

## II-010 - DESAGUAMENTO E REDUÇÃO DE VOLUME DE LODO ANAERÓBO EM LEITO DE DRENAGEM

**Cali Laguna Achon<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) e Pós-doutora pelo Departamento de Engenharia Civil da UFSCar. Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (DECiv-UFSCar).

**Paulo Ricardo Santos Coimbra<sup>(2)</sup>**

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos.

**Gustavo Smidt Oliveira<sup>(3)</sup>**

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos.

**Amanda Duarte Escobal<sup>(4)</sup>**

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos.

**Bruna Caroline Marola<sup>(5)</sup>**

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rodovia Washington Luís, Km 235 – SP310 – UFSCar. São Carlos-SP - CEP:13565-905, Brasil. Tel: (16) 3351-9672. e-mail: [caliachon@ufscar.br](mailto:caliachon@ufscar.br)

### RESUMO

Os Sistemas de Esgotamento Sanitário englobam processos que acarretam na geração de resíduos, com destaque para o lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Este resíduo é gerado em grandes quantidades e possui gestão complexa e onerosa, pois classifica-se como resíduo sólido de acordo com a NBR 10004 devendo ter disposição final ambientalmente adequada. Sendo assim, o processo de desaguamento do lodo visa reduzir seu volume e facilitar sua disposição final. Este processo pode ser realizado de maneira mecânica ou natural, sendo o Leito de Drenagem (LD), um sistema natural, sem uso de insumos e de comprovada eficiência para a redução do volume de lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA). Assim, este estudo visa avaliar a eficiência do LD no desaguamento de lodo de ETE. Para tal, foram realizados quatro ensaios, aplicando-se 20L de lodo em protótipos de LD com mantas geotêxteis não tecidas de 200g/m<sup>2</sup>, 300g/m<sup>2</sup>, 400g/m<sup>2</sup> e 600g/m<sup>2</sup>, sem uso de condicionantes e com Taxa de Aplicação de Sólidos de 7,4; 7,1; 7,3 e 7,9 KgST/m<sup>2</sup>, respectivamente. Durante os ensaios mediu-se a vazão de drenagem, teor de sólidos e qualidade do líquido drenado. Os resultados demonstraram que ao término da fase de desaguamento (3 horas) o volume de lodo reduzido foi igual ou superior a 50% em todos os ensaios, alcançando 65% de redução no melhor deles. A drenagem foi finalizada em 3 horas e para a manta de 600g/m<sup>2</sup> foram atingidos turbidez de 27 UTN e cor aparente de 90 PtCo após 1 hora de ensaio. Após três dias o teor de sólidos totais foi superior a 20% em todos os ensaios, com destaque para as mantas de 200g/m<sup>2</sup> e 600g/m<sup>2</sup> que alcançaram 31,72% e 37,72% respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desaguamento, Leito de Drenagem, Lodo de Esgoto.

### INTRODUÇÃO

O saneamento básico de modo geral ainda é um grande desafio brasileiro. De acordo com dados de 2014 do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS), apenas 57,6% da população urbana do país possui atendimento de redes de esgoto, sendo que apenas 40,8% do esgoto gerado é tratado. Sendo assim, a busca pela universalização do saneamento implica em uma demanda crescente de infraestrutura em Estações de Tratamento de Água (ETA) e também Estações de Tratamento de Esgoto (ETE).

Os processos físicos, químicos e biológicos empregados nessas últimas geram resíduos, com destaque para o lodo de esgoto. Consequentemente, a ampliação dos sistemas de Saneamento Básico também aumentará significativamente a geração de resíduos oriundo desses sistemas. Além disso, o lodo de esgoto exige

destinação final adequada, que por muitas vezes não é realizada pelo fato desse resíduo possuir gestão complexa e onerosa, totalizando até 60% dos custos operacionais de uma planta de tratamento (Cordeiro, 2001).

Essa dificuldade encontrada na gestão e destinação adequada do resíduo está em sua composição. O lodo gerado pelo esgoto doméstico é constituído por micro-organismos, matéria orgânica e inorgânica, e sua maior parte, mais de 95%, é composta de água, dificultando o manejo e sua disposição final (Von Sperling, 2005). Além disso, é importante ressaltar também as grandes quantidades de resíduo produzidos pelos sistemas de tratamento de água e esgoto. Conforme estimativa da produção de lodo de ETE no Estado de São Paulo, baseada nos processos de tratamento e na população atendida, concluiu-se que são geradas 150 mil toneladas de lodo seco por ano (São Paulo, 2014).

Dado toda essa complexidade em lidar com esse resíduo, o aspecto da gestão era muitas vezes negligenciado, sendo comum ocorrer seu lançamento irregular e indiscriminado em corpos d'água. Entretanto a legislação brasileira tem evoluído nessas questões de controle ambiental visando coibir essa prática. No campo normativo é importante ressaltar a Resolução Nº 357/2005 e Nº 430/2011 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente), que tem por objetivos o estabelecimento de classes de enquadramento dos corpos d'água e nortear o controle de lançamento dos efluentes líquidos. Dessa forma, mesmo que gradativamente, as concessionárias têm sido obrigadas a destinar o lodo de esgoto de forma ambientalmente correta.

Além disso, destaca-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305/2010, que conceitua e diferencia resíduo e rejeito em seu art. 3º, incisos XV e XVI, e classifica o lodo gerado em ETE como resíduo sólido e, portanto, este deve estar em consonância com os preceitos dessa lei e da série de normas NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004). Ademais, essa lei ainda estabeleceu prioridades na gestão dos resíduos sólidos, que são: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Assim, visando atender as exigências normativas e para que seja viável e factível o reuso ou reciclagem do lodo é necessário que antes este seja destinado a um sistema de desaguamento. Esse sistema tem como objetivo a redução do volume através da remoção da água livre encontrada nos interstícios dos sólidos, o que gera massa com maior concentração de sólidos, possibilitando o reaproveitamento da água removida e dos sólidos resultantes. Além disso, o desaguamento atende a prioridade de redução na gestão dos resíduos sólidos, visto que os volumes gerados podem ser drasticamente reduzidos.

