo hídrico ou outro tipo de aproveitamento sem oferecer riscos ao ambiente. Para os três primeiros filtrados do terceiro ensaio (escolhido por ter apresentado melhores resultados de filtração (Ver Tabela 3), obteve-se um índice de Langelier, como apresenta a Tabela 8:

Tabela 8: Resultados obtidos para o $\text{pH}_{\text{saturação}}$ e para o Índice de Langelier para os filtrados analisados.

	FILTRADO 1	FILTRADO 2	FILTRADO 3
Temperatura	25	25	25
Ph	7,25	7,21	6,91
Alcalinidade	45	30	50
Dureza	0,15	0,11	0,19
Sólidos dissolvidos totais	444,92	411,76	469,19
$\text{pH}_{\text{saturação}}$	11,09	11,4	10,95
IL	-3,84	-4,19	-4,04

IL = 0 Água estabilizada
 IL < 0 Tendência à corrosão
 IL > 0 Tendência à incrustação

De acordo com os resultados obtidos, o líquido produzido no processo de desidratação do lodo apresenta um IL menor que zero, ou seja, possui característica de efluente com tendência à corrosividade. No entanto, a pesquisa de Kellner e Mesquita (2015) apresentou índices de -2,7 para água de distribuição sendo um valor próximo aos encontrados aqui nos filtrados, com a recomendação de estabilização, com uso de alcalinizantes, do material que será descartado ao meio ambiente, permitindo a diminuição da potencialidade de corrosão com índices de Langelier próximos à zero.

5.2.2 índice de qualidade do filtrado (IQF)

O tratamento dos dados dos vinte e cinco (25) ensaios de desaguamento com geotêxtil consistiu na determinação do taxa de captura de sólidos (R); fator de concentração do lodo (FC), balanço de massa e de volume, taxa de aplicação hidráulica (TAH_{BAG}) e índice de Qualidade do Filtrado (IQF) para que possa se definir a melhor condição operacional (concentração do lodo bruto e dosagem de polímero) para desaguamento de lodo de excesso da ETE Vila da Barca por geotêxtil mediante uso da força gravitacional.

A determinação das variáveis de caracterização usadas nos ensaios de desaguamento com geotêxtil em bancada levaria tempo considerável para obtenção dos resultados, sem mencionar no custo significativo para obter tais informações para os 25 ensaios.

A Tabela 9 apresenta os valores das componentes principais das variáveis sólidos totais, cor aparente e turbidez, geradas na planilha da análise estatística, que foram escolhidas para compor este índice devido a praticidade e rapidez na obtenção dos resultados.

Tabela 9: Dados estatísticos de componentes principais para obtenção do IQF.

Variável	PC1	PC2	PC3
ST	0.576	- 0.590	- 0.566
Turbidez	0.539	0.794	- 0.280
Cor aparente	0.615	- 0.144	0.775
Autovalor	2.5093	0.4205	0.0702
Porcentagem da variância explicada (%)	0.836	0.140	0.023
Porcentagem da variância acumulada (%)	0.836	0.977	1.000

A partir da Equação 9 podemos calcular o IQF colocando como variáveis independentes os valores encontrados da componente principal (CP1) em função das variáveis ST, cor aparente e turbidez.

Equação 9: Cálculo do índice de qualidade do filtrado (IQF).

$$IQF = 0,576.ST + 0,539.Turbidez + 0,615.Cor$$

A análise completa dos filtrados obtidos nos 25 ensaios, está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10: Resumo dos principais resultados obtidos nos ensaios de desaguamento com geotêxtil em bancada com lodo da ETE Vila da Barca (PA).

ID DO ENSAIO ¹	D ² (-)	R ³ (%)	FC ⁴ (-)	[M _{BAG} ⁵] (mg/L)	E(% ⁶) m	V _{BAG} ⁷ (mL)	E(% _v) ⁸	TAH _{BAG} ⁹ (m ³ /m ² .d)	IQF ¹⁰ (-)
ENSAIO1-DOS1	1	98,26	3,15	59.541,690	99,0	310	31	5,07	748,48 (23)
ENSAIO1-DOS2	1	98,39	3,20	59.451,540	99,0	160	16,08	3,86	724,24 (22)
ENSAIO1-DOS3	1	98,39	3,01	59.333,340	98,5	40	4	4,58	721,33 (21)
ENSAIO1-DOS4	1	98,26	3,13	59.239,440	98,0	20	2	3,95	787,89 (25)
ENSAIO1-DOS5	1	98,35	3,18	59274480	98,0	5	0,5	2,80	773,16 (24)
ENSAIO2-DOS1	2	97,65	5,54	29644230	98,0	310	31	5,50	558,48 (18)
ENSAIO2-DOS2	2	97,63	5,76	29533830	98,0	160	16,32	9,46	569,77 (19)
ENSAIO2-DOS3	2	97,55	5,81	29425230	98,0	40	4	11,00	575,33 (20)
ENSAIO2-DOS4	2	97,69	5,80	29458600	98,0	30	3	8,20	544,40 (17)
ENSAIO2-DOS5	2	97,74	5,84	29465370	98,0	20	2	11,90	524,94 (16)
ENSAIO3-DOS1	2,5	98,62	10,32	23683510	98,0	140	14	10,96	275,58 (08)
ENSAIO3-DOS2	2,5	98,88	10,69	23686800	98,0	100	10	11,16	235,08 (03)
ENSAIO3-DOS3	2,5	98,58	10,68	23598600	98,0	60	6	12,17	295,48 (12)
ENSAIO3-DOS4	2,5	98,39	11,16	23738550	98,5	50	5	10,02	304,98 (15)
ENSAIO3-DOS5	2,5	98,53	11,21	23761050	98,5	25	2,5	13,98	292,36 (11)
ENSAIO4-DOS1	4	97,29	10,43	14784855	98,0	310	31	19,32	272,27 (06)
ENSAIO4-DOS2	4	97,17	10,85	14707695	98,0	160	16	18,29	288,38 (09)
ENSAIO4-DOS3	4	97,15	10,23	14654535	97,0	40	4	28,17	290,66 (10)
ENSAIO4-DOS4	4	97,51	9,71	14702625	97,5	30	3	21,13	257,30 (05)
ENSAIO4-DOS5	4	97,19	10,12	14647605	97,0	10	1	9,39	298,13 (14)
ENSAIO5-DOS1	5	97,06	13,87	11808840	98,0	310	31	18,29	237,07 (04)
ENSAIO5-DOS2	5	97,28	14,24	11777580	98,0	160	16	17,44	223,95 (02)
ENSAIO5-DOS3	5	97,42	13,82	11754540	97,5	40	4	18,06	220,63 (01)
ENSAIO5-DOS4	5	96,72	12,95	11666000	97,0	20	2	11,57	274,31 (07)
ENSAIO5-DOS5	5	97,03	13,75	11696532	97,0	4	0,4	14,68	296,94 (13)

NOTA: 1) ID DO ENSAIO: BAG01-DOS01, BAG01-DOS02, BAG01-DOS03, BAG01-DOS04, BAG01-DOS05 referem-se à relação de 2, 4, 6, 8 e 10g P/kg lodo, respectivamente. O entendimento é idêntico para os demais ensaios; 2) Fator de diluição aplicado em relação a concentração de lodo bruto a ser desaguado; 3) Percentual de recuperação dos sólidos nos geotêxteis; 4) Fator de concentração de lodo (%); 5) Massa em termos ST retida no geotêxtil (g); 6) Eficiência do desaguamento do geotêxtil em termos de redução de massa (%); 7) Volume de lodo retido no geotêxtil (L); 8) Eficiência do desaguamento do geotêxtil em termos de redução de volume (%); 9) Taxa de aplicação hidráulica média no geotêxtil (m³/m².d); e 10) Valores em parênteses são relativos a ordem de classificação do IQF.

De acordo com a análise estatística das multivariadas, os dados da componente principal 1 (PC1) mostram que todas três variáveis (ST, Turbidez e Cor aparente) são importantes para o cálculo do IQF, fato confirmado pelos valores numéricos dos respectivos coeficientes da combinação linear, que representam o nível de significância de cada variável na determinação do índice. O maior valor de coeficiente da combinação refere-se a variável Cor aparente.

Verifica-se que a porcentagem de variância total explicada é de 83,6% para PC1, 14,0% para PC2 e de 2,3% para PC3, demonstrando que a componente 1 possui a maior porcentagem de relevância (84%) com o conjunto de informações mais importantes para a explicação do IQF.

O terceiro ensaio foi o escolhido para ser o representativo da desidratação de lodo em geotêxtil por apresentar um filtrado de boa qualidade e torta com características apropriadas a outros usos após higienização.

Os resultados apresentados na Tabela 9 demonstram a partir da interação de outras variáveis, como o fator de concentração do lodo e taxa de aplicação hidráulica do lodo, a construção do cálculo do índice de qualidade do filtrado obtido da desidratação do lodo.

A classificação de cada filtrado representa a qualidade principalmente das características físicas (ST, Turbidez e cor) do líquido coletado na proveta graduada. Os últimos ensaios foram os que apresentaram melhores índices de qualidade de filtrado. Isso porque o lodo utilizado na desidratação, nestes casos, teve sua concentração diminuída. Como em cada ensaio houve a variação da concentração inicial do lodo bruto que foi gradativamente sendo diminuída ao longo dos ensaios é entendido que a qualidade final do filtrado tenha sido as melhores nos últimos ensaios.

No entanto, a configuração mais interessante é aquela onde a concentração do lodo a ser desaguado não seja tão baixa, primeiro para aumentar a eficiência de desaguamento e segundo para manter as características iniciais de material proveniente de reator anaeróbio cuja concentração já é conhecida em literatura e deve ser respeitada.

O ensaio 3 apresentou bons IQFs (apesar do índice de primeira classificação não estar presente neste ensaio) mesmo com uma concentração inicial de 24.106 mg/L foi escolhido como teste padrão para o caso específico da desidratação do lodo da ETE Vila da Barca-PA.

