

II-155 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SECAGEM DE LODO AERÓBIO EM LEITO DE SECAGEM COM PISO DE BLOCOS DRENANTES DURANTE AS ESTAÇÕES DO ANO NO BRASIL

Sabrina Mariel Corrêa da Silva⁽¹⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pelo Centro Universitário de Lins – UNILINS. Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental – Área Saneamento na Universidade Estadual Paulista (UNESP) “Júlio de Mesquita Filho”.

Gustavo Henrique Ribeiro da Silva⁽²⁾

Engenheiro Civil. Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia de Bauru - Universidade Estadual Paulista (UNESP) “Júlio de Mesquita Filho”.

Jaqueline Cardoso Ribeiro⁽³⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pelo Centro Universitário de Lins – UNILINS. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pelo Centro Universitário de Lins – UNILINS. Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental - Saneamento na Universidade Estadual Paulista (UNESP) “Júlio de Mesquita Filho”.

Endereço⁽¹⁾: Rua Ana Augusta, 439, apart 103, Bl 4 – Sorocaba/SP - CEP: 18040-040 - Brasil - Tel: (15) 99803-0566 e-mail: sabrina-mcs@hotmail.com

RESUMO

Diante do aumento de volume de esgoto tratado, e consequentemente do lodo gerado durante o processo, empresas têm buscado por alternativas mais econômicas e eficientes para desaguamento e secagem de lodo, devido ao seu alto custo de gerenciamento e disposição. O leito de secagem com piso de blocos drenantes é uma nova modalidade de método natural para desaguamento e secagem do lodo visto como uma boa alternativa para pequenos sistemas de tratamento de esgoto. Porém a eficiência na secagem de lodo não depende somente do sistema de desaguamento, depende também evaporação, que por sua vez depende de vários fatores, tais como climatológicos, tipo e carga aplicada de lodo. Portanto o presente trabalho avaliou o comportamento de secagem de diferentes volumes e consequentemente taxas de aplicação de lodo aeróbio em leito constituído de blocos drenantes em quatro épocas do ano no Brasil. O leito com piso de blocos drenantes mostrou-se eficiente na drenagem de lodo quando bem floculado reduzindo a umidade do lodo em 10 vezes após 1 dia independente da taxa aplicada e condição climática. Por outro lado a secagem de lodo mostrou-se dependente também da taxa de aplicação e altura de camada inicial de lodo após o desaguamento. A curva de secagem para os quatro testes tiveram formato similar, mas o tempo de secagem variou de acordo com a taxa aplicada. O teor de sólidos máximo encontrado foi de 95,3% em 36 dias no outono e 93,8% ST em 22 dias no verão.

PALAVRAS-CHAVE: Desaguamento de Lodo, Secagem de lodo, Leito de Secagem, Bloco Drenante.

INTRODUÇÃO

O setor de saneamento no Brasil nos últimos anos tem recebido consideráveis investimentos por conta das pressões cada vez maiores na ampliação e melhoria dos serviços de potabilização de água e do tratamento de esgoto doméstico. Como consequência destas melhorias, tem-se aumentado crescentemente o volume dos resíduos gerados nas estações de tratamento de esgoto (ETE), entre eles, o lodo.

O gerenciamento do lodo tem como principal finalidade estabilizar, higienizar, reduzir o volume e proporcionar uma adequada disposição. O método de disposição mais utilizado ainda é o envio a aterros sanitários. Para isto o lodo precisa apresentar teores de sólidos em torno de 30-40% para facilitar o manejo, redução no custo do transporte e redução de volume na disposição final.

O lodo gerado no tratamento de esgoto pelo processo de lodos ativados sem adensamento apresenta teor de sólidos entre 0,5 – 1,5% (JORDÃO; PESSOA, 2005) e precisa ser desaguado para redução de volume de água. O leito de secagem é uma das técnicas mais antigas utilizadas para o desaguamento do lodo e geralmente são

adotados em pequenos sistemas pelo baixo nível de investimento. O projeto de leito de secagem no Brasil é caracterizado por um tanque retangular, com paredes e fundo de concreto, no interior do tanque é incluído uma camada filtrante composta por areia e brita, e por fim a camada de suporte de tijolos (ABNT, NBR12209/2011). Apesar do baixo valor de investimento, os leitos de secagem apresentam desvantagens dentre elas elevada área requerida e lenta remoção da torta seca, lodo com teor de umidade abaixo de 70%.

Com o objetivo de minimizar as desvantagens deste processo natural de desaguoamento e secagem, evoluções nesse sistema têm surgido, dentre os quais podemos destacar: leito de secagem com piso de blocos drenantes, também conhecido como *wedge-wire* ou *wedgewater*.

O bloco drenante é um painel em poliuretano ou polipropileno com ranhuras em formato de cunha que substitui a areia e brita do leito de secagem convencional e permite uma eficiente filtragem de lodo. O leito *wedge-wire* tem sido uma alternativa para desaguoamento de lodo desde 1970 nos Estados Unidos. De acordo com Wang *et al* (2007) o leito de secagem com estes painéis possui drenagem constante e rápida, maior aplicação de taxa de lodo, não colmata o meio filtrante, fácil manutenção e limpeza do leito.

Apesar de ser uma tecnologia antiga, existem poucos estudos sobre seu uso. Em 1992, US Army Corps of Engineers fez um relatório comparando o leito de drenagem *wedgewater* e o leito de sistema a vácuo assistido. Através de pesquisa com diversos operadores de estações de tratamento de esgoto que utilizavam os dois tipos de leitos, a empresa chegou à conclusão que o sistema *wedgewater* fornece a mesma eficiência que o leito a vácuo assistido, mas com menores problemas operacionais e de manutenção.