Segundo Cordeiro (2001, p. 57), os principais benefícios do desaguamento são:

1. Redução dos custos de transporte e disposição final;
2. Melhoria nas condições de manejo do lodo;
3. Aumento do poder calorífico visando a incineração;
4. Redução do volume para disposição em aterro sanitário;

Além dessas vantagens, o lodo desaguado ainda apresenta alternativas de reaproveitamento. A torta de lodo desaguado pode ser empregada para recuperação de áreas degradadas, como matéria-prima para indústrias da construção civil e ainda permite a utilização na agricultura como biossólido, de acordo com a Resolução Nº 375/2006 do CONAMA.

As tecnologias utilizadas para o desaguamento podem ser classificadas em Sistemas Mecânicos, com equipamentos como filtros-prensa, centrífuga e prensa desaguadora, e Sistemas Naturais com destaque para lagoas de lodo e os leitos de secagem (Achon, Barroso, Cordeiro; 2008). Contudo, segundo Kuroda et al. (2013), os Sistemas Naturais têm se destacado em relação aos mecânicos graças aos baixos gastos de implantação e manutenção, facilidade de operação e por não necessitarem de recursos como energia elétrica e condicionantes (produtos químicos).

Considerando os Sistemas Naturais de desaguamento, em 2001, Cordeiro pesquisou modificações na estrutura dos tradicionais leitos de secagem, adicionando mantas geotêxteis como camada filtrante e retirando a camada de areia. No âmbito dos estudos do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico 2 (PROSAB) – Tema IV,

as melhorias observadas no tempo de drenagem da água livre com o novo arranjo levaram ao desenvolvimento do Leito de Drenagem (LD). Entretanto, grande parte dos estudos relacionados ao LD trata apenas do desaguamento de lodo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETA), estimulando a aplicação do equipamento para desaguamento de lodo oriundo de esgoto doméstico. Poucas foram as fontes encontradas ou relacionadas diretamente ao desaguamento de lodo de ETE em LD, sendo citadas a seguir.

A redução de lodo gerado em Lagoa de Estabilização através de Leito de Drenagem foi pesquisada por Fontana et al. (2007) que implantaram dois módulos de LD, com volume total de 262m<sup>3</sup> cada, sendo o primeiro revestido com manta geotecida de polipropileno com densidade de 160g/m<sup>2</sup>, enquanto no segundo módulo foi utilizada manta não tecida de poliéster com densidade de 400g/m<sup>2</sup>. A operação se deu em dois ciclos de 30 dias, com utilização de condicionante polimérico e taxa de aplicação de sólidos (TAS) entre 14 e 17kgST/m<sup>2</sup>, resultando em redução de volume da ordem de 94%.

A utilização de leitos de secagem convencionais, constituídos por camadas de tijolos, areia e brita, para desaguamento de lodo gerado em dois reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*) foram estudadas por Silva e Chernicharo (2007) que realizaram aplicação de duas TAS distintas, de 7,5kgST/m<sup>2</sup> e de 12,5kgST/m<sup>2</sup>. Para a menor taxa de aplicação de sólidos, o lodo com concentração de sólidos inicial da ordem de 4% apresentava após 1 dia de ensaio 13,4% e ao final de 20 dias teor em torno de 66%. Para TAS de 12,5kgST/m<sup>2</sup>, alcançou-se 12,2% ao primeiro dia de ensaio e torta de lodo com cerca de 43% ao vigésimo dia.

Mortara (2011) avaliou o desempenho de Leitos de Drenagem no desaguamento de lodo de reatores UASB com emprego de condicionante. Utilizando LD com manta geotêxtil de 289g/m<sup>2</sup>, dosagem de polímero de 4g/kg em lodo com teor de sólidos inicial de 2,68%, TAS de 14,9kg/m<sup>2</sup> e altura inicial da torta de 45cm, atingiu após 1 dia de ensaio teor de sólidos de 13,79% e após 31 dias, teor de sólidos de 37,42% com altura da torta final de 10cm. Entretanto, o autor realizou também dois ensaios sem a utilização de produtos químicos. Em um deles, com teor de sólidos inicial de 2,76%, altura inicial de lodo de 45cm e TAS de 15,35kg/m<sup>2</sup> alcançou torta com concentração de 34,65% de sólidos totais e altura final de 10cm após 34 dias de secagem. Assim, o autor concluiu que em relação à evolução do teor de sólidos, tanto o lodo condicionado como aquele sem adição de polímeros apresentaram comportamento semelhante.

Ainda assim, segundo Mortara (2011), independente da dosagem de polímero alcançou-se teor de sólidos no lodo de cerca de 13% após 1 dia, sendo que valores de 25% a 30% só foram encontrados após 30 dias. Apesar dos resultados semelhantes de evolução do teor de sólidos do lodo com e sem uso de polímero, encontrou-se diferença com relação a remoção da torta da manta geotêxtil, em que lodos não condicionados tornaram a operação do LD mais trabalhosa, visto que houve impregnação de material sólido úmido, impedindo a simples varrição da manta.

## OBJETIVO

Avaliar o desaguamento e redução de volume de lodo anaeróbio gerado em Estação de Tratamento Esgoto Sanitário (ETE) usando protótipo de Leito de Drenagem (LD), sistema de desaguamento natural aberto com uso de manta geotêxtil. Avaliar a qualidade do líquido drenado neste sistema.