As características físico-químicas deste filtrado apresentaram resultados satisfatórios quanto aos parâmetros estabelecidos para lançamento em corpos hídricos pela Resolução CONAMA 375/06, com pouca possibilidade de comprometimento ou alteração da qualidade do ambiente que receber este líquido tratado.

5.2.3 Taxa de filtração (TF)

Para o caso específico desta pesquisa, utilizou-se o geotêxtil, como material de filtração, com formato de cone com altura de 16,5 cm, circunferência de 40 cm e geratriz de 20 cm, para a realização da filtração-desaguamento do lodo da ETE Vila da Barca.

A filtração aqui ocorre por ação da gravidade, o líquido flui devido a existência de uma coluna hidrostática. A taxa de filtração está relacionada com a velocidade que determinado volume de lodo passa em um material de filtração (neste caso o geotêxtil) com a coleta de água com baixo teor de sólidos em suspensão.

Em cada teste fora utilizado uma dosagem específica de polímero, o que determinou a variação dos intervalos de tempo para a coleta dos volumes mencionados (Tabela 11).

Tabela 11: Taxa de filtração (TF) para a coleta de volume específico do filtrado em cada teste de desidratação.

	Dosagem polímero (mg/L)	Tempo de coleta 300mL(s)	TF m ³ /m ² .d	TF mL/s	Tempo de coleta 600mL(s)	TF m ³ /m ² .d	TF mL/s
Filtrado 1	48,5	9'	12,07	33,33	24'	9,05	25
Filtrado 2	97	9'	12,07	33,33	22'	9,87	27,27
Filtrado 3	145,5	8'	13,58	37,5	22'	9,87	27,27

O filtrado 2 mostrou melhores resultados na capacidade de filtração do lodo líquido em geotêxtil com uma dosagem de 97 mg/L de polímero catiônico, pois neste caso a formação de flocos foi mais eficiente e com grânulos maiores (Figura 18).

Figura 18: Qualidade dos flocos formados no segundo teste com a obtenção do filtrado 2 na proveta.



5.2.4 Relação $DQO_{filtrada}/DQO_{n\tilde{a}o\ filtrada}$

Nas análises de Demanda química de oxigênio (DQO) para os 3 filtrados, obteve-se resultados parecidos (Tabela 12). A fim de verificar a eficiência de cada dosagem de polímero e PAC, realizou-se duas análises de DQO uma com o produto da filtração em membrana de papel e a outra sem filtração. A partir destes resultados foi feita a relação da $DQO_{filtrada}$ e $DQO_{n\tilde{a}o\ filtrada}$.

Tabela 12: Valores de DQO obtidos nos filtrados do sistema de desaguamento de lodo.

	DQO (mg/L)	DQO _{filtrada} (mg/L)	DQO _{filtrada} / DQO
Filtrado 1	281	214	0,76
Filtrado 2	289	256	0,89
Filtrado 3	323	272	0,84

A partir do líquido filtrado coletado determinou-se a DQO. Segundo APHA *et al.*, (1985), esse líquido filtrado fornecerá a concentração de sólidos totais dissolvidos, o que conduziu a denominação de DQO dissolvida.

A relação de $DQO_{filtrada}/DQO$ para o filtrado 1 foi a menor relação entre os filtrados analisados. Um dos motivos seria que para esta situação foi usado um lodo com maior concentração.

A melhor eficiência de remoção de DQO ocorreu no primeiro material filtrado que por possuir uma grande quantidade de matéria orgânica e nos processos de condicionamento e filtração no geotêxtil, conseguiu diminuir consideravelmente esta parcela do material, retendo parte da matéria orgânica obtendo assim um filtrado com DQO reduzida.

Quanto a eficiência de remoção de DQO, Kassab *et al.*, (2010) apresentam valores menos expressivos em relação aos encontrados aqui (64% em comparação com os 98% que conseguiu-se obter na desidratação em geotêxtil). Isto comprova o bom desempenho de desaguamento de lodo em membrana geotêxtil, resultando em um filtrado com condições adequadas para lançamento em corpo hídrico.

5.2.5 Relação DQO/DBO.

Para a comparação entre as relações de DQO e DBO em cada um dos filtrados (Tabela 13), usaremos Henze e Comeau (2008) como referência.

Tabela 13: Relação entre DQO e DBO nos filtrados do desaguamento do lodo.

	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	DQO/DBO	DQO/DBO (Henze e Comeau, 2008)
Filtrado 1	74,0	281,0	3,9	2,5 - 3,5 Valores máximos encontrados em águas residuais
Filtrado 2	84,0	288,5	3,5	
Filtrado 3	82,0	323,0	3,9	

Nos filtrados 1, 2 e 3, os valores para a relação DQO/DBO encontram-se próximos do que geralmente é encontrado em amostras de águas residuais (Henze.e Comeau, 2008). No entanto, sabe-se que para o lodo estes valores são bem maiores devido à concentração de matéria orgânica ser elevada. Para Von Sperling (2005), esta relação varia entre 1,7 a 2,4 em esgoto bruto, porém à medida que este passa pelas unidades de tratamento, até chegar o produto final do tratamento (o lodo), ocorre uma redução na fração de fácil degradabilidade, o que aumenta esta relação. O mesmo autor ainda divide esta relação de acordo com o grau de degradação da matéria orgânica (Tabela 14).

Tabela 14: Relação DQO/DBO e o grau de degradabilidade da matéria orgânica

GRAU RELAÇÃO DQO/DBO	VALORES	Tipo de tratamento
Baixa	<2,5	Biológico
Intermediária	2,5 a 3,5	Estudo de tratabilidade
Alta	>3,5	Físico-químico

Fonte: Von sperling et al., 2001.

Para o caso desta pesquisa, valores para esta relação encontram-se com matéria orgânica de difícil degradabilidade por isso os valores da relação foram altos.

Devido aos resultados para estas relações terem valores próximos um dos outros, isto mostra uma homogeneidade das amostras estudadas a partir do desempenho positivo da eficiência do desaguamento do lodo no geotêxtil e indica que parte da matéria orgânica presente é de difícil degradabilidade por isso ainda é encontrada no filtrado. Apesar disso, o arraste de parcela deste material para o filtrado não teve grande significância quanto ao comprometimento da qualidade final deste líquido.

5.2.6 Relação DQO/COT.

Para os filtrados do lodo da Vila da Barca foram obtidos valores médios no terceiro ensaio de 29, 25 e 19 para esta relação nos filtrados 1, 2 e 3, respectivamente.

Os elevados valores, possivelmente, estão condicionados às altas concentrações de material com difícil degradabilidade ou até mesmo inorgânico presente nos filtrados como mostram os valores de DQO obtidos (Tabela 15).

Tabela 15: Resultados da DQO e relação DQO/COT nos filtrados estudados.

	DQO mg/L	DQO/COT
Filtrado 1	281	29
Filtrado 2	288	25
Filtrado 3	323	19

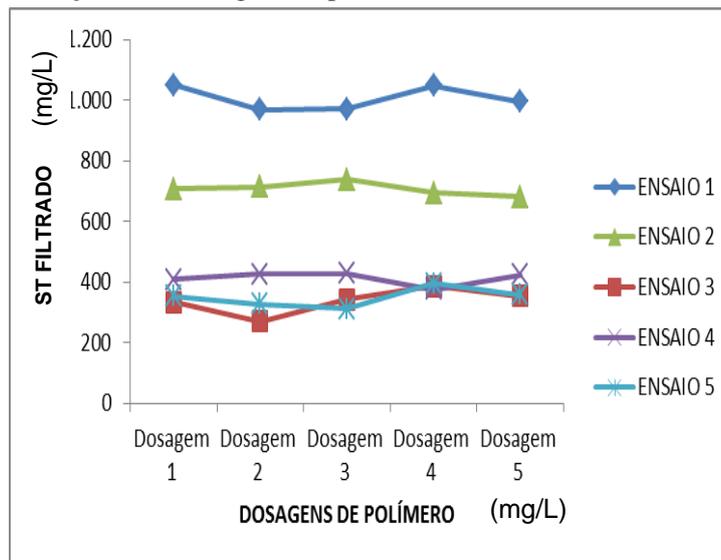
Percebe-se que os altos valores das frações orgânica e inorgânicas apontadas nas DQOs 221 mg/L, 289 mg/L e 330 mg/L e os baixos valores de Carbono orgânico total (COT) 10, 11 e 17, fizeram com que a relação de DQO/COT aumentasse consideravelmente.

O primeiro filtrado apresentou a maior relação DQO/COT entre os 3 estudados, indicando alta participação da remoção física dos sólidos e matéria orgânica neste desaguamento, indicando que grande parte do material dissolvido foi retido no geotêxtil. Os demais filtrados apresentaram uma concentração maior de carbono orgânico e menores relações DQO/COT isso porque o carbono orgânico total é constituído de frações orgânicas dissolvidas que não são filtráveis em membranas de 45 µm, sendo transferido no produto do desaguamento, aumentando assim a concentração deste elemento.

5.2.7 Relação SST/ST

Valores de ST encontrados nos filtrados em geotêxtil (491 mg/L, 466 mg/L e 540 mg/L nos filtrados 1, 2 e 3 respectivamente) mostraram que a eficiência do método de desaguamento em geotêxtil é válida e deve, sempre que possível, ser analisada a possibilidade de sua utilização. De acordo com a dosagem de polímero utilizada no condicionamento, existe uma variação dos sólidos totais encontrados nos filtrados, como mostra a Figura 19.

Figura 19: Relação ST e dosagem de polímero no filtrado



As dosagens vão aumentando ao longo do eixo das abscissas (dosagem 1 menor que a dosagem 2, menor que a dosagem 3, assim por diante). Para as dosagens de polímeros, foram encontradas oscilações nos valores de sólidos totais, sendo que na dosagem 4 a maioria dos filtrados apresentou um aumento de concentração na variável sólido, apenas o filtrado do segundo ensaio demonstrou uma queda nesta concentração. Isto mostra que para uma elevada concentração inicial de lodo bruto (30.133 mg/L) a reação com a dosagem de 241 mg/L de solução de polímero não é eficiente para a redução dos sólidos totais no filtrado, alterando a qualidade final deste.