Aqui no Brasil o leito de secagem com piso de bloco drenante ainda é uma tecnologia recente. França (2012) foi o primeiro a testar em um leito piloto para desaguoamento de lodo de tanques de aeração compartimentados na ETE Bom Retiro, distrito de Angatuba/SP. De acordo com França o sistema de leito de secagem piloto com o bloco drenante, apresentou excelente desempenho, porém a implementação em larga escala depende de uma análise de custo/benefício, uma vez que operacionalmente se mostrou uma solução interessante para desaguoamento do lodo. Almeida (2012) desenvolveu duas unidades piloto de leito com blocos drenantes e nelas inseriu lodo aeróbio e anaeróbio de reatores da unidade de tratamento de esgoto. As coletas foram realizadas num ciclo de 24 horas e analisadas quanto a sólidos suspensos totais, umidade da torta e captura de sólidos. Os resultados obtidos para umidade de torta variaram entre 80 e 90% e a captura de sólidos variou acima dos 90%. Silva e Pohlmann (2013) avaliaram a eficiência de um leito de secagem modificado com piso de blocos drenantes na ETE de uma empresa de Itu/SP. Além da tecnologia do piso de blocos drenantes o que contribuiu para os resultados do teste com lodo aeróbio de acordo com os autores foi a dosagem de polímero e a cobertura tipo estufa agrícola do leito. Os resultados para teor de sólidos secos foram muito satisfatórios, em apenas 22 dias com condições climáticas variando entre chuva e sol, obteve-se 96,24% de sólidos secos. Silva *et al* (2015) acompanhou o descarte de dois volumes diferente de lodo aeróbio a 0,6% de sólidos condicionado com polímero em uma mesma área de leito com piso de blocos drenantes e obteve resultados para redução de volume de aproximadamente 70% de água livre até uma hora após o descarte.

Porém, apesar do leito com bloco drenante se mostrar eficiente na drenagem do lodo, um dia após o descarte o lodo encontra-se muito úmido para a disposição, com teores de sólidos de 4 – 6%. Após toda água livre ser drenada a umidade remanescente do lodo é chamado de água celular, e está quimicamente ligada às partículas sólidas correspondendo a 10% do volume do lodo. A água celular pode ser removida através de mudança de estado de agregação, sendo por evaporação ou congelamento (VAN HAANDEL; MORAIS, 1999). De acordo com van Haandel & Lettinga (1994), a secagem do lodo depende da taxa de evaporação, que por sua vez depende de vários fatores, tais como climatológicos, tipo e carga aplicada de lodo.

Baseado nessas justificativas, este trabalho visou à avaliação do comportamento de secagem de diversas taxas de aplicação superficial (TAS) de lodo aeróbio em leito de blocos drenantes e cobertura tipo estufa agrícola durante as quatro estações do ano do Brasil, com e sem a operação do revolvimento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes foram realizados em escala real na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de uma indústria no município de Itu/SP. O tratamento do esgoto é composto por valo de oxidação, processo de lodos ativados com aeração prolongada e decantador secundário, e trata uma vazão de 60m³/d. Como a idade do lodo neste processo é mais alta, a estabilização do lodo ocorre no tanque de aeração, excluindo a necessidade da etapa de digestão. Também não há etapa de adensamento antes do desaguamento, o lodo é descartado diretamente do fundo do decantador, condicionado com aplicação de polímero em linha e floculação hidráulica. O leito de secagem constitui-se de piso de bloco drenantes e possui cobertura tipo estufa agrícola transparente com cortinas que podem estar levantadas ou abaixadas para permitir a ventilação.

Foram utilizadas 2 células de leito nos testes, cada uma com área de 13,44m² (2,10 x 6,40m). O volume e a TAS foram pré-determinados conforme a vazão da bomba de alimentação de 8,3 m³/h na frequência de 44Hz e a concentração de sólidos inicial do lodo determinado de acordo com a NBR 10664/1989. Com a concentração média de sólido inicial encontrado de 6200mg/L (0,6% ST) para o lodo já floculado, a taxa aplicada no leito 1 foi de aproximadamente 3,5kgST/m² e no leito 2 o dobro, ou seja aproximadamente 7,0kgST/m². Com isso o volume pré-determinado descartado em cada célula foi, 7,6m³ para o leito 1 e, 15,2m³ para o leito 2.

Os descartes nas duas células não foram realizados simultaneamente, porém no mesmo dia, para que fossem avaliados durante o mesmo período de secagem e condições climáticas. O primeiro teste ocorreu no dia 13 de abril, época de outono no Brasil, e durou 36 dias. Não houve revolvimento do lodo, ou seja, a forma que o lodo se distribuiu durante o descarte ficou até o final do período de secagem. Já o segundo teste começou dia 14 de julho, estação de inverno, e teve duração de 50 dias e houve revolvimento manual do lodo com rastelo uma vez por semana. O Teste 3 teve início no dia 28 de setembro (primavera) e o período de secagem foi de 36 dias, havendo revolvimento manual também. Já o Teste 4 iniciou-se dia 13 de janeiro (verão) e teve duração de 22 dias, sem revolvimento. A duração de cada Teste foi influenciada pela rotina de operação de descarte da ETE.

Como a avaliação do desempenho do desaguamento e secagem de lodo ocorreu em descartes na escala real, problemas operacionais do sistema afetaram os volumes de lodo dos Testes 3 e 4. Durante o desaguamento de lodo do Teste 3 foi notado entrada de ar na bomba de alimentação do polímero, afetando o desempenho e ocasionando uma má floculação do lodo, e consequentemente, liberação de menos água livre. Isto resultou em um menor volume de lodo aplicado no leito 2, aproximadamente 12,4m³, para que não houvesse transbordamento. Já o problema ocorrido durante o Teste 4 foi com o desempenho da bomba de descarte de lodo, que mesmo aumentando a frequência para 60Hz apresentou vazão de 2,5m³. Sendo assim, foi descartado 2,5m³ no leito 1, e 5m³ no leito 2.

Com isso obteve-se 4 variáveis, sendo:

T1_{T1} = Teste 1 (outono sem revolvimento), taxa 1 (3,5kg/m²);
T1_{T2} = Teste 1 (outono sem revolvimento), taxa 2 (7,0kg/m²);
T2_{T1} = Teste 2 (inverno com revolvimento), taxa 1 (3,5kg/m²);
T2_{T2} = Teste 2 (inverno com revolvimento), taxa 2 (7,0kg/m²);
T3_{T1} = Teste 3 (primavera com revolvimento), taxa 1 (3,5kg/m²);
T3_{T2} = Teste 3 (primavera com revolvimento), taxa 2 (5,7kg/m²);
T4_{T1} = Teste 4 (verão sem revolvimento), taxa 1 (1,2kg/m²);
T4_{T2} = Teste 4 (verão sem revolvimento), taxa 2 (2,3kg/m²);

Durante o monitoramento foi utilizado um termohigrômetro dentro do leito para acompanhar a temperatura e umidade interna. As anotações dos dados eram realizadas sempre às 17 horas nos dias de coleta de amostra de lodo. As cortinas dos leitos permaneciam sempre abertas para permitir a ventilação, com exceção aos dias que ocorreram precipitação.