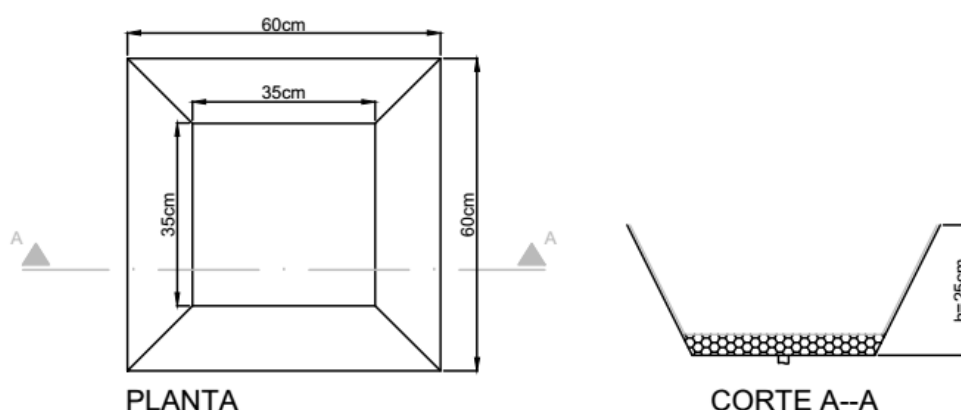
## MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foram realizados ensaios preliminares com duração de 60 minutos sem uso de condicionante (polímero), que serviram para testar e aperfeiçoar os procedimentos utilizados e, portanto, seus resultados não serão mostrados neste trabalho.

O sistema natural de desaguamento de lodo denominado Leito de Drenagem (LD), foi desenvolvido por Cordeiro (2001) e é composto por uma camada de brita 01 de cerca de 5cm de altura e manta geotêxtil não tecida justaposta. Para esta pesquisa foram construídos protótipos em escala reduzida baseados no Leito original, com uma pequena redução na área e na altura do suporte. A Figura 1 ilustra a montagem do LD com a manta geotêxtil, enquanto a Figura 2 apresenta as dimensões do protótipo de LD em escala reduzida.



**Figura 1: Leito de Drenagem em escala reduzida com cobertura por manta geotêxtil.**



**Figura 2: Planta e Corte do Leito de Drenagem em escala reduzida utilizada na pesquisa.**

Antes do início de cada ensaio foram realizadas coletas de 30L de lodo anaeróbio, provenientes dos reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*) da Estação de Tratamento de Esgoto Monjolinho em São Carlos-SP. A estação é composta por sistema de gradeamento grosso e fino, reatores UASB, mistura rápida, floculação, sistemas de flotação e desinfecção. A capacidade de tratamento é de 600L/s e a geração de lodo é cerca de 15 toneladas por dia, desaguado mecanicamente através de centrífuga e disposto em aterro sanitário.

Assim, após três coletas de amostras nos dias 20/01, 21/01 e 30/03; realizaram-se quatro ensaios com aplicação de 20L de lodo bruto em cada, variando o tipo de geotêxtil aplicado ao protótipo dentre aqueles que são apresentados a seguir:

- Ensaio 1: manta geotêxtil não tecida 1: densidade 200g/m<sup>2</sup>;
- Ensaio 2: manta geotêxtil não tecida 2: densidade 300g/m<sup>2</sup>;
- Ensaio 3: manta geotêxtil não tecida 3: densidade 400g/m<sup>2</sup>;
- Ensaio 4: manta geotêxtil não tecida 4: densidade 600g/m;

Nestes ensaios, com duração total de 3 dias, foram avaliados o desaguamento e a secagem do lodo e também a qualidade do líquido drenado. Antes da realização de cada ensaio, foi determinada a caracterização do lodo bruto de acordo com os parâmetros de controle definidos e métodos preconizados pela APHA/AWWA/WEF (2001) conforme apresenta a Tabela 1.

**Tabela 1: Parâmetros analisados e métodos utilizados para caracterização do lodo bruto.**

Material analisado	Parâmetros	Unidade	Procedimento (APHA/AWWA/WEF)
Amostras de 20L de Lodo Bruto	Concentração de sólidos totais	mg/L	2540 B
	Teor de sólidos totais	%	2540 G

Para caracterização do lodo bruto buscou-se homogeneizar as amostras de 20L, de forma a evitar a deposição dos sólidos no fundo dos recipientes, e consequentemente tornar a caracterização mais representativa. Para tal, foram recolhidas 500ml de lodo do volume total aplicado em cada ensaio para determinação dos parâmetros em triplicata. Considerou-se a média aritmética dos resultados obtidos como valor característico da concentração e do teor de sólidos totais. Então realizou-se o cálculo da Taxa de Aplicação de Sólidos em  $\text{kgST.m}^{-2}$ , a partir da Equação 1, na qual o volume de lodo aplicado ao sistema é representado pela letra V (L), a média da concentração de sólidos totais inicial por ST ( $\text{kg.L}^{-1}$ ) e área de fundo do protótipo do LD por A ( $\text{m}^2$ ).

$$\text{Taxa de Aplicação de Sólidos} = (V/A).ST \text{ [kgST.m}^{-2}\text{]} \quad \text{equação (1)}$$

Após a aplicação de 20L de lodo nos protótipos foi medida a vazão de drenagem; o volume acumulado do líquido drenado e a porcentagem de redução de volume de lodo em intervalos de 1min, 10min, 30min, 60min e a cada 60min (1hora) até quando a vazão atingiu valor inferior a 10 mL/min, conforme Barroso (2007). A vazão foi medida através de um volume pré-definido cujo tempo para coleta foi aferido com cronômetro. O volume acumulado foi quantificado através da coleta do líquido drenado na parte inferior do LD. Por fim, a porcentagem de redução de volume de lodo foi calculada pela Equação 2, onde temos as variáveis que são o volume inicial total aplicado no ensaio ( $V_{it}=20\text{L}$ ) e o volume acumulado drenado em determinado tempo de ensaio ( $V_{ad}$ ):

$$\% \text{ Redução de Volume do Lodo} = (V_{ad}/V_{it}).100 \text{ [\%]} \quad \text{equação (2)}$$

Ainda na fase de drenagem, nos intervalos em que foi medida a vazão, também foram coletadas amostras do líquido drenado para verificar sua qualidade durante a primeira hora de ensaio. As variáveis de controle definidas para essa análise foram: cor, turbidez e pH. Sua determinação ocorreu conforme métodos e recomendações instituídos pela APHA/AWWA/WEF (2001) conforme apresenta a Tabela 2.