Para o estudo de desidratação de lodo anaeróbio em geotêxtil, foram conseguidos os valores de 9%, 13% e 12% para os três filtrados obtidos. Esta relação para desaguamento em centrífuga geralmente é maior, variando entre 35% e 40% (GONÇALVES e LUDUVICE, 2000). Em estudo de desidratação de lodo anaeróbio em centrífuga tipo Decanter, conduzido junto à ETE Padilha – Curitiba/PR, Aisse e Andreoli (1998) obtiveram filtrado com uma concentração média de ST de 26.958 mg/L, considerada elevada devido a ausência de polieletrólitos para o pré-condicionamento do lodo.

5.2.8 Relação SSV/SST

Na Tabela 16 são mostrados os resultados encontrados para o lodo desidratado com geotêxtil em comparação com resultados de desidratação em centrífuga.

Tabela 16: Relação SSV/SST no lodo desidratado

	SSV (mg/L)	SST (mg/L)	SSV/SST	SSV/SST Andreoli <i>et al.</i> , 2001.	SSV/SST Henze e Comeau 2008.
Filtrado 1	38,08	46,58	0,82	0,3675 – 0,5030 Valores para filtrados de lodo aeróbio e de limpa fossa, respectivamente.	0,8 – 0,9 Valores máximos encontrados para águas residuárias
Filtrado 2	48,74	54,24	0,89		
Filtrado 3	61,31	70,81	0,87		

Para as relações encontradas nos filtrados provenientes da desidratação do lodo em geotêxtil se comparados aos valores encontrados por Andreoli *et al.* (2001) e Hocaoglu (2011), cuja relação SSV/SST foi de 0,66 para lodo de acumulação de biomassa, estão bem acima demonstrando presença significativa de matéria orgânica na matéria líquida. No entanto, isso já era previsto, pois a quantidade de SST no lodo bruto é elevada com uma concentração de 24.106 mg/L. Isso explica, portanto as relações com valores altos significando que existe uma parcela considerável de matéria orgânica e que para a diminuição desta relação seja necessário uma pós filtração.

De acordo com Henze e Comeau (2008), quando os sólidos em suspensão nas águas residuais têm uma componente volátil alta (relação SSV/SST) estas podem ser digeridas com êxito em condições anaeróbias.

Se compararmos os valores médios desta relação com o lodo retirado em alturas diferentes ao longo da profundidade do UASB, teremos valores próximos de 60% (PEREIRA, 2013). Esta diminuição da relação SSV/SST demonstra que ao analisar o lodo em camadas no UASB da ETE Vila da Barca a concentração de sólidos diminui consideravelmente o que provavelmente está relacionado ao fato de o reator em questão operar com cerca de 17% da capacidade hidráulica estabelecida em projeto, ocasionando uma idade de lodo muito elevada (aqui calculamos $\Theta_c = 423$ dias), isto contribui para a produção de um lodo estabilizado com relação ao seu conteúdo orgânico.

5.2.9 Relação DBO:N:P

Na Tabela 17 apresentam-se os valores de DBO, N e P encontrados nas amostras de lodo da ETE Vila da Barca.

Tabela 17: Resultados obtidos para as variáveis DBO, N e P na caracterização do lodo da ETE Vila da Barca.

	FILTRADO 1	FILTRADO 2	FILTRADO 3
DBO	74	84	82
N	5,13	18,55	16,20
P	0,17	0,1	0,09
DBO:N:P	100 : 4,53 : 0,06	100 : 9,92 : 0,03	100 : 7,85 : 0,03

O filtrado 1 foi o que apresentou valores mais próximos do que define a literatura para efluente de esgoto. Uma explicação seria o fato de o primeiro filtrado ser proveniente de lodo bruto com maiores concentrações de nutrientes e neste caso a aplicação de condicionantes como policloreto de alumínio e polímero catiônico orgânico, conseguiram estabilizar o lodo gerando um material com composição orgânica (DBO) reduzida e índices de material inorgânico controlados.

Para os outros dois filtrados, os valores estão dentro do esperado uma vez que a proporção de matéria orgânica contida no lodo bruto para desidratação era mais baixa que os resultados da parte inorgânica. Porém, isso não compromete a boa qualidade da relação DBO:N:P apresentada por estes filtrados.

A concentração de P no lodo de esgoto é muito variável, podendo compor menos de 0,1% a mais de 14% do peso seco (HEDLEY e MCLAUGHLIN, 2005). Já, nos lodos gerados nas estações brasileiras, a concentração deste elemento varia de 1,5% a 1,8% (TSUTYA *et al.*, 2001). Como este nutriente apresentou nos filtrados valores bem baixos e o fósforo em contato com a água tem a facilidade de solubilidade, o desaguamento possivelmente proporcionou a diminuição da concentração deste material. Nota-se grande parte do fósforo presente no lodo está na forma inorgânica, onde mais de 40% são ortofosfatos (KIRKHAM, 1982; HAAN *et al.*, 1996; WISCHMIER e SMITH, 1978). A baixa concentração de formas orgânicas de fósforo no resíduo deve-se ao processo de decomposição da matéria orgânica realizado pelos micro-organismos durante o tratamento do efluente (HEDLEY e McLAUGHLIN, 2005). No decorrer desse processo, a matéria orgânica é degradada, resintetizada e estabilizada de modo que o P mineralizado e orgânico permaneça concentrado no lodo.

Portanto, nesta pesquisa, como mostram os valores da relação da fração orgânica com material inorgânico, não houve a necessidade de adição de nutrientes para garantir a qualidade satisfatória do filtrado resultante da desidratação do lodo em geotêxtil, mostrando para esta condição de presença de nutrientes resultados dentro do limite de aceitação para lodo de

esgoto o que favorece a utilização deste produto para variados fins com a vantagem de não haver gastos com o acréscimo de nutrientes.

5.3 BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa foi realizado a partir da quantidade de lodo seco que ficou retido no geotêxtil ao final do processo de desidratação do lodo. A quantidade de material que entra no sistema de desidratação deve ser igual a soma dos volumes gerados no filtrado e na torta, como mostra a Figura 20.

Figura 20: Torta produzida no processo de desidratação do lodo.



A qualidade deste material correspondeu às expectativas da obtenção de uma torta com altas concentrações de sólidos totais mesmo com o teor de umidade (TU) nas primeiras horas de descanso do lodo no geotêxtil ainda ser elevado. A Tabela 18 apresenta estes valores específicos para a torta de cada uma das três dosagens do ensaio 3.

Tabela 18: Apresentação da caracterização para balanço de massa do desaguamento.

ENSAIO 3	Dosagem 1 48,5 mg/L	Dosagem 2 97 mg/L	Dosagem 3 145,5 mg/L
C_{LODO} (mg/L)	24.106	24.106	24.106
C_{Filtrado} (mg/L)	333	269	343
C_{TORTA} (mg/L)	248.700	257.800	257.450
TU (%)	99	98	95

As concentrações da Tabela 17 são em relação aos sólidos totais em cada parcela do lodo.

A desidratação foi realizada em temperatura ambiente onde o lodo despejado no cone de geotêxtil para desaguar sob a ação da gravidade e o gotejamento de filtrado na proveta graduada fora observado e cronometrado. De acordo com a observação, a ação de gotejamento parava após 2 h de iniciada a retirada de água livre do lodo. Para o teor de umidade (TU), ainda existe uma concentração alta de água nas primeiras horas da desidratação, isso ocorre porque a água livre é imediatamente liberada na desidratação, porém as águas intersticiais ainda permanecem nos poros do lodo retido no geotêxtil.

O TU tende a diminuir gradativamente com o passar do tempo, podendo cair para uma faixa de 85% em uma semana. A eficiência de desaguamento no terceiro ensaio para as 3 dosagens foram as seguintes:

ED_{dosagem 1} = 90%

ED_{dosagem 2} = 91%

ED_{dosagem 3} = 91%

As eficiências confirmam o bom desempenho da segunda dosagem no terceiro ensaio para desaguamento de lodo em geotêxtil com 91% de retenção de sólidos totais comparando as frações finais e iniciais de sólidos totais do balanço de massa do lodo desaguado. Mesmo apresentando uma eficiência igual ao da dosagem 3, o desaguamento é considerado melhor na dosagem 2 por usar menores quantidades de produto químico no processo de condicionamento do lodo, o que diminui consideravelmente o valor econômico na preparação do lodo para o desaguamento.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA: HCA E PCA

Para a comparação e avaliação dos resultados das variáveis estudadas nesta pesquisa, fora confeccionado dois gráficos representativos de análise estatística a fim de comprovar a eficiência do método de desidratação de lodo por meio de geotêxtil.

Para a análise do gráfico de componentes principais, as variáveis apresentam-se próximas de acordo com o grau de aproximação pelas características de significância no material estudado. No gráfico de análise de agrupamento de Cluster, tem a capacidade de formar grupos com as variáveis de uma série de dados e apresentar a aproximação entre estas na forma de dendograma. Neste, a série de dados que irá compor o gráfico é organizada dentro de conjuntos que acumulam dentro si as variáveis que possuem aproximação quanto às características físico-químicas e biológicas, o que facilita consideravelmente o entendimento da participação de cada uma destas variáveis na análise da amostra estudada.

Para a análise do lodo da ETE Vila da Barca foram realizadas 32 determinações para a composição da série de dados que compõem a planilha da Tabela 18 para alimentar o software de elaboração dos gráficos estatísticos gerando duas componentes principais no conjunto de variáveis analisadas (PC1 e PC2).