Para estimar o volume reduzido de lodo na etapa de desaguamento foi medida a altura de camada de lodo no centro a 3 metros da entrada do leito ao final da alimentação de lodo no leito, 1 hora após o encerramento do descarte e no dia seguinte.

A avaliação do comportamento de secagem do lodo aeróbio no leito com blocos drenantes foi realizada mediante o monitoramento do teor de sólidos determinado de acordo com a NBR 10664/1989. O lodo era coletado sempre no mesmo ponto, a 3 metros da entrada próximos a parede que dividia as células, conforme apresenta a Figura 1.

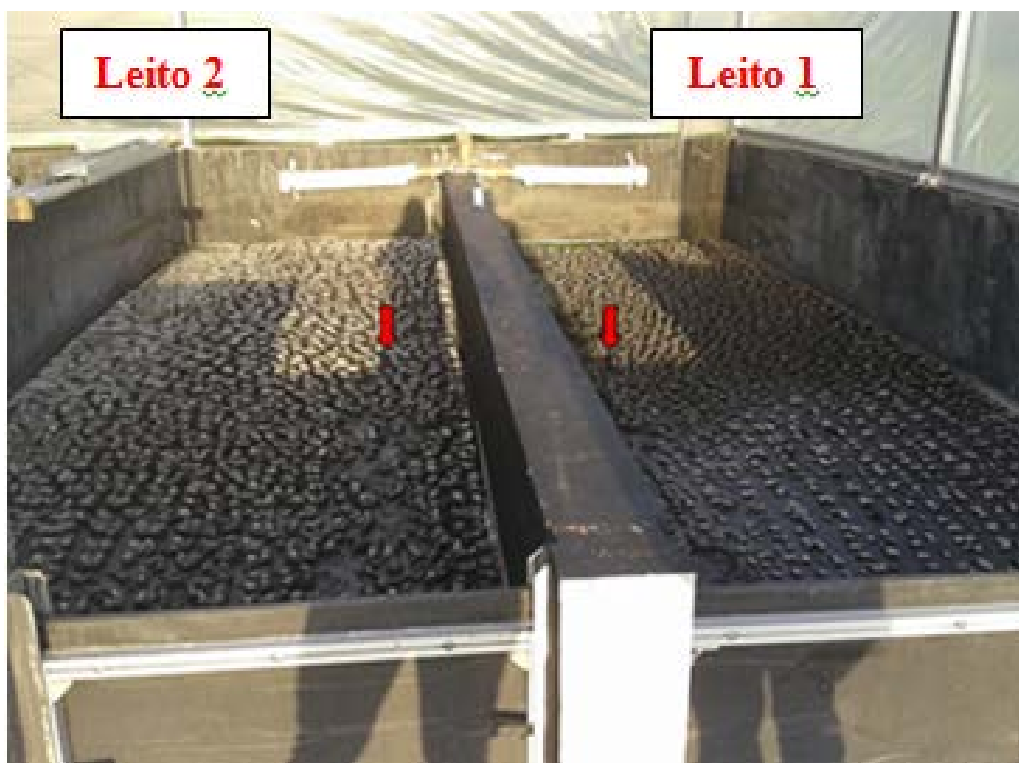


Figura 1- Leito 1 e 2 e respectivos pontos de coleta de lodo.

RESULTADOS

Condições Climatológicas

A seguir a Tabela 1 apresenta os resultados médio, máximo e mínimo para a temperatura dentro do leito durante os quatro testes. É possível observar temperaturas mais altas comparadas aos registros de temperaturas para o Brasil, mais especificamente no interior de São Paulo. Nos dias que foram acompanhados valores climatológicos registrados pelo CPTEC/INPE (<http://www.cptec.inpe.br/>), a média da temperatura interna obteve 6°C a mais que a externa. Isto foi possível devido ao uso cobertura transparente tipo estufa que aumenta a temperatura em relação ao ambiente externo. No Brasil Comparini (2001) foi um dos primeiros a desenvolver um estudo com secagem de lodo utilizando estufa agrícola na Estação de Tratamento de Esgoto de Franca/SP. A pesquisa se deu em três ciclos para abranger diferentes climas do ano e a utilização da estufa mostrou-se eficiente apresentando temperaturas do meio interno sempre superior ao meio externo. Salihoglu *apud* Souza (2012) desenvolveu uma planta na ETE de Bursa na Turquia com cobertura tipo estufa o qual permitiu gerar uma diferença média entre a temperatura interna e externa de 11% a mais.

Tabela 1: Temperaturas internas média, máxima e mínima.

Teste	Estação do ano	Duração do teste (dias)	Nº de dias anotados	Média (°C)	Máxima (°C)	Mínima (°C)
1	outono	36	13	28,5	39,9	23,4
2	inverno	50	20	29,2	35,6	16,4
3	primavera	36	12	34,9	43,4	21,6
4	verão	22	06	41,8	47,5	35,3

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados médios, máximos e mínimos para umidade interna do leito. Ocorreram dias que o termohigrômetro registrou umidade de 0% nos Testes 3 e 4, estes valores foram desprezados. Assim como a temperatura, a umidade interna do leito também foi diferente devido ao efeito estufa da cobertura plástica transparente, em média 12% a menos que a umidade relativa do ar externa. Segundo Andreoli *et al* (2000) a elevação da temperatura e consequentemente aumento da evaporação resultam no aumento da umidade relativa, que pode ser reduzida com a renovação do ar deixando as cortinas laterais da estufa abertas. Andreoli *et al* (2000) encontrou diferença de umidade interna de aproximadamente 10% a menos que a umidade externa.