**Tabela 2: Parâmetros e métodos utilizados para análise da qualidade do drenado.**

Material analisado	Parâmetros	Unidade	Procedimento (APHA/AWWA/WEF)
Líquido drenado	Cor aparente	PtCo	2120 B
	Turbidez	UTN	2130 B
	pH	-	4500-H <sup>+</sup> B

Ao final da fase de drenagem foi coletada uma amostra do lodo desaguado para verificar o teor de sólidos totais. A partir de então, iniciou-se a fase de secagem, onde foram coletadas amostras do lodo desaguado diariamente durante 3 dias, visando quantificar a evolução do processo de secagem até que fosse atingido o teor de sólidos por volta de 20%. As análises do teor de sólidos totais foram feitas de acordo com método recomendado pela APHA/AWWA/WEF (2001) e apresentado anteriormente na tabela 1.

## RESULTADOS OBTIDOS

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para a caracterização do lodo bruto aplicado nos quatro ensaios. Ressalta-se que a amostra 3 do Ensaio 4 foi perdida e os parâmetros iniciais deste ensaio foram determinados em duplicata.



**Tabela 3: Determinação da concentração de sólidos totais do lodo bruto e da Taxa de Aplicação de Sólidos dos ensaios.**

Parâmetro:	Ensaio:	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média [mg/L]:	TAS [kgST.m <sup>-2</sup> ]
Concentração de sólidos totais do lodo bruto [mg/L]	Ensaio 1: Manta 200g/m <sup>2</sup>	42.820	45.950	47.290	45.353	7,41
	Ensaio 2: Manta 300g/m <sup>2</sup>	43.680	43.860	42.520	43.353	7,08
	Ensaio 3: Manta 400g/m <sup>2</sup>	41.210	45.520	46.620	44.450	7,26
	Ensaio 4: Manta 600g/m <sup>2</sup>	48.200	49.920	-	48.920	7,99

**Tabela 4: Determinação do teor de sólidos totais do lodo bruto dos ensaios.**

Parâmetro:	Ensaio:	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média [%]:
Teor de sólidos totais do lodo bruto [%]	Ensaio 1: Manta 200g/m <sup>2</sup>	4,22	4,59	4,68	4,50
	Ensaio 2: Manta 300g/m <sup>2</sup>	4,36	4,33	4,22	4,30
	Ensaio 3: Manta 400g/m <sup>2</sup>	4,14	4,58	4,67	4,46
	Ensaio 4: Manta 600g/m <sup>2</sup>	4,76	4,96	-	4,86

Mesmo com amostras coletadas do Reator UASB da ETE em dias diferentes (20/01/16; 21/01/16 e 30/03/16) conseguiu-se concentrações e teores de sólidos totais equivalentes, o que é muito importante para a comparação dos resultados obtidos entre as diferentes mantas geotêxteis. Além disso, as condições de Taxa de Aplicação de Sólidos e teor de sólidos inicial são semelhantes às condições empregadas na pesquisa de Silva e Chernicharo, 2007, possibilitando relacionar os resultados das duas pesquisas.

Quanto a qualidade do líquido drenado recolhido nos ensaios, a Tabela 5 apresenta os resultados para os intervalos de 1min, 10min, 30min e 60min, conforme determinado pela metodologia.

**Tabela 5: Parâmetros de qualidade do líquido drenado para os ensaios**

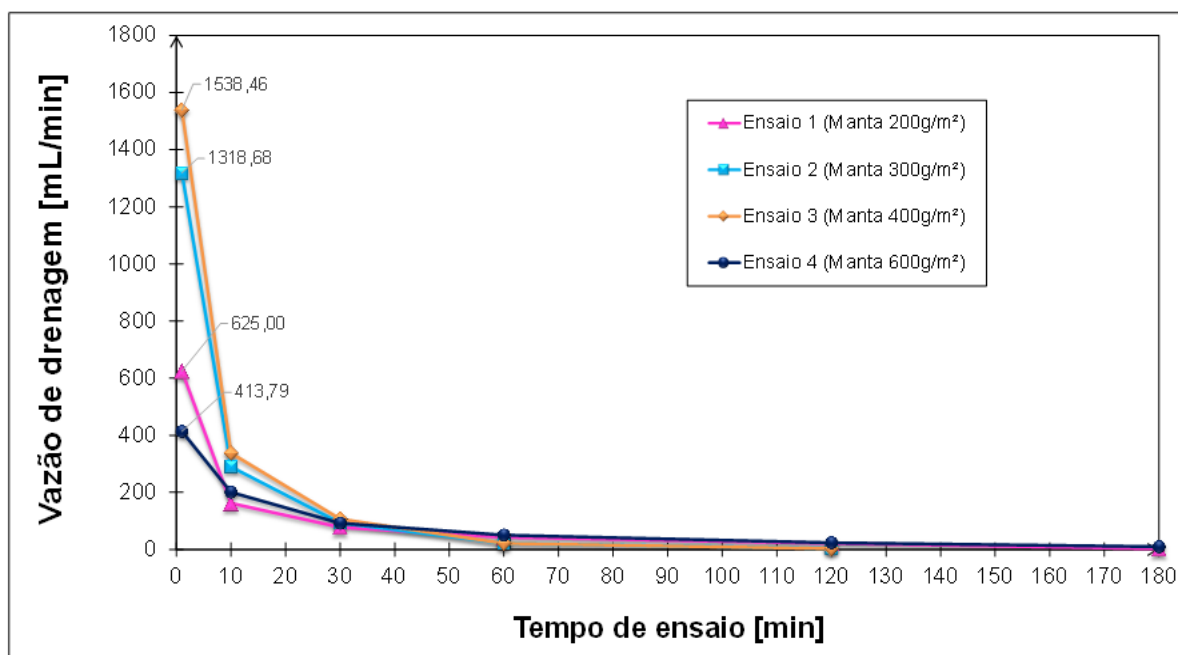
Tempo de ensaio:	Ensaio 1 (Manta 200g/m <sup>2</sup> )			Ensaio 2 (Manta 300g/m <sup>2</sup> )			Ensaio 3 (Manta 400g/m <sup>2</sup> )			Ensaio 4 (Manta 600g/m <sup>2</sup> )		
	Cor aparente [PtCo]	Turbidez [UTN]	pH	Cor aparente [PtCo]	Turbidez [UTN]	pH	Cor aparente [PtCo]	Turbidez [UTN]	pH	Cor aparente [PtCo]	Turbidez [UTN]	pH
1 min	900	356,3	7,9	705	242,0	6,85	1405	171,0	6,87	414	159,5	7,95
10 min	209	84,2	8,25	525	83,0	6,93	528	64,0	6,93	155	48,75	8,32
30 min	122	47,9	8,4	395	46,0	7,02	332	41,0	7,15	121	34,8	8,39
60 min	95	35,2	8,35	279	31,0	7,23	323	34,0	7,51	90	26,95	8,38