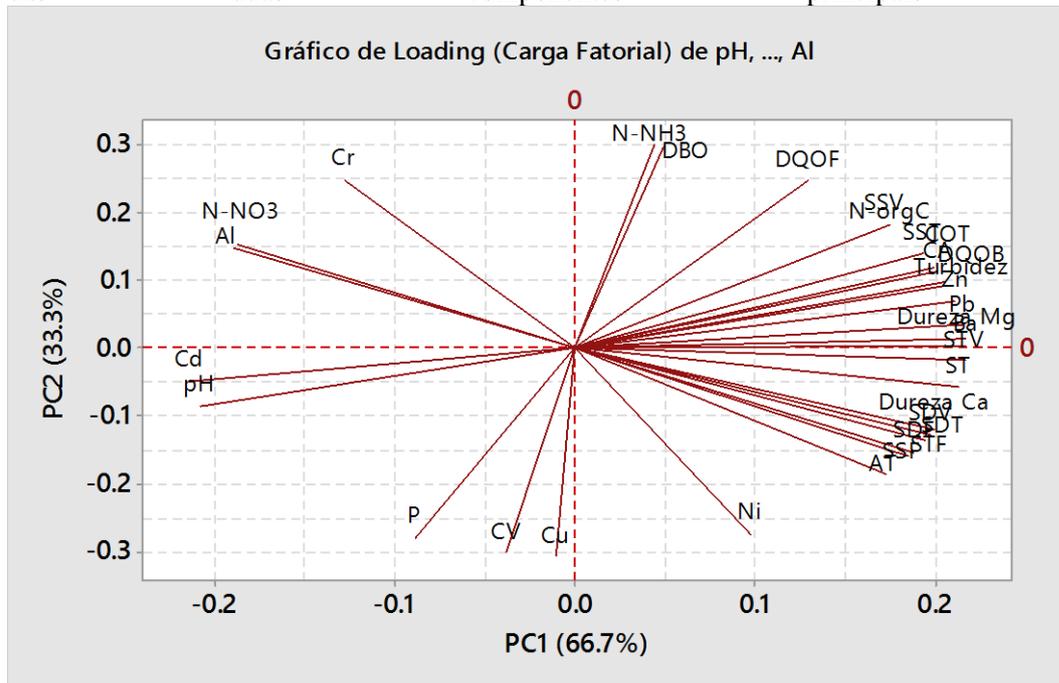
Os resultados no Brasil, que aparecem na Tabela 19, foram compilados com as experiências utilizando secagem em centrífugas, leitos de secagem e outros processos naturais, filtro prensa, etc.

Tabela 19: Série de variáveis estudadas nesta pesquisa para a caracterização do lodo e formulação dos gráficos estatísticos.

Variável	Und.	FIL-1	FIL-2	FIL-3	$\bar{X} \pm DP$	Andreoli (2001)
Alc. Total	mg/L	45	30	50	42±10	27 – 30
Cor apar.	uC	76	77	82	78,2±3,4	---
Cor verd.	uC	12	9	10	10,0±1,3	0,52
COT	mg/L	10	11	17	13±4	18,45
DBO	mg/L	74	84	82	80±5	100 – 400
DQO _B	mg/L	281	289	323	298±22	187 – 250
DQO _F	mg/L	214	256	272	247±30	93 – 58
Dureza Mg	mg/L	0,15	0,10	0,52	0,26±0,23	---
Dureza Ca	mg/L	0,15	0,11	0,19	0,15±0,04	---
Fósforo	mg/L	0,17	0,10	0,09	0,12±0,04	0,11 – 0,12
N-amon.	mg/L	5,13	18,55	16,20	13±7	21,71
N-org.	mg/L	3,81	4,87	6,13	4,9±1,2	10,8
Nitrato	mg/L	3,80	5,20	3,01	4,0±1,1	0,19
pH	(-)	7,25	7,21	6,91	---	6,08 – 7,3
Wanke (2005)						
ST	mg/L	492	466	540	499±38	10300
STF	mg/L	228	215	235	226±10	---
STV	mg/L	264	252	305	273±28	3000
SST	mg/L	47	54	71	57±12	100 – 350
SSF	mg/L	8	6	9	8±2	---
SSV	mg/L	38	49	61	49±12	62,2
SDT	mg/L	445	412	469	442±29	---
SDF	mg/L	220	209	225	218±8	---
SDV	mg/L	225	203	244	224±21	---
Von Sperling (2005)						
Turbidez	uT	1,63	2,67	8,08	4,1±3,5	0,75 – 2
CONAMA 375/06						
Al	mg/L	0,70	1,08	0,48	0,75±0,30	16,4 – 23,3
Ba	mg/L	0,10	0,10	0,14	0,11±0,02	0,18 - 0,22
Cd	mg/L	0,00	0,00	0,00	0,00±0,00	0,16
Cr	mg/L	0,11	0,19	0,12	0,14±0,04	0,89
Cu	mg/L	0,03	0,01	0,01	0,02±0,01	0,534
Ni	mg/L	0,01	0,00	0,01	0,01±0,05	0,286
Pb	mg/L	0,04	0,01	0,67	0,24±0,38	0,171
Zn	mg/L	0,08	0,09	0,11	0,09±0,01	1,6

A partir dos resultados da Tabela 19, o software Minitab 17 for Windows foi alimentado e gerou o seguinte gráfico de componentes principais que relaciona as variáveis com maior significância para a amostra de lodo estudada (Figura 21).

Figura 21: Variáveis analisadas no filtrado resultante do desaguamento do lodo com a apresentação das duas componentes principais formadas.



Na análise de componentes principais, a ferramenta computacional utiliza a técnica estatística das multivariadas para gerar o gráfico que representa a formulação da aproximação das variáveis cujas características são próximas e tem relevância nos resultados das amostras analisadas do lodo, a fim de elencar as variáveis que tem maior significância, estando estas no conjunto da componente principal 1, demonstrando a importância destas na caracterização da amostra de lodo onde de acordo com a expressividade da variável se pode controlar suas concentrações para obter um material com características aceitáveis para a finalidade desejada.

O gráfico apresenta como integrantes da componente 1 no quadrante positivo com as linhas próximas, as variáveis Alcalinidade total, SSF, STF, SDF, SDT, SDV, Dureza Ca, ST, STV, Ba, Dureza Mg, Pb, Zn, Turbidez, DQO_B, Cor aparente, COT, SST, N_{org} e SSV, esta inter-relação positiva é confirmada pela aproximação das linhas das variáveis no gráfico.

As faixas de sólidos que aparecem no gráfico das componentes principais demonstra a semelhança das concentrações encontradas no lodo da Vila Barca e por isso representam uma fração considerável para justificar as altas concentrações do lodo do fundo do reator.

Para os metais Ba, Pb e Zn a aproximação é explicada devido a estes componentes dentro da tabela periódica representarem os metais da família dos alcalinos terrosos e suas concentrações encontradas pela varredura de ICPOES no lodo confirmaram esta familiaridade.

Turbidez e cor aparente representam o percentual de variáveis que qualificam as características da aparência da amostra, que neste caso apresentaram consonância quanto aos resultados de aproximação das linhas de significância.

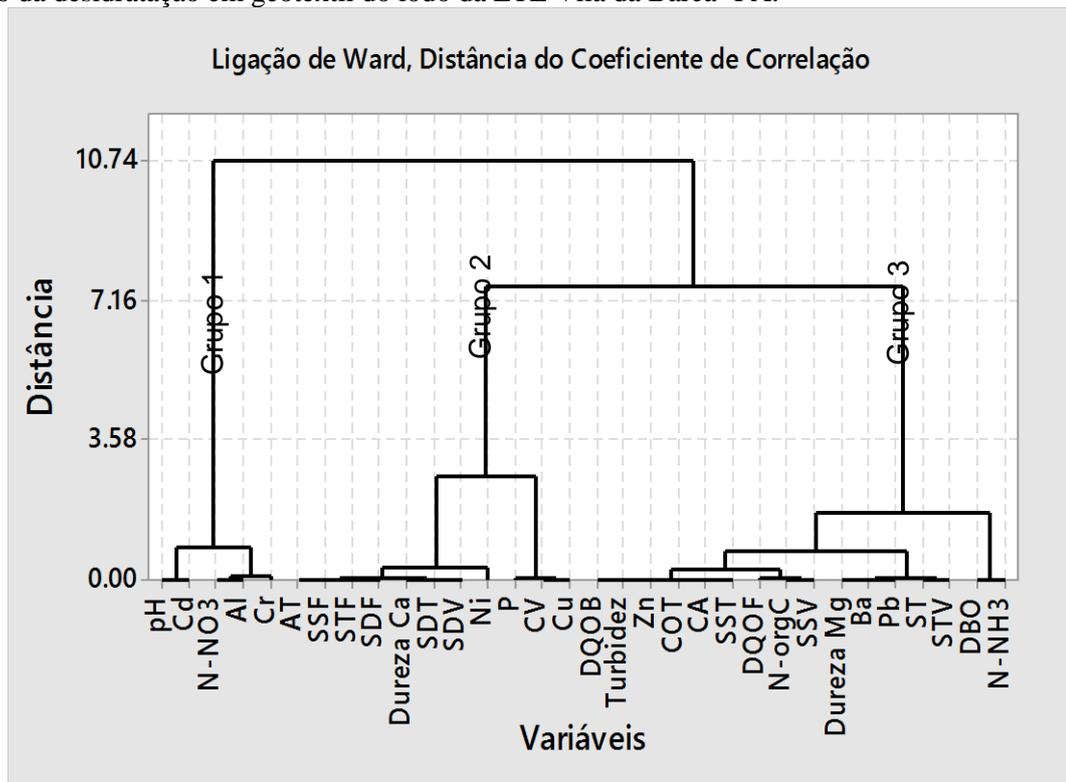
A análise PCA indicou a formação de duas PCs no que diz respeito às características dos filtrados produzidos durante a desidratação do lodo no ensaio 3 e primeira dosagem, para as variáveis pesquisadas.