Segundo Samudio *apud* Mortara (2011) a evaporação é a perda de água na forma de vapor do lodo para o ar, e ocorre devido ao gradiente de umidade que existe na interface com o ar. A velocidade do processo de evaporação depende da temperatura, irradiação solar e umidade ambiente, do nível d'água no lodo e do tipo de ligação entre a água e sólidos. Quanto maior a temperatura do ar, maior a taxa de transferência de calor do ar para o lodo e maior a velocidade de secagem (SAMUDIO *apud* MORTARA, 2011). De acordo com Vanzetto (2012) a evaporação é mais rápida quando a temperatura é alta, a umidade do ar é baixa e há ventilação para renovação adequada do ar. Desta forma as condições climatológicas mais favoráveis para a secagem do lodo foram durante os Testes 3 e 4 conforme apresentam os dados das Tabelas 1 e 2.

Tabela 2- Umidade interna média, máxima e mínima.

Teste	Estação do ano	Duração do teste (dias)	Nº de dias anotados	Média (%)	Máxima (%)	Mínima (%)
1	outono	36	13	57	85	23
2	inverno	50	20	41	100	23
3	primavera	36	12	28	100	20
4	verão	22	06	26	48	25

Desaguamento do lodo

A água livre compõe cerca de 70% do lodo e pode ser separada dos sólidos apenas pela força gravitacional (VAN HAANDEL & MARAIS, 1999). Como o lodo foi condicionado com uso de floculante, mais água livre é liberada. Foi observado que a drenagem da água livre acontece instantaneamente, pois durante o descarte a válvula de drenagem fica aberta. Na Tabela 3 estão apresentadas as medidas das alturas de camada de lodo atingidas nos quatro Testes. A 3ª coluna representa a altura de camada de lodo que teria caso as válvulas de drenagem ficasse fechadas enquanto ocorresse o descarte. Como não é o caso da operação da ETE, a redução de volume de lodo é significativa já no momento da alimentação do leito.

Tabela 3 - Carga hidráulica: altura de camada de lodo.

Teste	Volume de lodo (m³)	Altura da camada de lodo sem drenagem (cm)	Altura da camada de lodo máxima atingida (cm)	Redução de volume (%) após término do descarte	Altura da camada 1 hora após do descarte (cm)	Redução de volume (%) após 1 hora do descarte	Altura da camada no dia seguinte (cm)
T1 _{T1}	7,6	57	34	40	16	72	5
T1 _{T2}	15,2	113	45	60	34	70	10
T2 _{T1}	7,6	57	23	60	15	74	6
T2 _{T2}	15,2	113	44,5	60	25	78	12
T3 _{T1} *	7,6	57	43	25	25	56	16
T3 _{T2} *	12,4	92	43,5	52	35	62	26
T4 _{T1} **	2,5	18	7	61	7	61	6
T4 _{T2} **	5,0	37	11	70	10	73	8

Como pode ser observado na Tabela 3 a redução de volume para os Testes 1 e 2 foram aproximados, com exclusão do T1_{T1} que no término da alimentação do leito reduziu 40%. Os demais testes 1 e 2 apresentaram 60% de redução aproximada em volume no final do descarte e acima de 70% de redução após 1 hora do descarte.

Como mencionado anteriormente, o lodo descartado do Teste 3 não apresentou uma boa floculação, liberando menos água livre, consequentemente menos volume de lodo drenado instantaneamente. Durante o descarte do Teste 1 e 2, que obteve uma operação eficiente na floculação, ocorreu a separação do lodo, ficando na camada inferior o sólido e na superior a água livre. Isto não ocorreu no Teste 3 devido a má floculação. Já o Teste 4 como o volume de lodo foi menor, o T4_{T1} teve apenas metade da área do leito preenchida por lodo, ou seja, o lodo atingiu aproximadamente até 3,2m de comprimento do leito. O volume do T4_{T2} preencheu toda a área, mas não foi o suficiente para que houvesse a formação de camada de água livre por cima e camada de lodo por baixo.

Em comparação a outros tipos de leitos de secagem, Troesch et al (2010) observou que o leito de secagem com camada de filtração composto de areia e caniço-de-água, quando aplicado taxa de 36 kgSS/m²/ano, 78% do volume é drenado dentro de 24 horas com uma taxa média de 1,4 L/min/m². Em escala piloto, aplicou em leito com o mesmo meio filtrante taxa de 26 kgSS/m²/ano e carga hidráulica de 30 cm e notou que, 64% do volume de lodo foi drenado em 12 horas. O mesmo aconteceu no leito piloto com meio filtrante só de areia. Já Radaideh et al (2010) avaliou o desaguamento de 5 L de lodo digerido em aeração estendida em uma área de 0,04m² e obteve em 4 horas uma redução de 40% de volume em leitos de areia.

Secagem do lodo

Um dia após o descarte é caracterizado como fim do desaguamento e o início da secagem de lodo. Barroso (2007) estabelece como fim da fase do desaguamento quando a vazão de saída alcança 0,04 L/min. Nos Testes 1, 2 e 4 não foram registrados as vazões de saída do drenado porque já não pingava mais água pelo tudo de drenagem no dia seguinte. Apenas o Teste 3 que teve problema com a floculação, que após o dia seguinte do descarte ainda estava ocorrendo a drenagem. Portanto, foi considerada a altura de camada de lodo um dia após o descarte como sendo a camada inicial da fase de secagem. Segundo Mortara (2011) quanto maior a taxa de aplicação, maior a espessura da camada após a drenagem, e consequentemente maior dificuldade na perda de umidade. Além disso, o melhor modelo matemático para dimensionamento de leitos de secagem considera a altura de camada inicial de lodo e o percentual de água drenada determinantes no processo (SAMUDIO apud MORTARA, 2011).

Como pode ser observado ainda na Tabela 3 foram obtidas diferentes alturas de camada de lodo. Para o Teste 1 e 2 cujo os volumes foram os mesmos, a camada inicial de lodo foram aproximados. Como menos volume foi drenado no T3_{T1} e T3_{T2} a camada inicial de lodo foi bem mais alta, mesmo para o T3_{T2} que teve menos volume descartado comparado ao T1_{T2} e T2_{T2}. Já os leitos do Teste 4 tiveram camadas de lodo menores devido ao menor volume descartado.