Ressalta-se que a qualidade do líquido drenado, apresentado na Tabela 5, melhora a medida que o tempo de drenagem evolui, o que pode ser explicado pela colmatação dos vazios da manta geotêxtil, auxiliando a retenção dos sólidos. Nota-se que a turbidez apresentou relação direta com a densidade da manta. Quanto maior a gramatura do geotêxtil menor é a turbidez inicial do ensaio, sendo que a manta de 600g/m<sup>2</sup> apresentou o melhor resultado desse parâmetro ao final de 1 hora de drenagem, alcançando turbidez de 27 UTN.

Existe também relação entre a cor aparente e a densidade da manta, embora esta não seja evidenciada quanto àquela apresentada pela turbidez. Ainda assim, a manta de 600g/m<sup>2</sup> também mostrou os melhores resultados para esse parâmetro chegando a cor aparente de 90 PtCo após 1h. Contudo cabe salientar que a manta de 200g/m<sup>2</sup> apresentou valores muito próximos aos da manta de 600g/m<sup>2</sup> após o tempo de 30 minutos de ensaio, diminuindo as discrepâncias iniciais.

Isso pode ser explicado devido a maior retenção de sólidos apresentada pela manta 4, que possui maior densidade, o que implica em menores valores de cor e turbidez que aqueles das outras mantas. Por fim, o pH não apresentou relação significativa nesses ensaios, variando relativamente conforme o tempo decorrido de ensaio.

Ainda durante a fase de desaguoamento foram avaliadas as taxas de drenagem ocorridas durante os ensaios. Dessa forma, a Figura 3 exibe o gráfico de variação da vazão de drenagem nos intervalos pré-determinados pela metodologia.



**Figura 3: Variação da vazão de drenagem da água livre para os ensaios.**

Analisando a figura, percebe-se que as vazões possuem comportamento equivalente independentemente do tipo de manta, tendendo a zero rapidamente. A manta 3 atingiu a maior vazão inicial, com aproximadamente 1540mL/min, bem próxima da manta 2 com 1320 mL/min. Ambos geotêxteis alcançaram vazão menor do que 10mL/min após 2 horas de ensaio, caracterizando o término da fase de drenagem. Para as mantas 1 e 4, os valores de vazão são bem inferiores quando comparados com as mantas 2 e 3. Além disso, nota-se que o critério de parada do ensaio de desaguoamento só foi alcançado pelas mantas 1 e 4 após 180 minutos.

Por fim, percebe-se que a manta de 400g/m² apresentou valor de vazão no tempo de 1 (um) minuto cerca de 3,5 vezes superior a vazão do ensaio 4 no mesmo tempo, contudo a partir do tempo de 30 minutos, os valores de vazão apresentados por todas as mantas foram sempre próximos, confirmando a tendência das curvas.

Na Figura 4 têm-se os resultados do volume acumulado da água livre drenada do lodo anaeróbico nos ensaios de desaguoamento em Leito de Drenagem (LD), enquanto a Figura 5 ilustra os resultados de redução de volume do lodo anaeróbico.

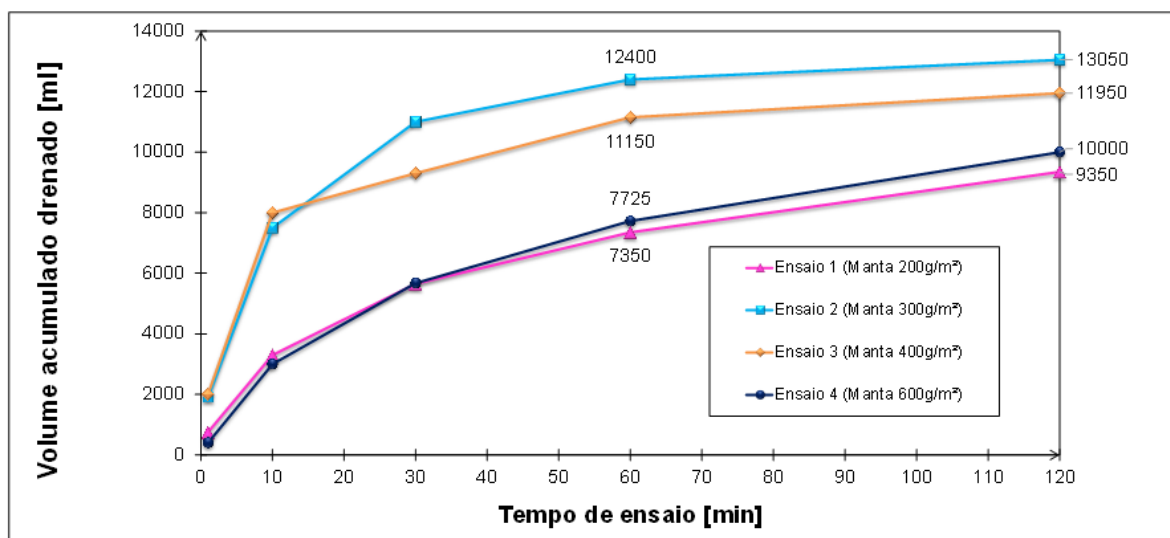


Figura 4: Variação do volume acumulado de líquido drenado em função do tempo para os ensaios