Para a condição de filtrado com maiores concentrações de lodo, os dois PCs em conjunto explicaram 100% da variação de dados e como pode ser visto na Figura 25, o PC1 com 66,7% da variância total teve a união dos elementos Ni, Alcalinidade total, SSF, STF, SDF, SDT, SDV, Dureza Ca, ST, STV, Ba, Dureza Mg, Pb, Zn, Turbidez, DQO_B, Cor aparente, COT, SST, N_{org}, SSV, DBO e N-NH₃ ($0,216 \leq e \leq 0,011$) entre as variáveis que mais contribuíram para essa componente. Para a componente 2, os elementos que fazem parte deste conjunto são Cu, Cor verdadeira, P, pH, Cd, Al, N-NO₃, Cr ($0,306 \leq e \leq 0,004$) representando de 33,3% de proporção das variáveis na matriz de correlação.

Em relação ao filtrado do ensaio 3 e segunda dosagem, o conjunto observado na variação nos dados para o PC1 com variância de ($0,269 \leq e \leq 0,000$). E entre as variáveis mais importantes para PC2 neste ensaio a variação foi de ($0,525 \leq e \leq 0,004$). No ensaio 3 e terceira dosagem, a variação das PCs 1 e 2, foram respectivamente de ($0,391 \leq e \leq 0,005$) e ($0,370 \leq e \leq 0,001$).

Para o gráfico da análise de cluster (Figura 22) das variáveis de caracterização do lodo, a análise de agrupamento, ou clustering, que é o grupo de técnicas computacionais cujo propósito consiste em separar objetos (variáveis) em grupos, baseando-se nas características que estes possuem.

Figura 22: Agrupamento das variáveis utilizadas para a caracterização físico-química do filtrado obtido da desidratação em geotêxtil do lodo da ETE Vila da Barca- PA.



Para Linden (2009), o critério de aproximação das variáveis baseia-se normalmente em uma função de dissimilaridade, função esta que recebe dois objetos e retorna a distância entre eles. Os grupos determinados por uma métrica de qualidade devem apresentar alta homogeneidade interna e alta separação (heterogeneidade externa). Isto quer dizer que os elementos de um determinado conjunto devem ser mutuamente similares e, preferencialmente, muito diferentes dos elementos de outros conjuntos.

Analisando a Figura 29, observa-se que a formação do grupo 1 abrange as variáveis pH, Cd, N-NO₃, Al e Cr; o grupo 2 têm alcalinidade total, SSF, STF, SDF, Dureza Ca, SDT, SDV, Ni, P, Cor verdadeira e Cu e o grupo 3 é composto por DQO_{bruta}, Turbidez, Zn, COT, Cor aparente, SST, DQO_{filtrada}, Norg., SSV, Dureza Mg, Ba, Pb, ST, STV, DBO e NH₃.

Sabe-se que quanto maior a linha que liga dois clusters, maior a distância euclidiana entre eles, ou seja, os componentes de um grupo em relação ao outro cuja linha de ligação for muito alta tem menos semelhança entre si quanto as suas características. Logo, a altura da linha ligando dois clusters é proporcional à sua distância, por isso quanto mais alta a linha ligando dois clusters, mais tarde foi feito seu agrupamento (LINDEN, 2009).

O grupo 1, apresenta o menor número de variáveis com semelhança entre si tendo agrupado 5 elementos dentre eles Al e N. Há algumas informações que sugerem uma possível

inter-relação entre a toxidez de Alumínio e o metabolismo do nitrogênio, usados em latossolo. Kotze *et al.*(1977) sugeriram que a toxidez do Al estaria relacionada com o metabolismo do nitrato.

O cádmio apresenta uma forte relação de retenção que correlaciona-se principalmente com o pH, CTC, superfície específica e força iônica (BORGES, 2002). Já para a correlação entre cromo e Alumínio, o Cr^{3+} assemelha-se ao Fe^{3+} e Al^{3+} em tamanho iônico e forma geoquímica (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1992), o que explica a aproximação destes elementos no gráfico.

O grupo 2 apresenta a maioria das frações de sólidos reunidas neste espaço mostrando a forte aproximação de suas semelhanças. A presença de Dureza Ca e Fósforo no mesmo grupo apresenta a relação que este elemento tem com a variável dureza principalmente na qualidade do lodo uma vez que o fósforo presente no lodo de esgoto provém não só dos dejetos humanos e células dos micro-organismos que atuam no tratamento de esgoto (TSUTIYA, 2001) mas também dos detergentes sintéticos, aos quais são adicionados polifosfatos como agentes quelantes de íons metálicos responsáveis pela dureza das águas, com o objetivo de melhorar o potencial de limpeza desses produtos (BAIRD, 2002).

No grupo 3, existem variáveis que representam relações importantes na caracterização do lodo, tais como DQO e COT, SST e SSV, DBO e DQO. Estas presentes no mesmo grupo representam a confirmação de similaridade, homogeneidade e a inter-relação importante para a avaliação da qualidade do filtrado demonstrando a eficiência do processo de desaguamento do lodo em geotêxtil.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- ✓ Para o lodo da ETE Vila da Barca, o desaguamento com uso de geotêxtil pode ser feito com desempenho positivo e satisfatório quanto as variáveis físico-químicas analisadas;
- ✓ Dos 25 ensaios realizados, o ensaio 3 na segunda dosagem foi o que apresentou resultados mais eficientes para desaguamento de lodo em geotêxtil;
- ✓ Dos elementos inorgânicos, destacam-se o Al, Cr e Zn, pois seus resultados estão bem abaixo dos apresentados em outros estudos.
- ✓ O balanço de massa na torta teve resultados positivos no lodo condicionado com produtos químicos, possibilitando a diminuição das concentrações das variáveis Cor e turbidez;
- ✓ A taxa de filtração no geotêxtil foi acelerada com o uso do PAC que ajudou na aglomeração das partículas e no clareamento do filtrado;
- ✓ O IQF obteve desempenho positivo no desaguamento por meio do balanço de massa que comprovou a redução de massa e volume da torta com eficiência de desaguamento de 91% para a melhor dosagem considerada;
- ✓ HCA e PACA mostraram coerência nos resultados ao formar grupos com variáveis que apresentam semelhanças, homogeneidade e inter-relação em suas características e que juntas tem uma elevada significância para a caracterização da amostra de filtrado estudada;
- ✓ O volume de 1 L de lodo em cada geotêxtil, conseguiu produzir uma boa quantidade de filtrado, média de 750 mL, demonstrando a importância deste material filtrante;
- ✓ Para trabalhos futuros, indica-se testes para outro coagulante com necessidade de menor concentração para condicionamento de lodo;
- ✓ A higienização do lodo pós desidratação e sua caracterização para usos agrícolas ou como adubo orgânico para reflorestamento.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 10318:2013. **Geossintéticos — Termos e definições**. Define os termos relativos às funções, produtos e propriedades, bem como os símbolos aplicáveis aos geossintéticos. As definições dos termos que não estão incluídos nesta Norma são encontradas nas normas que descrevem os métodos de ensaio correspondentes.

AISSE, M.M.; ANDREOLI, F.N. Estudo da desidratação do lodo anaeróbio, obtido em reatores tipo Ralf, através do uso de leito de secagem e centrífuga tipo Decanter. In: I Seminário sobre gerenciamento de biossólidos do MERCOSUL. **Anais...** Curitiba / Pr, p. 239-145, 1998.

ALCÂNTARA, M. A. K.; AQUINO NETO, V.; CAMARGO, O. A.; CANTARELLA, H. Mineralização do nitrogênio em solos tratados com lodos de curtume. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 42, p. 547-555, 2007.

ANDREOLI, Cleverson Vitório; FERREIRA, Andréia Cristina; CHERNICHARO, Carlos Augusto; BORGES, Eduardo Sales Machado. Secagem e higienização de lodos com aproveitamento de biogás. In: CASSINI, Sérgio Tulio (Coord.). **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, p. 120-165, 2003 (Coleção Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB, 5).

ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; MÄDER NETTO, O. S. Desidratação do lodo aeróbio e séptico através do uso de centrífuga tipo Decanter, com e sem o uso de polieletrólitos. 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais...** João Pessoa, 2001.

APHA - American Public Health Association; AWWA - American Water Works Association & WPCF - Water Pollution Control Federation, 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 st ed. Washington, DC.

Associação Brasileira das Indústrias de não tecidos e Tecidos (ABINT). Curso básico de geotêxteis. 1ª Edição - Janeiro/2001.

ASTALS, S.; VENEGAS, C.; PECES, M.; JOFRE, J.; LUCENA, F.; MATA-ALVAREZ, J. Balancing hygienization and anaerobic digestion of raw sewage sludge. **Water research**. n. 46, p. 6218 e 6227, 2012.

AYRES, Manuel. **Elementos de bioestatística**: A seiva do açazeiro. Belém, 2011.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. 2ª edição. Porto Alegre, 2002.

BENEDETTI, Stella. Avaliação do teor de carbono orgânico total na qualidade da água: **aplicação na radiofarmácia**. Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES: Autarquia associada à Universidade de São Paulo, p. 107, 2012.

BITTENCOURT, Simone; SERRAT, Beatriz Monte; AISSE, Miguel Mansur; MARIN, Lia Márcia Kugeratski de Souza; SIMÃO, Caio César. Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 315-324, 2012.

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. New York: Wiley, 2001.

CAI, Lu; CHEN, Tong-Bin; GAO, Ding; LIU, Hong-Tao; CHEN, Jun; ZHENG, Guo-Di. Time domain reflectometry measured moisture content of sewage sludge compost across temperatures. **Waste Management**, n. 33, p. 12–17, 2013.

CALHEIROS, Herlane Costa; RIBEIRO, Érica Carolina; CAMARGO, César de Goes. Desidratação de lodo proveniente de reator anaeróbio compartimentado em leito de secagem plantado com camomila e Higienizado com cal. **REA – Revista de estudos ambientais (Online)**, v. 13, n. 2, p. 33-43, 2011. Disponível em: <http://gurupi.ufma.br/index.php/cadernosdepesquisa/article/viewFile/162/110>. Acesso em: 10 de março de 2015.

CANTRELL, K.B. ; CHASTAIN, J.P. e MOORE, K.P. Geotextile Filtration Performance for Lagoon Sludges and Liquid Animal Manures Dewatering. **Search National Agricultural Library Digital Collections**, 2008.