A Figura 2 apresenta a curva de secagem de lodo do T1_{T1} e T1_{T2}. Neste monitoramento não foi realizado revolvimento do lodo, o que justifica a observação da rápida secagem na camada superior do lodo, e umidade maior na camada inferior. Para efeito de análise a amostra coletada era homogeneizada, porém nunca em proporções iguais de lodo mais seco e lodo mais úmido. Este procedimento explica o fato do teor de sólidos secos no T1_{T1} e T1_{T2} não ter um aumento contínuo, como por exemplo, do 14º dia de secagem para o dia 16º no leito 1, onde deveria se observar um aumento do teor de sólido, houve redução, sem ter aumento de umidade ou adicionado água.

Como pode ser observado na Figura 2, até o 4º dia de secagem o teor de sólidos para a T1_{T1} e T1_{T2} foi similar. A partir da segunda semana, 9 dias após o descarte, há uma mudança no perfil da secagem, uma tendência de secagem mais rápida no T1_{T1} com menos lodo aplicado. Por meio da Figura 2, é possível observar que durante os 15 primeiros dias, a redução de umidade é mais lenta e houve pouca diferença entre os dois leitos, e a partir do 20º dia o lodo seca com velocidade maior e a diferença de teor de sólidos entre os leitos também aumenta. O lodo do leito T1_{T1} atingiu teor de umidade acima de 95% com 36 dias de secagem, enquanto que no mesmo período o lodo do T1_{T2} obteve teor de sólidos em torno de 60%.

A curva de secagem para o T2_{T1} e T2_{T2}, com revolvimento está apresentada na Figura 3. Como pode ser observado, o T2_{T1} e T2_{T2} apresentou uma curva semelhante ao T1_{T1} e T1_{T2}. Até o 6º dia de secagem as duas taxas aplicadas tiveram praticamente o mesmo teor de umidade. A partir do 7º dia, inclusive quando ocorreu o primeiro revolvimento, as curvas de cada taxa começaram a se distanciar. Mais uma vez até os 15 primeiros dias, a secagem para ambas as taxas foram baixas, mesmo com o revolvimento, e após o 20º dia a velocidade de secagem aumenta, assim como a diferença entre o teor de sólidos entre as TAS's.

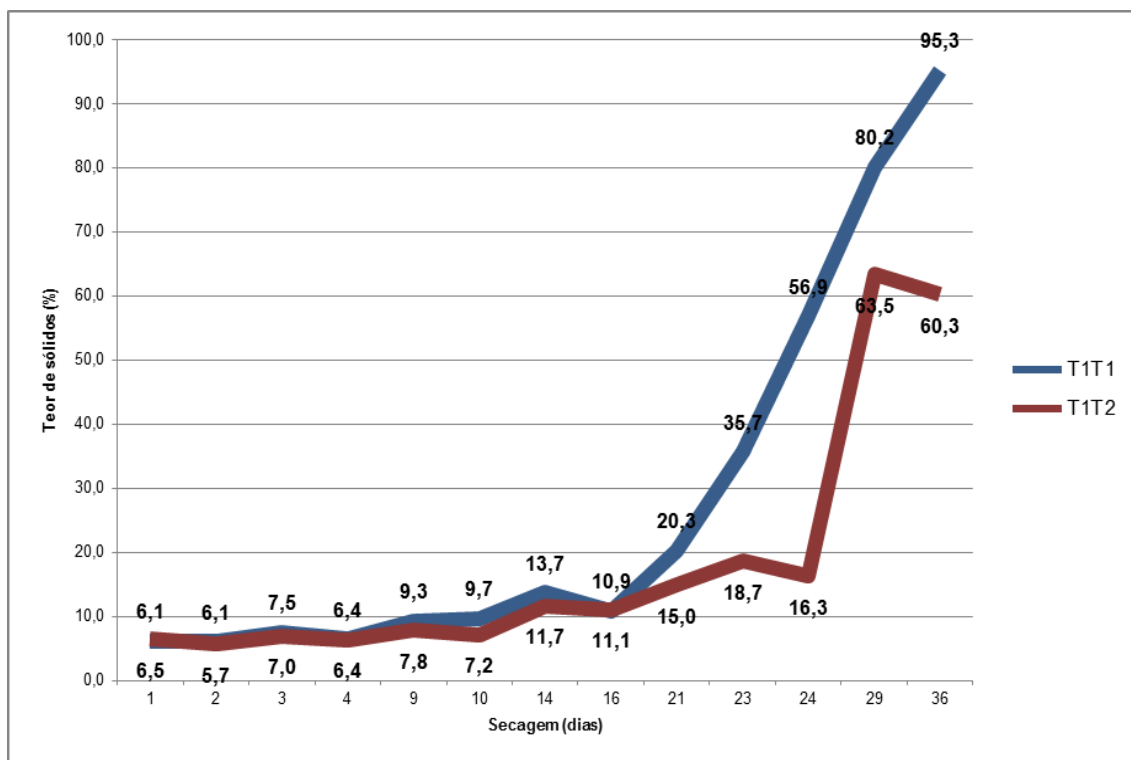


Figura 2 - Curvas de Secagem do lodo do Teste 1.