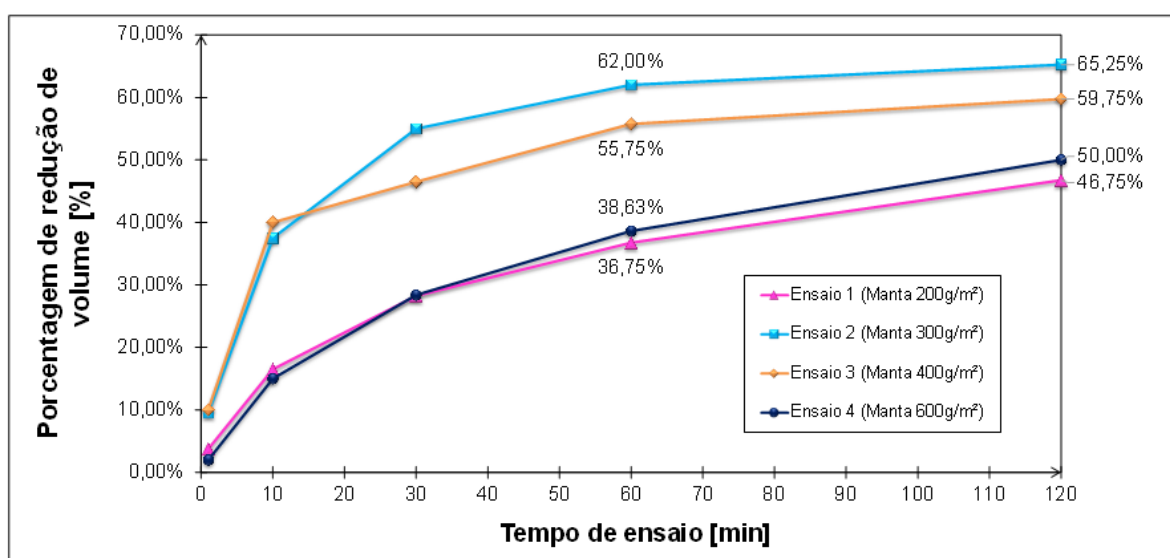


Figura 5: Variação da redução de volume do lodo anaeróbio de ETE para os quatro ensaios.

Analisando as Figuras 4 e 5, percebe-se uma redução de 36,75% do volume de lodo para a manta 1, enquanto a manta 2 apresentou redução de 62% do volume no mesmo tempo. Após duas horas de ensaio alcançou-se resultados na faixa de 46% e 66%. Pelo fato de as vazões de drenagem dos ensaios 2 e 3 serem bem maiores do que as vazões dos ensaios 1 e 4 esperava-se que o volume acumulado drenado e a porcentagem de redução também fossem maiores nos referidos ensaios.

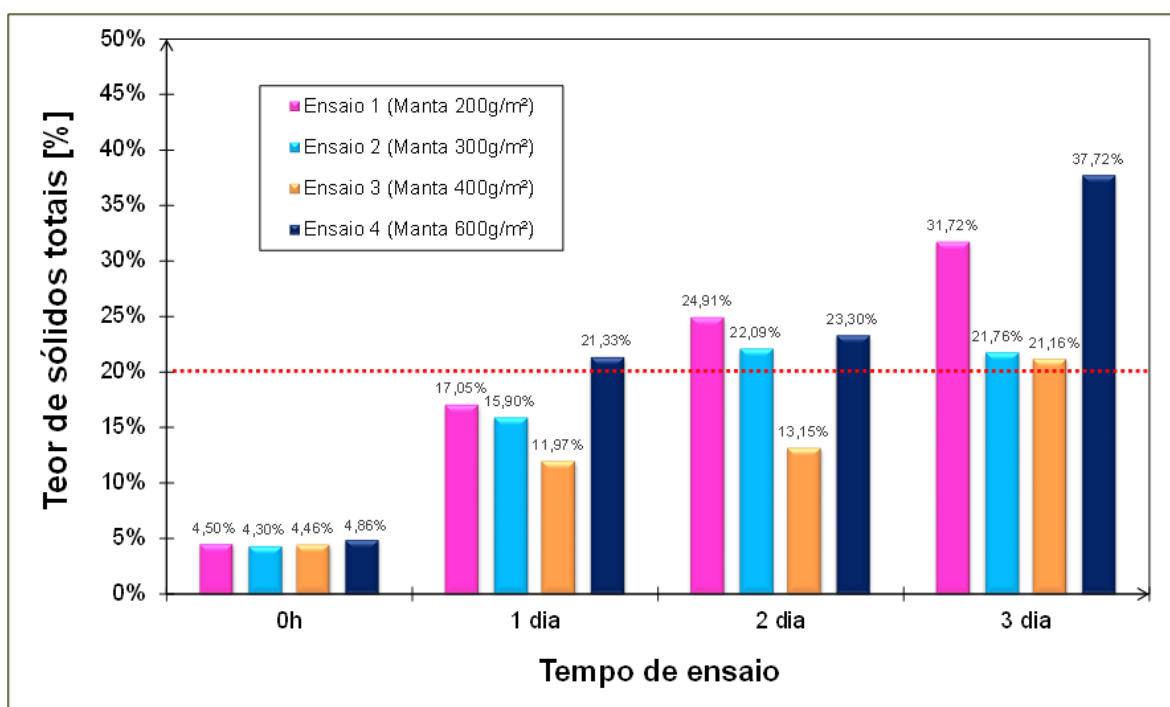
A média dos resultados dos quatro ensaios levou a um volume acumulado drenado de 11L, ou seja, redução de 55% do volume de lodo aplicado em apenas duas horas. Esse fato é importante pois em caso de aplicação do desaguamento em escala real, o volume drenado poderia circular novamente no sistema de tratamento, diminuindo a geração de resíduo. Cabe ressaltar que há relação entre a densidade da manta geotêxtil e o volume drenado, pois com exceção da manta 1, a quantidade de líquido drenado foi inversamente proporcional a gramatura das mantas, ou seja, quanto maior a densidade do geotêxtil, menor os volumes drenados e consequentemente a redução da quantidade de lodo.