CHERNICHARO, Carlos A. L; SILVA, Silvana de Queiroz; AQUINO, Sérgio F. Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (dco) aplicado a análise de efluentes anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 295-304, 2006.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores Anaeróbios**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, DESA, v. 5, 2007. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias).

CHONG, Siewhui; SEN, Tushar Kanti; KAYAALP, Ahmet; ANG, Ha Ming. The performance enhancements of Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment- A state-of-the-art review. **Water research**, n. 46, p. 3434-3470, 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 375 de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.

CORDEIRO, J.S. Processamento de lodos de estação de tratamento de água (ETA). In: ANDREOLI, Cleverson Vitório (Coord.). Resíduos sólidos do saneamento: **Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: ABES, p. 121-142, 2001.

COSTA, Alberto Dias de Souza; Hillen, Leandro de Moura; FERREIRA, Rogério Gustavo; LERMONTOV, André. Aplicação de geoforma linear no desaguamento de lodo de ETA - um estudo de caso na ETA secretário, Petrópolis. In: **XV Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Belo Horizonte, 2012.

DAVID, Airton Checoni. Secagem térmica de lodos de esgoto: **Determinação da umidade de equilíbrio**, 163f, 2002. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2002. Disponível em: <http://www.teses.usp.br>. Acesso em: 22 de Outubro de 2014.

DORES-SILVA, Paulo R.; LANDGRAF, Maria D.; REZENDE, Maria Olímpia O. Acompanhamento químico da vermicompostagem de Lodo de esgoto Doméstico. **Revista Química Nova**, v. 34, n. 6, p. 956-961, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/qn/v34n6/08.pdf>. Acesso: em 10 de março de 2015.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. v.1 e 2, 2ª edição, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo - Métodos Usados na Embrapa Solos. Documentos- Número 3, ISSN 1414-8153. Outubro, 1998.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Land application of biossolids: process design manual**. Cincinnati, 1997.

ENVIRON AMBIENTAL. **Equipamentos: Prensa desaguadora de lodo**. Disponível em: <http://www.vironquip.com.br>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2015.

FERRANTI, Eliana Maria. **Desidratação de lodos de estação de tratamento de água**. 116f. 2005. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), 2005. Orientador: Gino R. Gehling. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4465>. Acesso em: 21 de Agosto de 2015.

FERREIRA, Andréia Claudia; ANDREOLI, Cleverson Vitório. Produção e características do biossólido. cap.1. p. 8-17. In: ANDREOLI, Cleverson Vitório (Coord.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: SANEPAR/PROSAB, 1999, 98 p.

FERNANDES, Fernando; SOUZA, Silvia Galvão de. Estabilização de lodo de esgoto. cap.2, p.28-55. In: ANDREOLI, Cleverson Vitório (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. 282 p.

GUIMARÃES, Gustavo Costa. **Estudo do adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA-Brasília**. 118f. 2007. Dissertação (Mestrado)- -Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e recursos hídricos da Universidade de Brasília, Brasília (DF), 2007. Orientador: Cristina Célia Silveira Brandão. Disponível em:

<http://vsites.unb.br/ft/enc/recursoshidricos/diss-ptarh/Dissertacao107-GustavoGuimaraes.pdf>. Acesso em: 22 de Outubro de 2013.

HAAN, F. A. M. Soil quality evaluation. In: HAAN, F. A. M.; VISSER-REYNEVELD, M. I. Soil pollution and soil protection, Wageningen Agricultural University. 1996.

HAN, Xiangxin; NIU, Mengting; JIANG, Xiumin; LIU, Jianguo. Combustion Characteristics of Sewage Sludge in a Fluidized Bed. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. n. 51, p. 10565–10570, 2012.

HAYGARTH, P. M.; JARVIS, S. C. **Transfer of phosphorus from agricultural soils. Advances in Agronomy**. v. 66. p. 195 –219.1999.

HEDLEY, M.; McLAUGHLIN, M. Reactions of Phosphate Fertilizers and By-Products in Soils. In: Sims, J.T.; Sharpley, A.N.; Pierzynski, G.M; Westermann, D.T.; Cabrera, M.L.; Powell, J.M.; Daniel, T.C. Phosphorus. Agriculture and the Environment. American Society of Agronomy. p.181-254. 2005.

HENZE, Mogens e COMEAU, Yves. Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling and Design. Edited by M. Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G.A. Ekama and D. Brdjanovic. **IWA Publishing**, London, UK, ISBN: 9781843391883, 2008.

HOCAOGLU, S. Murat; INSEL, G.; COKGOR, E.Ubay; ORHON, D.. Effect of sludge age on simultaneous nitrification and denitrification in membrane bioreactor. **Bioresource Technology**, n. 102, p. 6665–6672, 2011.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, Rio de Janeiro, 2010.

JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). **Evaluation of certain food additives and contaminants**. Geneva, 1993. 41 st report of the JECFAWHO technical report series 837.

JUSTI, Gabriel Henrique. **Parte 2: Balanço de massa (BM)**. Brasília, 2012.

KASSAB, G.; HALALSHEH, M.; KLAPWIJK, A.; FAYYAD, M.; VAN LIER, J.B.. Sequential anaerobic–aerobic treatment for domestic wastewater – A review. **Bioresource Technology**, n. 101, p. 3299–3310, 2010.

KELLNER, Erich e MESQUITA, André Pina de. Avaliação do índice de langelier em sistema de distribuição de água de são carlos (sp), suprido por manancial subterrâneo: Estudo de estabilização. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**. ISSN 2318-8472, V. 03, n.14, 2015.

KIRKHAM, M. B. Agricultural use of phosphorus in sewage sludge. **Advances Agronomy**. v. 35. p. 129-163. 1982.

KOTZE, W.A.G.; SHEAR, C.B.; FAUST, M. Effect of nitrogen source and aluminum in nutrient solution on the growth and mineral nutrition of apple and peach seedlings. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.102, n.3, p.279-282, 1977.

LANGELIER, W. F., The Analytical Control of Anticorrosion Water Treatment. *Journal of American Water Works Association* 1936, 28, 1500-1521.

LIU, Chun; TANAKA, Hiroshi; ZHANGA, Lei; ZHANGA, Jing; HUANG, Xia; JIN, Maa; MATSUZAWA, Yoshiaki. Fouling and structural changes of Shirasu porous glass (SPG) membrane used in aerobic wastewater treatment process for microbubble aeration. **Journal of Membrane Science**, p. 421–422, 2012.

LINDEN, Ricardo. Técnicas de agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, n. 4 (2009) pp. 18-36.

LODI, Paulo César. **Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de policloreto de vinila (PVC)**. 2003. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-20062007-105957/>. Acesso em: 10 de março de 2015.

LUDUVICE, Maurício; GONÇALVES, Ricardo Franci; LIMA, Márcia Regina Pereira; RAMALDES, Dalton Luis da Cunha; FERREIRA, Andréia Cristina; TELES, Claudia Rodrigues; ANDREOLI, Cleverson Vitorio. Desidratação de lodo de esgotos. cap.3. p. 56-86. In: ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima Artes e Textos, 287 p, 2001.

LUPATINI, Giancarlo; ANDREOLI, Cleverson Vitorio; CASTRO, Rodrigo Azevedo; BORGES, Nayara Batista; CAMPOS, José Roberto; BARBOSA, Ana Julia Soares; ARAÚJO, André Luis Calado; ANDRADE NETO, Cícero Onofre de; YAMADA, Fabio; COLTRO, Daniel Zonneveld. cap.4. p.76-180. 2009. In: ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Coord.). **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**.

MACHADO, Maria Fernanda de Sousa. **A situação brasileira dos bio-sólidos**. 2001. 282f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2001. Orientador: Roberto Feijó de Figueiredo.

MANZOCHI, Clarice Ilse Schwarz. **Logística para tratamento e disposição final de lodos de ETE's visando reciclagem agrícola**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: http://www.tede.ufsc.br/tedesimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=478. Acesso em: 10 de março de 2015.

McDOWELL, R. W.; SHARPLEY, A. N.; CONDRON, L. M.; HAYGARTH, P. M.; BROOKES, P. C. Processes controlling soil phosphorus release to runoff and implications for agricultural management. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. v. 59. p. 269-284, 2001.

McDOWELL R. W.; BIGGS, B. J.; SHARPLEY, A. N. NGUYEN, L. Connecting phosphorus loss from agricultural landscapes to surface water quality. **Chemistry and Ecology**. v. 20. p. 1-40, 2004.

MELO, W.J.; AGUIAR, P. DE S.; MELO, V.P., MELO, G.M.P. Níckel in the humic substances of soil treated with sewage sludge for six years. **XII International Meeting Of The International Humic Substances Society**, 26-30 de julho de 2004, Águas de São Pedro, SP, Brasil.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4ed. Boston: McGraw Hill, 1819 p, 2003.

MIKI, Marcelo Kenji; ALEM SOBRINHO, Pedro. Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de Placas. In: **20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2000, Rio de Janeiro, Brasil.

MIKI, Marcelo Kenji; ALEM SOBRINHO, Pedro; VAN HAANDEL, Adrianus Cornélio. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento, mecanizado e secagem térmica do lodo. In: **Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MOITA NETO, José Machado; MOITA, Graziella Ciaramella. Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 4, Julho 1998.

MOO-YOUNG, H. K., GAFFNEY, D. A., MO, X. Testing Procedures to asses the viability of dewatering with geotextiles tubes. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 20, p. 289-303, 2002.

NIELSEN, Steen; WILLOUGHBY, Neil. Sludge treatment and drying reed bed systems in Denmark. **Water and Environment Journal**, v.19, n.4, 2005, p.296-305. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1747-6593.2005.tb00566.x/pdf>>. Acesso em: 05 de maio de 2015.

OLIVEIRA, Roberto A. de e FORESTI, Eugênio. Balanço de massa de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) tratando águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.807-820, set./dez. 2004.