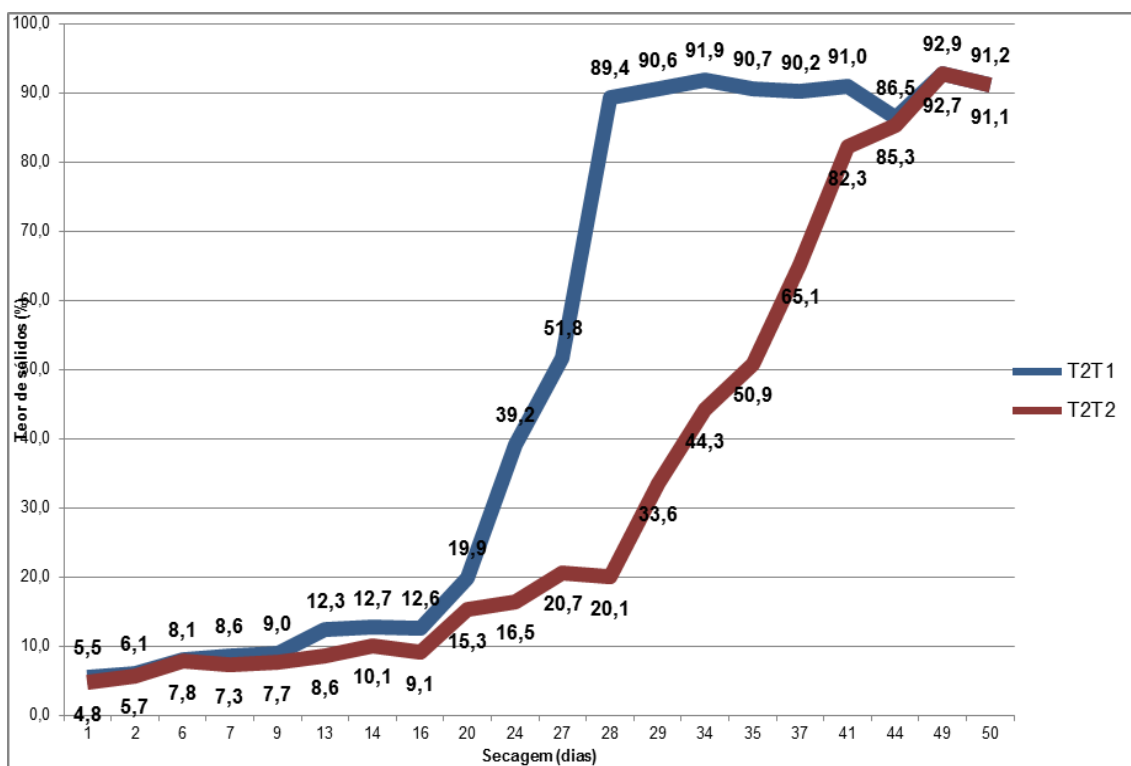


Figura 3 - Curvas de Secagem do lodo do Teste 2.

Como durante o $T2_{T1}$ e $T2_{T2}$ o período de secagem foi maior, foi possível notar quando o lodo atinge sua umidade de equilíbrio. A umidade de equilíbrio é definida como a umidade que o material atinge quando submetido por longo período à determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve. Nessa condição, a pressão de vapor da água na superfície do sólido é igual à pressão de vapor da água contida no ar (PACHECO apud DAVID, 2002). A umidade de equilíbrio depende tanto da natureza do lodo como das condições climáticas do ambiente de secagem, e determina a condição final do processo de secagem, além do qual não adianta prosseguir, pois poderá haver comprometimento na eficiência final de secagem. Neste período de secagem o lodo do $T2_{T1}$ atingiu teor de sólidos em torno de 90 – 91% a partir do 28º dia de secagem, como pode ser observado na Figura 3, e manteve-se constante até o 41º dia. Entre os dias 41º e 44º houve precipitação, ou seja, a umidade relativa do ar aumentou, e com isso aumentou também o teor de umidade do lodo. De acordo com David (2002), um material muito seco, com teor de umidade superior àquele correspondente à sua umidade de equilíbrio, ao ser exposto às condições ambientais pode absorver a umidade do ar. Após o período de chuva o lodo voltou ao valor de 91% de sólidos. O lodo do $T2_{T2}$ atingiu a umidade de equilíbrio com 48 dias.

Na Figura 4 está apresentada a curva de secagem para o Teste 3. Como mencionado anteriormente, devido à má floculação o percentual de redução de volume do lodo foi menor para $T3_{T1}$ e $T3_{T2}$, ou seja, obteve um desaguamento ruim comparado aos demais testes e consequentemente um pior rendimento no tempo de secagem. Após o dia seguinte o lodo apresentou menor teor de sólidos, atingindo o valor de 6% só três dias após, ou seja, pode ser considerado que o desaguamento encerrou após 3 dias. A partir daí as curvas para o lodo $T3_{T1}$ e $T3_{T2}$ seguiu como nos Testes 1 e 2, 15 dias para atingirem concentração em torno de 12%, porém com 3 dias a menos se considerar o teor de sólidos inicial como 6%. Isto pode ter ocorrido devido às condições climatológicas, temperaturas mais altas e umidades mais baixas, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. A partir do 15º dia a curva de secagem para o lodo com menor TAS $T3_{T1}$, também começou a distanciar do $T3_{T2}$. No entanto, no mesmo período de 36 dias de secagem do Teste 1 o lodo $T3_{T1}$ não atingiu os 90% ST e o $T3_{T2}$ alcançou 41,1% contra os 60,3% do $T1_{T2}$. Isto pode ser explicado pelo fato das alturas de camadas iniciais de lodo terem sido mais altas. O leito $T1_{T1}$ e $T1_{T2}$ iniciou o período de secagem com camadas de 5 e 10 cm respectivamente, contra 16 e 26 cm para o $T3_{T1}$ e $T3_{T2}$.