Assim, as mantas de 300g/m² e 400g/m² apresentaram as vazões iniciais mais acentuadas e por sua vez também permitiram a drenagem de maior volume de líquido, sendo 13L e 11,95L, que resultou em redução do volume



de lodo de 65,25% e 59,75% respectivamente. Contudo, apesar de apresentarem melhores resultados para a drenagem da água livre, a análise qualitativa do drenado atestou uma pior qualidade dessa água em relação àquela drenada pela manta de 600g/m<sup>2</sup>. O parâmetro de cor aparente é um balizador dessa conclusão, sendo que os ensaios 1 e 4 apresentaram valores finais da ordem de 90 PtCo, enquanto o ensaio 2 alcançou 279 PtCo após 60 minutos e o ensaio 3 atingiu 323 PtCo para o mesmo intervalo de tempo. Apesar disso, observou-se que a qualidade do drenado melhorou à medida que o tempo de drenagem evoluiu independentemente da manta.

A Figura 6 apresenta a evolução do teor de sólidos da torta de lodo desaguado ao longo do tempo durante a fase de secagem do lodo.



**Figura 6: Evolução do teor de sólidos totais da torta de lodo em função do tempo.**

Através da análise da Figura 6 percebe-se que após 1 dia de secagem o lodo alcançou um teor de aproximadamente 12% no menor desempenho (Ensaio 3 - Manta 400g/m<sup>2</sup>) e na média dos quatro ensaios cerca de 16,5%, valor compatível com Mortara (2011), que independente da dosagem de polímero atingiu em seus ensaios teor de sólidos próximo a 13% em 1 dia e Silva e Chernicharo (2007) usando leito de secagem convencional com TAS 7,5kgST/m<sup>2</sup> e teor de sólidos inicial do lodo bruto da ordem de 4% alcançou 13,4% de ST após 1 dia.

De acordo com a Figura 6, após 2 dias de secagem as tortas de lodo para os quatro ensaios, com exceção da do ensaio 3, alcançaram teores de sólidos maiores do que 20%. Ao terceiro dia, todos os ensaios atingiram mais do que 20% de teor de sólidos, com destaque para os ensaios 1 (Manta 200 g/m<sup>2</sup>) e 4 (Manta 600 g/m<sup>2</sup>) que chegaram a 31,72% e 37,72% respectivamente. Esse fato é relevante no sentido de que a porcentagem de sólidos da torta de lodo desaguada através do Leito de Drenagem atingiu em apenas 3 dias valores comumente alcançados por métodos de desaguamento mecânicos, ressaltando-se as vantagens do LD, que ao contrário das centrífugas e filtros-prensa por exemplo, não utilizam energia elétrica e produtos químicos.

De acordo com Mortara (2011), valores entre 25% e 30% no teor de sólidos só foram alcançados após 30 dias, independente do uso e dosagem de condicionante. O mesmo autor realizou dois ensaios sem a utilização de produtos químicos, sendo que em um deles, com teor de sólidos inicial de 2,76%, altura inicial de lodo de 45cm e TAS de 15,35kg/m<sup>2</sup> atingiu torta com concentração de 34,65% de sólidos totais e altura final de 10cm após 34 dias de secagem, sendo que após quatro dias alcançou cerca de 16% de ST.

Considerando os resultados apresentados neste trabalho, os ensaios 1 e 4 superaram o teor de 30% em apenas 3 dias. Contudo, deve-se ressaltar que os volumes de lodo aplicado nos LD e TAS são diferentes dos utilizados por Mortara (2011), que analisou o desaguamento de lodo de ETE aplicando por volta de 700 litros de lodo em cada LD e TAS aproximadamente duas vezes maiores do que aquelas empregadas nesta pesquisa, que avaliou o desaguamento de 20L de lodo e TAS entre 7 e 8 kgST/m<sup>2</sup>. Dessa forma, o volume e TAS podem influenciar de forma significativa nos tempos e teores de sólidos finais do lodo.

Por outro lado, o desempenho acentuado apresentado pelos ensaios 1 e 4 em relação aos ensaios 2 e 3 pode ser explicado pelas condições climáticas mais favoráveis da época em que foram realizados estes ensaios. A evolução do teor de sólidos pode ser avaliada através da Figura 7, que apresenta o aspecto do lodo desaguado durante a fase de secagem.



**Figura 7: Aspecto do lodo desaguado após 1, 2 e 3 dias de ensaio para a manta de 400g/m<sup>2</sup>.**

Percebe-se a tendência de secagem e abertura de fissuras no lodo que aumentam a área exposta ao sol e também permitem possíveis escoamentos de água de chuva sem que essa água seja adsorvida pelo lodo. Observa-se também a tendência da torta em desagregar-se e formar frações cada vez menores e mais secas, semelhantes a torrões de solo seco.

Em relação aos resultados de desaguamento de lodo de UASB em leito de secagem convencionais (areia), Silva e Chernicharo (2007) atingiram 66% de teor de sólidos em 20 dias, com teor de sólidos inicial de aproximadamente 4% e TAS de 7,5kgST/m<sup>2</sup> e teor de sólidos 43% em 20 dias para o mesmo lodo com TAS 12,5kgST/m<sup>2</sup>. Esta pesquisa apresentou condições iniciais similares, com teor de sólidos inicial da ordem de 4,5% e TAS por volta de 7,5kgST/m<sup>2</sup>, apresentando evolução significativa em apenas 3 dias atingindo 37,72% de ST no Ensaio 4 (manta 600g/m<sup>2</sup>).

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Foram encontradas poucas pesquisas relacionadas ao desaguamento de lodo gerado em ETE em Leitos de Drenagem, porém com resultados promissores. Os resultados de pesquisas sobre desaguamento de lodo em LD são mais direcionados ao lodo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETA), que concluem a eficiência e aplicabilidade deste sistema natural de redução de volume de lodo gerado em ETA.