PAULINO, R o s a n g e l a C.; CASTRO, E d i l e n e A.; THOMAZ-SOCCOL, V a n e t e. Tratamento anaeróbio de esgoto e sua eficiência na redução da viabilidade de ovos de Helminto. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 34, n. 5, p. 421-428,

set-out, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rsbmt/v34n5/5990.pdf>. Acesso em: 11 de março de 2015.

PASSAMANI, Fabiana Reinis Franca; KELLER, Regina; GONÇALVES, Ricardo Franci. Higienização de lodo utilizando caleagem e pasteurização em uma pequena estação de tratamento de esgoto combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso. In: **Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**, 2002, Cancún, México.

PEREIRA, Lia Martins. Estudo da influência do agente alcalinizante na qualidade do lodo higienizado oriundo de sistema de tratamento de esgoto sanitário multifamiliar visando à disposição agrícola. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do Título de Mestre em Saneamento Ambiental e Infraestrutura Urbana, Área de Concentração: Saneamento Ambiental, Orientador: Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça, Belém-PA, 2013.

PIEPER, Karla Maria Cypriano. **Avaliação do uso de geossintético para o desague e geocontenção de resíduos sólidos de estação de tratamento de água**. 2008. 162p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), 2008. Orientador: Fernando Schnaid. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25505/000751884.pdf?sequence=1>. Acesso em: 21 de Agosto de 2015.

POGGIANI, Fábio; SILVA, Paulo Henrique Muller da; GUEDES, Marcelino Carneiro. Uso do lodo de esgoto em plantações florestais. cap.6. p. 159-188. In: ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417 p. (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB, 4).

RICHTER, Carlos A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. Ed. Edgar Blucher LTDA. São Paulo, 2011.

SILVA, Celso Luiz da; SEGATO, Luciana Maturana. Tratamento de líquidos filtrados por evaporação através do aproveitamento de gás de aterros sanitários. In: **Congresso Interamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ambiental**, 2002, Cancún, México.

SOARES, Sérgio R. A.; MATOS, Zanna M. R. de; BERNARDES, Ricardo S. Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbio em leitos de secagem simulados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.2, p.313-319, Campina Grande-PB, 2001.

SPAVIER, Luciana Callegari. **Distribuição das diferentes frações de água em lodos de estações de tratamento de águas residuárias**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Orientador: Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves. Espírito Santo, Vitória, 146f., 2003.

STRANDE, Linda; RONTELTAP, Mariska e BRDJANOVIC, Damir. Faecal sludge management: Systems Approach for Implementation and Operation. **IWA Publishing**. p. 427, 2014.

SUNTTI, Carla; MAGRI, Maria Elisa; PHILIPPI, Luíz Sérgio. Filtros plantados com macrófitas de fluxo vertical aplicados na mineralização e desaguamento de lodo de tanque séptico. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.16, n. 1, p.63-72, jan-mar, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v16n1/a10v16n1.pdf>. Acesso em: 10 de março de 2012.

TOMINAGA, E. **Análise dos procedimentos para avaliação de desempenho de sistemas fechados de geotêxtil para desaguamento**. 2010. Disponível em: <<https://dl.dropbox.com/0/view/e5u1y3b337nbbpu/PI/Artigos%20e%20materiais/tese%20em%20tominaga.pdf>>. Acesso em: 25 de outubro de 2011.

TSUTIYA, M. T. Qualidade de biossólidos produzidos em estações de tratamento de esgotos da região metropolitana de São Paulo. In: **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2001, João Pessoa. Anais eletrônico... Rio de Janeiro: ABES, 2001. p. 1-6.

UGGETTI, Enrica; FERRER, Ivet; LLORENS, Esther; GARCÍA, Joan. Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. **Bioresource Technology**, Vol.101(9), p. 2905-2912, 2010.

UGGETTI, Enrica; FERRER, Ivet; MOLIST, Jordi; GARCÍA, Joan. Technical, economic and environmental assessment of sludge treatment wetlands. **Water Research**, Vol. 45, n. 2, p.573–582, January 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Process Design Manual: Land Application of sewage sludge and domestic septage**. Washington, 1995. 290 p. Disponível em: <http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/landfill/flowctrl/report/appeniii.pdf>. Acesso em: 10 de março de 2012.

URASHIMA, D.C. Simulação do processo de retenção de partículas por filtros têxteis. SP.2002. Disponível em: <<https://dl.dropbox.com/0/view/esns69uf5t498ul/PI/Artigos%20e%20materiais/Tese%20Doutorado%20Pr of%20Denise.pdf>> Acessado em : 02/11/2014.

VAN HAANDEL, Adrianus Cornelius; ALEM SOBRINHO, Pedro. Produção, composição e Constituição de lodo de esgoto. cap 2. p. 7-28. In: ANDREOLI, Cleverson Vitorio (coord.). **Alternativas de Uso de resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 417p, 2006.

VAN SANTVOORT, G. **Geotextiles and geomembranes in civil engineering**. 1994. p.517. A.A. Balkeman.Rotterdam, Netherland.

VANZETTO, Aliny Stradiotti. **Análise das alternativas tecnológicas de desaguamento de lodos produzidos em estações de tratamento de esgoto**. Repositório Institucional da Universidade de Brasília, 185 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)— Brasília, 2012.

VINCENTI, Julie; FORQUET, Nicolas; MOLLE, Pascal; WISNIEWSKI, Christelle. Mechanical and hydraulic properties of sludge deposit on sludge drying reed beds (SDRBs): Influence of sludge characteristics and loading rates. **Bioresource Technology**, n. 116, p.161–169, 2012.

VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando; ANDREOLI, Cleverson Vitório. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. 484 p.

VON SPERLING, Marcos; VAN HAANDEL, Adrianus Cornélius; JORDÃO, Eduardo Pacheco; CAMPOS, José Roberto; CYBIS, Luiz Fernando; AISSE, Miguel Mansur; ALEM SOBRINHO, Pedro. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por lodos ativados.cap.5, p. 1-40.In: CHERNICHARO, Carlos Augusto Lemos (Coord.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: [s.n], 406 p, 2001.

VON SPERLING, Marcos. Lodos ativados: **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2.ed. ampl. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2002, Vol. 4.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol. 1 Ed. UFMG. 2005.

XU, Donghai; WANG, Shuzhong; TANG, Xingying; GONG, Yanmeng; GUO, Yang; ZHANG, Jie; WANG, Yuzhen; HONGHE MA; LU ZHOU. Influence of oxidation coefficient on product properties in sewage sludge treatment by supercritical water. **International journal of hydrogen energy**, n. 38, p. 1850-1858, 2013.

WANG, Yi; WANG, Peng; BAI, Yujun; TIAN, Zaixing; LI, Jingwen; SHAO, Xue; MUSTAVICH, Laura F.; LI, Bai-Lian. Assessment of surface water quality via multivariate statistical techniques: A case study of the Songhua River Harbin region, China. **Journal of Hydro-environment Research**, n.7, p. 30- 40, 2013.

WANKE, Renate; GONÇALVES, Ricardo Franci. Desaguadores estáticos verticais para remoção não mecanizada da água livre de lodos de Reatores UASB. In. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Recife, Brasil, 2009. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/II-149.pdf>. Acesso em: 02 de Novembro de 2011.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. **Agricultural Handbook**. nº 537. Washington D.C.: USDA, 1978. 58p.

YOO, Rihye; KIMA, Jeonghwan; MCCARTYA, Perry L.; BAE, Jaeho. Anaerobic treatment of municipal wastewater with a staged anaerobic fluidized membrane bioreactor (SAF-MBR) system. **Bioresource Technology**, n. 120, p. 133–139, 2012.

ZERLOTTIN, M.; REFOSCO, D.; DELLA ZASSA, M.; BIASIN, A.; CANU, P. Self-heating of dried wastewater sludge. **Waste Management**, n. 33, p. 129–137, 2013.

ANEXO A – PROCEDIMENTOS DAS ANÁLISES LABORATORIAIS REALIZADAS

As variáveis físico-químicas do lodo da ETE- Vila da Barca foram realizadas no laboratório de multianálise de águas da UFPA (LAMAG) e obedeceram aos procedimentos e recomendações descritas no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA/AWWA/WEF, 1998), no protocolo do manual de digestão da Provecto, além da adaptação do modelo de metodologia da EMBRAPA/98 para análise de Teor de umidade e sólidos. A seguir é apresentada a descrição dos métodos usados para a determinação de cada variável.

ST, SF, SV, Massa específica, teor de umidade, teor de sólidos

Para a determinação dos sólidos suspensos (totais, fixos e voláteis) utilizou-se a balança analítica modelo TE214S/Sartorius na qual foram pesadas cápsulas vazias correspondendo a um peso inicial (P0) com capacidade de 100 mL. Em seguida colocou-se 100 mL da concentração do lodo sedimentado em Cone Imhoff, e posteriormente as amostras foram levadas à estufa a temperatura de 103 à 105°C até atingir peso constante (~24 h). Após este período, as amostras foram encaminhadas ao dessecador para resfriamento e pesadas obtendo-se o segundo peso (P1). Após esta etapa, as amostras foram conduzidas à mufla e mantidas a temperatura de 550°C por 1 h para volatilização da matéria orgânica. As amostras foram então resfriadas no dessecador para serem pesadas novamente (P2).

a) Determinação de sólidos totais (ST)

- Aferir uma cápsula de porcelana deixando-a em mufla a (550±50)°C por 1 hora, seguida por esfriamento em dessecador e pesagem na balança analítica com precisão de 0,1 mg (P0).
- Transferir para a cápsula 100 mL da amostra medidos em proveta e levar para a estufa (102±3)°C até que a massa fique constante (~24 h), seguida por esfriamento em dessecador e pesagem na balança analítica com precisão de 0,1 mg (P1).