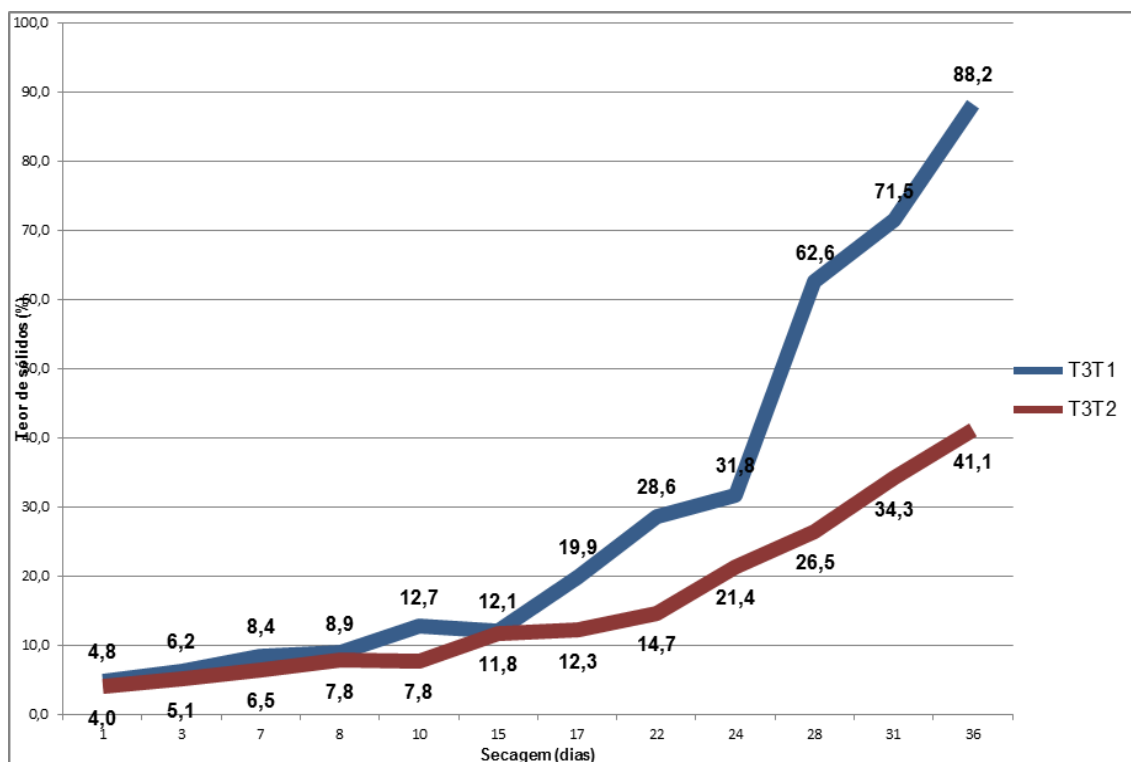


Figura 4 - Curvas de Secagem de lodo do Teste 3.

Na Figura 5 está apresentado a curva de secagem para o Teste 4. Como foi descartado volumes menores e consequentemente TAS mais baixas eram esperados que os tempos de secagem dos lodos T4_{T1} e T4_{T2} fossem menores. O lodo após um dia do descarte apresentou os mesmos 6% ST dos testes anteriores 1 e 2. Os formatos das curvas também foram similares aos demais testes, com exceção da velocidade de secagem. Nos testes anteriores demorava-se 15 dias para atingir 12% ST, durante o Teste 4 ocorreu em menos de 5 dias para o T4_{T1} e 5 dias para o T4_{T2}. Até o 8º dia de secagem as curvas T4_{T1} e T4_{T2} estavam lado a lado na velocidade de secagem e a partir daí, houve uma aceleração mais uma vez na velocidade de secagem do lodo com menor TAS. Outra diferença para os demais testes é que os dois lodos T4_{T1} e T4_{T2} atingiram teor de sólidos acima de 90% praticamente ao mesmo tempo. Isto pode ser explicado devido ao fato de terem alturas de camadas iniciais de lodo próximas, 6 e 8 cm, apesar do volume de lodo do T4_{T2} ter sido o dobro de T4_{T1}. A questão climatológica também favoreceu a secagem, embora não dê comparação com os demais testes por terem volume de lodo e TAS maiores.

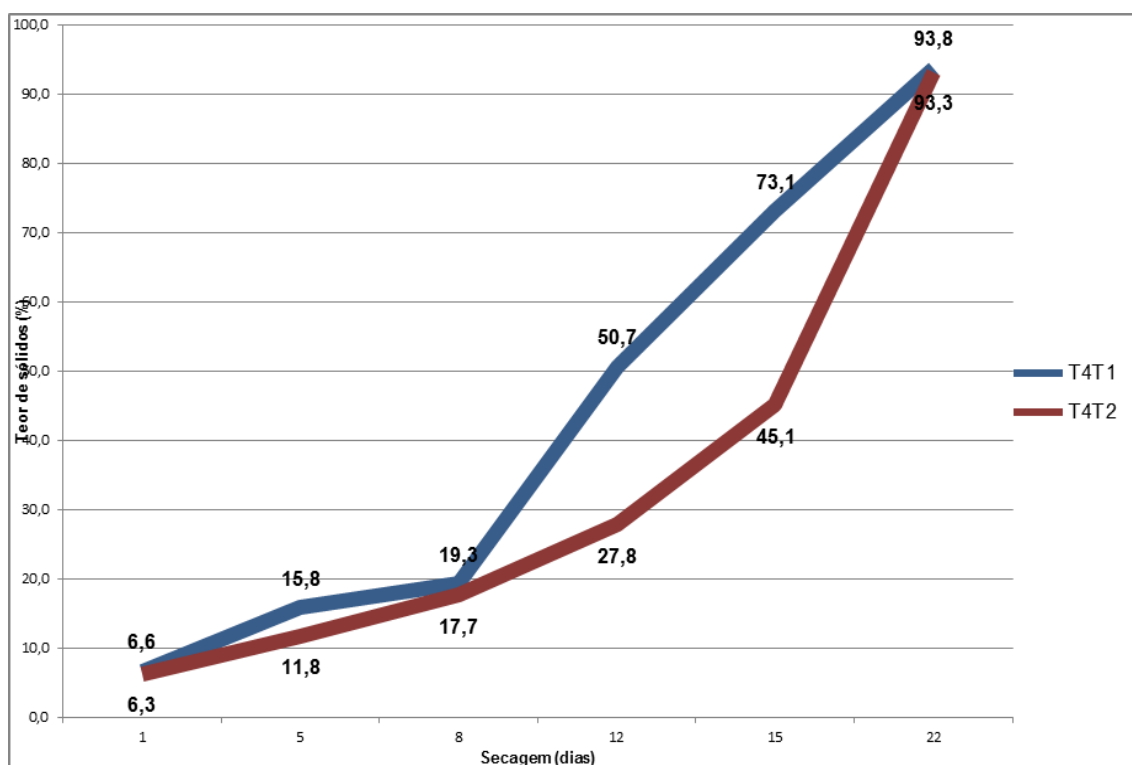


Figura 5 - Curvas de Secagem de lodo do Teste 4.