Os resultados preliminares de desaguamento de lodo anaeróbio em LD permitem concluir que há forte tendência em reduzir o volume de lodo e aplicabilidade deste sistema natural, que não usa energia elétrica e produtos químicos (condicionantes). As caracterizações do lodo bruto em termos de sólidos totais inicial foram muito similares nos quatro ensaios, possibilitando a comparação entre os resultados obtidos para as diferentes mantas.

Os resultados demonstraram que a drenagem até os primeiros 30 minutos é influenciada pelo tipo de manta geotêxtil, sendo que a partir desse período os valores de vazão se aproximam tendendo a zero em no máximo 3 horas. Durante a fase de drenagem houve redução considerável de volume de lodo superior a 50% em todos os ensaios.

Quanto aos parâmetros de qualidade do líquido drenado houve sensível diferença nos valores iniciais, intervalos de 1min e 10min, sendo que maiores gramaturas da manta geotêxtil levaram a menores valores de turbidez inicial. A partir de 30 minutos notou-se uma tendência a valores similares de turbidez, com média de 32 UTN após 60 minutos.

Por fim, a secagem mostrou-se eficaz, embora a evolução no teor de sólidos não demonstrou ser afetada diretamente pela mudança no tipo de manta geotêxtil, sendo que para todos os tipos, valores superiores a 20% foram atingidos ao terceiro dia de ensaio. Dessa forma, destaca-se a manta de 600g/m<sup>2</sup>, que foi aquela que apresentou os melhores resultados qualitativos, e também que serão realizados novos ensaios nessa linha de pesquisa, avaliando diferentes composições de mantas. Os resultados esperados nesses próximos ensaios permitirão uma melhor avaliação do desaguamento e redução de volume do lodo em LD e comparação com os valores encontrados na literatura.

Além disso, recomenda-se avaliar efeitos da aplicação de diferentes Taxas de Aplicação de Sólidos e da utilização sucessiva das mantas geotêxteis visando analisar os possíveis efeitos causados por ciclos contínuos de operação, principalmente em relação à vazão e qualidade do líquido drenado. Por fim, recomenda-se também a utilização de cobertura plástica sobre o LD visando ampliar a eficiência da secagem do sistema, conforme Reis (2011).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa (Processo n°. 123356/2015-6).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT (1989). NBR 10.644:1989. Águas – Determinação de Resíduos (Sólidos) - Método Gravimétrico. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1989, 7p.
2. ABNT (2004). NBR 10.004:2004. Resíduos sólidos - Classificação. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2004, 71 p.
3. ACHON, C.L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J.S. (2008). Leito de Drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. Revista Engenharia Sanitária e ambiental. ABES, Rio de Janeiro. Vol. 13 – N° 1 – jan/mar 2008, 54-62p. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522008000100008>
4. APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (2001). Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater. 20.ed. Washington DC, USA. 2001.
5. BARROSO, M. M.; ACHON, C. L.; REIS, R. F.; CORDEIRO, J. S. (2014) Drainage Bed: A Natural System for WTP Sludge Dewatering and Drying with Different Coagulant Chemicals in Tropical Countries. Journal of Water Resource and Protection, vol. 06, p. 1029-1036, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.611097> ; ISSN Online: 1945-3108
6. BRASIL. (2005) Resolução CONAMA No 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2005.
7. BRASIL. (2006) Resolução CONAMA N.º 375 de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2006, 32 p.
8. BRASIL. (2010) Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Congresso Nacional, Brasília, DF, 2010.
9. BRASIL. (2011) Resolução CONAMA No 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução N° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 2011.

10. CORDEIRO, J. S. (2001) Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETA's). In: ANDREOLLI, C. V. (Coord). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Capítulo 9. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 282 p. (Projeto PROSAB).
11. CORDEIRO, J.S., REIS, R. F.; ACHON, C.L.; BARROSO, M. M. (2014). Evolução dos Leitos de Drenagem (LD) no Brasil – uma década de avanços. In: XXXIV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), Anais. Monterrey - México, 2 a 6 novembro de 2014, cod. 332-T8-Cordeiro-Brasil-1, 8 p.
12. FONTANA, A. O.; OLIVEIRA, A. C.; ARVATI NETO, O. A.; GRANELLO, E. C. A.; CORDEIRO, J. S. (2007). Redução de lodo digerido gerado em lagoas de estabilização com utilização de leito de drenagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24. Belo Horizonte/MG, 2007.
13. FONTANA, A.O. (2004) Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros – estudo de caso – ETA Cardoso. 161 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos.
14. GUIMARÃES, M. G. A., URASHIMA, D. C. & VIDAL, D. M. (2014). Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems. *Geosynthetics International*, 21, No. 5, 310–320. [<http://dx.doi.org/10.1680/gein.14.00018>].
15. KURODA, E. K.; SILVEIRA, C.; MACEDO, J. G.; LIMA, M. S. P.; KAWAHIGASHI, F.; BATISTA, A. D.; SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F. (2013) Drenagem/secagem de lodo de decantadores de ETA em manta geotêxtil. *Revista DAE*, n. 194, p.24-34, 2013.
16. MINISTÉRIO DAS CIDADES, SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL. (2016) Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016. 212 p. : il.
17. MORTARA (2011). Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 241p.
18. REALI, M.A.P. (1999) Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: REALI, M.A.P (Coord.). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 1999. 250p.
19. REIS, R.F. (2011) Estudo de Influência de Cobertura Plástica na Remoção de Água de Lodos de Estações de Tratamento de Água em Leitos de Drenagem. 131p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. São Carlos.
20. SÃO PAULO (Estado) (2014). Secretaria do Meio Ambiente. Plano de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo. 1ª ed. – São Paulo: SMA, 2014, 350 p.
21. SILVA, C. M.; CHERNICHARO, C. A. L. (2007). “Desaguamento em leitos de secagem de lodo de reatores UASB tratando esgotos domésticos: rendimento do leito e características do percolado”. Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, Brasil, v.1, p. 1-14.
22. VON SPERLING, M. (2005) Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452 p.