Então:

$$SST(\text{mg/L}) = \frac{(P1-P0)}{V_{\text{amostra}}} \times 10^6$$

b) **Determinação de sólidos fixos (SF)**

- Submeter os sólidos totais obtidos conforme procedimento 1 para a mufla e mantidas a temperatura de 550 °C durante 1h para a volatilização da matéria orgânica.
- Esfriar em dessecador e pesar com precisão de 0,1 mg (P2).

$$SSF(\text{mg/L}) = \frac{(P2-P0)}{V_{\text{amostra}}} \times 10^6$$

c) **Determinação de sólidos voláteis (SV)** - Efetuar a diferença dos valores obtidos de sólidos totais (procedimento 1) e de sólidos fixos (procedimento 2), o valor encontrado implica no teor de sólidos voláteis. Então:

$$SV (\text{mg/L}) = ST - SF$$

d) **Relação SV/ST** - No lodo bruto esta relação deve estar no intervalo de 0,75 - 0,80 (LUDUVICE, 2007).

e) **Massa específica** - Foram adotados os valores médios aproximados aceitos na literatura apresentados na Tabela 1, a fim de servirem como parâmetro de comparação com os valores obtidos nas análises para o lodo desta pesquisa. Devido os valores de massa específica e densidade para líquidos e gases serem considerados iguais e o lodo ser considerado um fluido, adotar-se-á apenas os valores de massa específica. Usamos o método indireto, com auxílio de proveta graduada, com deslocamento do volume para obtenção desta massa.

$$\text{Mesp.Lodo} \left(\frac{\text{g}}{\text{mL}} \right) = \frac{M \text{ amostra}}{V \text{ amostra}}$$

Tabela 1: Valores de Massa específica para lodos

Tipo de lodo	Massa específica (Kg/m³)
Lodo primário	1,020 – 1,030
Lodo secundário aeróbio	1,005 – 1,025
Lodo secundário Anaeróbio	1,020 – 1,030

Lodo adensado	1,020 – 1,030
Lodo digerido	1,030 – 1,040
Lodo desidratado	1,030 – 1,080

Fonte: Luduvic, 2007.

Onde:

Vamostra- Volume da amostra (mL);

Mamostra- Massa da amostra (g);

Mesp.Lodo- Massa específica do lodo (g/ml).

f) **Teor de umidade (TU):** É calculado a partir da seguinte equação:

$$TU (\%) = \left(\frac{Mesp.Lodo - ST}{Mesp.Lodo} \right) \times 100$$

g) **Teor de sólidos (TS):** A relação do teor de sólidos com o teor de umidade é a seguinte:

$$TS (\%) = 100 - TU (\%)$$

h) **Metais** - Para esta análise desidratou-se as amostras em temperatura ambiente com o objetivo de remover o teor de umidade evitando que este ocasione interferência na relação que se deseja ter entre a solução e os sólidos presentes no lodo seco. Após secarem, as amostras foram moídas manualmente com auxílio de almofariz de porcelana e peneiradas em peneiras com malha de abertura de 2 mm com o objetivo de garantir uma maior homogeneidade e representatividade das amostras. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em recipiente de material plástico e guardadas para posterior análise. O lodo seco foi então digerido com ácido nítrico (HNO₃- 65%) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂- 30%) para a determinação dos metais que a RESOLUÇÃO 375/06 do CONAMA sugere (Bário (Ba), Cádmi (Cd), Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Níquel (Ni) e Zinco (Zn)); a leitura é feita mediante espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), Modelo Vista-MPX CCD simultâneo, axial da VARIAN com um sistema de amostragem automático SPS-5, SOFTWARE ICPExpert Vista.

A abertura da determinação da série de metais no lodo de esgoto fora realizada de acordo com o seguinte protocolo experimental e com a programação de digestão apresentada na Tabela 2.

- Macerar aproximadamente 400 mg de lodo seco (moagem em almofariz);
- Peneirar as 400 mg de lodo seco para homogeneização;
- Adicionar 4 mL de ácido nítrico (HNO_3 - 65%) e 0,30 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2 - 30%) junto à quantidade de lodo peneirada no corpo de prova do digestor de micro-ondas- modelo DGT 100 plus;
- Programar o digestor para realizar digestão, conforme tabela;
- Digerir as amostras conforme programação adotada;
- Esfriar a amostra por aproximadamente 15 min;
- Filtrar a amostra digerida em frasco de 50 mL;
- Completar volume com água mili-Q
- Realizar leitura no ICP-OES modelo Vista-MPX CCD com as curvas de calibração previamente corrigidas nas faixas de concentração que variam entre 0,1 ppm e 3,2 ppm.

Tabela 2: Programação de digestão das amostras de lodo bruto.

Programa	Tempo (min)	Potência (W)
1ª Etapa	3	400
2ª Etapa	1	630
3ª Etapa	1	000
4ª Etapa	3	400
5ª Etapa	3	000

Para a validação da metodologia utilizada na digestão da amostra foi realizada uma segunda digestão com a preparação das amostras da seguinte forma:

- Massa de lodo seco, macerado e peneirado - 0,4 g;
- Ácidos HNO_3 - 65%- 4mL e H_2O_2 - 30%- 0,3 mL;

- Os padrões dos metais utilizados para a contaminação das amostras foram: para o Bário- $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$; Cobre (Cu) – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ e Zinco (Zn) – $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; Cádmiu (Cd), Chumbo (Pb), Cromo (Cr), Níquel (Ni) - (Solução padrão);

- Sete corpos de prova para digestão no micro-ondas que tinham as seguintes soluções;

1º Branco- Apenas os ácidos

2º Branco das amostras- Amostra de lodo+ ácidos (duplicata)

3º Amostra com metade da massa dos padrões de metais (duplicata)

4º Amostra com o dobro da massa dos padrões de metais (duplicata)

As amostras foram preparadas em duplicata para diminuir a margem de erro nos resultados. O tempo total da digestão foi equivalente a 1 h correspondendo as duas digestões realizadas neste momento. Utilizou-se micro-ondas modelo Mars-CEM Express que teve a seguinte programação de digestão para amostra preparada de lodo para a leitura (Tabela 3).

Tabela 3: Programação de digestão das amostras de lodo

Programa	Tempo (min)	Potência (W)	Porcentagem (%)
1ª Etapa	3	1600	25
2ª Etapa	1	1600	40
3ª Etapa	1	1600	0
4ª Etapa	3	1600	25
5ª Etapa	3	1600	0

Com as amostras devidamente digeridas passaram novamente pela leitura no ICP-OES. Na análise dos metais, realizada no laboratório do setor ambiental do Instituto Evandro Chagas (IEC), utilizou-se a validação dos dados para confirmar a credibilidade dos resultados obtidos. A validação é o processo para provar se um método analítico é aceito para a proposta pretendida, visando diminuir ou controlar os fatores que levam à imprecisão ou inexatidão de um dado gerado, tais como variabilidade da amostra, contaminação, reagentes inadequados, variações de temperatura, calibração ineficiente, analista despreparado e perdas durante a análise.

A validação do método está confirmada e aprovada uma vez que os resultados da segunda leitura apresentaram consonância com os da primeira, como mostram os gráficos de correlação entre as massas adicionadas e as obtidas de cada padrão dos metais nas amostras, apresentando recuperação aceitável com desvio $\pm 25\%$ para os metais analisados, aceitando os

valores encontrados para como dentro da faixa esperada e, portanto, com grau aceitável de confiabilidade.

- i) **Concentração do lodo-** É expressa em massa de lodo seco geralmente em mg/L; g/L; %. Existe uma relação entre Carga (C), Vazão (Q) e Concentração, apresentada na equação a seguir:

$$\text{Concentração (\%)} = \frac{\text{Carga (kg ST/d)}}{Q_{\text{lodo}}(\text{m}^3/\text{d}) \times 10}$$

Após a obtenção da concentração do lodo bruto, correspondente à amostra do primeiro ensaio, o valor desta concentração foi duplicado para a amostra do segundo ensaio e quadruplicado para a amostra do terceiro ensaio. O procedimento de variação da concentração do lodo foi realizado por meio de ensaios de suspensão em proveta graduada de 1000 mL, com a relação entre o volume de lodo que sedimenta após 30 minutos e a concentração de sólidos em suspensão nessa amostra. Este ensaio possibilitou a visualização das camadas de sedimentação das partículas mais densas,

5- Ensaios preliminares para definir número de rotações das hélices dos misturadores e tempo de rotação.

- Primeiro adicionamos amostras de lodo bruto nos 6 frascos do Jar test (200 mL cada);
- Depois programamos uma rotação inicial para as hélices do Jar test que fixamos durante os intervalos de tempo de 15, 20 e 30 segundos;
- Esta operação foi finalizada quando obtemos um material com boa qualidade de desidratação onde os flocos se apresentaram de forma predominante.

A seguir a Tabela 6 com os valores encontrados no ensaio de polímeros:

Tabela 6: Critérios para realização dos ensaios de polímero.

Volume lodo (mL)	Volume solução polímero (mL)	Rotação Jar test (rpm)	Tempo floculação (seg.)
200	13	100	20
200	15	100	20
200	18	50	30

Dentre as variações acima, a melhor condição de floculação e conseqüentemente mais favorável ao desaguamento é a primeira configuração com dosagem de 13 mL de solução de

polímeros com rotação de 100 rpm no Jar test e o tempo de 20 segundos de mistura conseguindo um lodo sobrenadante floculado com uma água clarificada no fundo do frasco.

Com estas informações podemos calcular a massa de polímero em gramas que será utilizada para condicionar o lodo.

$$\text{Relação de massas} = \frac{\text{Volume polímero} \times \text{Concentração polímero}}{\text{Volume lodo} \times \text{Concentração lodo}}$$

$$\text{Relação de massas} = \frac{13 \text{ mL} \times 2000 \text{ mg/L}}{200 \text{ mL} \times 25.724,00 \text{ mg/L}}$$

$$\text{Relação de massas} = 5,1 \text{ g Polímero/Kg lodo}$$

Onde:

$V_{\text{polímero}}$: dosagem usada no ensaio de polímeros (13 mL, 15 mL e 18 mL);

[polímero]: 0,2% ou 2000 mg/L;

V_{lodo} : volume utilizado no ensaio, no caso 200 mL;

[lodo]: Concentração de sólidos totais encontrada no lodo 25.724,0 mg/L.