Após o desaguamento a umidade média do lodo quando bem flocculado apresentou em torno de 94%, e a concentração do lodo aumentou 10 vezes, passou de 0,6% para 6%. Como pode ser observado até os 15 primeiros dias de secagem o teor de sólidos para os testes T1_{T1}, T1_{T2}, T2_{T1}, T2_{T2}, T3_{T1}, e T3_{T2} foram próximas, em torno de 12%, o que indica que neste período, com umidade do lodo alta, a secagem independe da taxa aplicada, da baixa variação na temperatura e da ação do revolvimento. A partir do 20º dia o lodo com menor TAS T1_{T1} (20,3% de ST), T2_{T1} (19,9% de ST), têm vantagem na secagem, iniciando com 4% a mais de sólidos em relação ao T1_{T2} (16% ST) e T2_{T2} (15,3% ST). O mesmo aconteceu no Teste 3 e 4 porém em menos dias, 17 e 8 respectivamente. Ao analisar as curvas dos quatro Testes, é possível observar que após o lodo atingir teor de sólidos em torno de 20% a secagem acelera, aumentando a curva exponencialmente. Outra observação a partir dos dados é que para o mesmo tipo de lodo a umidade de equilíbrio, consequentemente a umidade máxima que o lodo atinge no período de secagem, depende da temperatura e umidade do meio, pois o T1_{T1} atingiu teor de sólidos em torno de 95% enquanto o T2_{T1} atingiu 91%, o T3_{T1} não atingiu acima dos 90% no período analisado e o T4_{T1} atingiu o máximo de 93,8% ST. Ainda analisando as curvas observa-se que ao dobrar a TAS, não é necessário dobrar o período de secagem para atingir o mesmo teor de sólidos, mas quando aplicado TAS maiores necessita-se de maior tempo na secagem de lodo.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

- A estufa além de proteger o lodo da chuva, aumentou a temperatura e reduziu a umidade interna ao leito, o que é favorável na secagem do lodo;
- Lodo aeróbio condicionado com polímero quando bem floculado atinge teor de sólidos em torno de 6% após desaguamento;
- Nos 15 primeiros dias de secagem a maior perda de umidade ocorre no desaguamento, em que os sólidos passam de 0,6% para 6% em média (10 vezes mais), com exceção para o Teste 3 que o lodo não floculou direito;
- Após 15 dias o lodo passa de 6% para 12% (2 vezes mais) para volumes descartados acima de 7 m³ de lodo, como ocorreu com o Teste 1, 2 e 3. Para o Teste com volumes abaixo de 5 m³ este aumento de teor de sólidos em duas vezes aconteceu em 5 dias;
- Nos 15 primeiros dias de secagem o teor de sólidos é praticamente o mesmo independente da TAS aplicada, quando avaliado os Testes 1, 2 e 3. Porém quando comparado a TAS mais baixas o tempo de secagem é influenciado.
- Após o lodo atingir 20% de sólidos, o processo de secagem acelera exponencialmente, e quanto menor taxa aplicada menor o tempo de secagem;
- A umidade máxima que o lodo pode atingir depende da umidade do ar do ambiente de secagem;
- Revolvimento promove uma curva gradual constante, porém não acelerou significativamente a secagem quando comparado os Testes 1 (sem revolvimento) e 2 (com revolvimento).
- A secagem depende de um bom desaguamento, que por ora depende de uma boa operação no sistema de condicionamento.

Recomenda-se realizar novos ensaios em escala piloto para maior controle operacional dos volumes e condicionamento de lodo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, R. de Q. Análise de processo alternativo Wedge-Wire para desaguamento de lodo de estação de tratamento de esgotos domésticos. Dissertação Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2012. 29p.
2. ANDREOLI, C. V. (Org.); VON SPERLING, M. (Org.); FERNANDES, F. (Org.). Sludge treatment and disposal. 1. ed. Londres: IWA Publishing, 2007. v. 1. 244p
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10664: Águas - determinação de resíduos (sólidos) – Método gravimétrico – Método de ensaio. Brasília 1989.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário. Brasília 2011.
5. BARROSO, M. M. Influência das micro e macropropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas no desaguamento por Leito de Drenagem. 2007. 249 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), São Carlos, 2007.
6. COMPARINI, J.B.; Estudo do decaimento de patógenos em biossólidos estocados em valas e em biossólidos submetidos à secagem em estufa agrícola. Tese Doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. 278p.
7. DAVID, A. C. Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio. Dissertação Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica USP, São Paulo. 2002. 163p
8. FRANÇA, J. T. L. Avaliação do desempenho da modificação de um sistema de tratamento de esgoto composto por tanque séptico e filtro anaeróbio por um modelo de aeração compartimentada. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, UEC Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012, 254p.
9. JORDÃO, E. P. Tratamento de esgotos domésticos. 4ª edição. Rio de Janeiro. ABES, 2005. 932p.
10. MORTARA, F. C.; Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios. Dissertação Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011. 241p.
11. MELO, A. S. Contribuição para dimensionamento de leitos de secagem de lodo. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2006. 82p.

12. RADAIDEH, J. A., AMMARY, B.Y., AL-ZBOON, K.K. Dewaterability of sludge digested in extended aerations plants using conventional sand drying beds. *African Journal of Biotechnology*. Julho, 2010, Vol 9(29), pp. 4578-4583.
13. SOUZA, W. G de. Pós-secagem natural de lodos de estações de tratamento de água e esgotos sanitários. São Paulo, 2012. 132p. Dissertação Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.
14. SILVA, S.M.C. da; POHLMANN, M. Eficiência de leito de secagem com piso de blocos drenantes. *Hydro*, ano 8, n. 90, p. 38-43, abril 2014.
15. SILVA, S. M. C.; SILVA, G. H. R.; MORUZZI, R. B. Avaliação de desempenho de leito com piso de blocos drenantes para o desaguamento e secagem de lodo aeróbio. *Net*, São Paulo, set 2015. Disponível em: < http://igce.rc.unesp.br/Home/Graduacao29/engenhariaambiental/semeiar/t10_sabrina-silva-2015.pdf >
16. USACERL (US Army Corps of Engineers Research Laboratory) – Performance Evaluation of Existing Wedgewater and Vacuum-Assisted Beds Dewatering Systems. 1992.
17. USEPA – Environmental Protection Agency. Design manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludge. 1a ed. Cincinnati: EPA, 1987.
18. TROESCH S., LIENARD A., MOLLE P., MERLIN G., ESSER D. Sludge drying reed beds: full and pilot scale study for activated sludge treatment. *Water Science Technology*, 2009, 60 (5), pp 1145-1154.
19. VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para regiões de clima quente. 1994.
20. VAN HAANDEL, A.C.; MARAIS, G. O comportamento do Sistema de lodo ativado. 1999.
21. VANZETTO, A. S.; Análise das alternativas tecnológicas de desaguamento de lodos produzidos em estações de tratamento de esgoto. Dissertação Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2012. 185p.
22. WANG, L.K. et al. Drying Beds. In: *Handbook of Environmental Engineering, Volume 6: Biosolids Treatment Processes*. Totowa, NJ: Wang et al, 2007. cap 13, p. 403-430.