

PROTÓTIPO DE LEITO DE DRENAGEM COM APLICAÇÃO DE LODO DE ETA: CARACTERIZAÇÃO DO LODO SECO E DO EFLUENTE DRENADO

Cristiane de Farias⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) e doutoranda pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana na Universidade Federal de São Carlos (PPGEU/UFSCar). Engenheira Civil do Serviço Autônomo de Águas e Esgotos de Garça-SP (SAAE Garça).

Cali Laguna Achon⁽²⁾

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).

Endereço⁽¹⁾: Rua Tapajós, 480 - Cascata - Garça - SP - CEP: 17400-158 - Brasil - Tel: +55 (16) 3407-2480 - e-mail: cristianedefarias2@hotmail.com.

RESUMO

O lodo de decantadores de Estações de Tratamento de Água (ETAs) é um tipo de resíduo, devendo ser destinado de forma ambientalmente adequada. O Leito de Drenagem (LD) é uma alternativa para tratamento do lodo, que utiliza processo natural para aumentar o Teor de Sólidos (TS). O presente trabalho teve como objetivo a construção e operação de um protótipo para subsidiar o dimensionamento de um LD, classificar o lodo seco segundo a NBR 10.004/2004 e definir o local de lançamento do efluente drenado, comparando resultados de análises aos limites estabelecidos pela legislação federal (CONAMA 357 e 430) e estadual (Decreto Estadual nº 8.468/1976). Os resultados do protótipo indicaram que o LD tem potencial para atingir elevado TS em poucos dias, inclusive após precipitação. O protótipo de LD produziu um efluente clarificado que atende aos VMPs para lançamento em redes de esgoto, não sendo possível, no entanto, lançar diretamente em corpo hídrico Classe 3. Após a construção deve-se monitorar o efluente para evitar danos à ETE do município. O lodo seco foi classificado como IIA (não perigoso, não inerte), e caso não seja economicamente viável tratá-lo e recuperá-lo, deve ser encaminhado para aterro autorizado a receber resíduos dessa classe.

PALAVRAS-CHAVE: estação de tratamento de água, resíduo, legislação ambiental

INTRODUÇÃO

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) de ciclo completo geram resíduos durante a lavagem dos filtros (ALAF) e dos decantadores (lodo), classificados pela Lei Nº 12.305/2010 como resíduos dos serviços públicos de saneamento básico. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2020), em 2017, 257 municípios geravam lodo em alguma etapa de seus sistemas de tratamento de água, dos quais 44,4% lançavam ao menos parte em corpos hídricos. Embora comum, esse tipo de lançamento pode degradar a qualidade da água, estando em desacordo com a Lei Federal de Crimes ambientais nº 9.605/98 e com o Decreto Estadual nº 8.468/1976, que dispõe sobre a prevenção e controle da poluição do meio ambiente em São Paulo.

Para evitar a poluição causada pelo lançamento de lodo em corpos hídricos é preciso escolher uma destinação ambientalmente adequada, bem como projetar as etapas de tratamento de acordo com os requisitos existentes. Diversas pesquisas dispõem a respeito de possíveis usos benéficos para o lodo de ETA, como o uso no setor ceramista, recuperação do coagulante, aplicação no solo ou em obras de terra (URBAN et al., 2019). No entanto, quando não há viabilidade econômica para tratar e recuperar o lodo para outros usos, dispor como rejeito em aterro sanitário é uma alternativa.

Essa opção foi identificada pela PNSB (IBGE, 2020) como a segunda mais adotada, utilizada por 26,8% dos municípios geradores. No entanto, uma vez que o lodo possui de 95 a 99% de teor de umidade (MINATEL, 2021) é necessário aumentar o Teor de Sólidos (TS), para permitir a disposição em aterro. Isso pode ser realizado por processos naturais ou mecânicos, com ou sem o uso de polímeros para condicionamento. Além disso, para selecionar o aterro adequado é preciso classificar o resíduo pós-tratamento quanto aos seus riscos

potenciais ao meio ambiente e à saúde, com base nos procedimentos descritos na NBR nº 10.004/2004 (ABNT, 2004).

Dentre as tecnologias existentes para reduzir o TS do lodo há o sistema de Leito de Drenagem (LD), que permite separar a parte sólida da parte líquida do lodo por processo natural. O LD foi desenvolvido inicialmente por Cordeiro (2001), a partir de modificações de leitos de secagem, e já foi operado com sucesso em diversas ETAs do Estado de São Paulo (FONTANA et al., 2021). Trata-se de um sistema de construção e operação simplificadas, que utiliza uma camada estruturante de 5cm de brita e uma manta geotêxtil para drenagem da água. O lodo é depositado sobre a manta, onde permanece até atingir o TS desejado, a fim de ser destinado a usos benéficos ou disposto como rejeito em aterros.

Uma vez que as características do efluente drenado e do resíduo sólido seco dependem diretamente da qualidade da água bruta captada e do tratamento realizado na ETA, não é adequado extrapolar resultados de outros sistemas para projetar unidades de tratamento de lodo. Assim, no caso da construção de LDs é imprescindível realizar testes para dimensionar a estrutura definitiva, bem como amostragens para classificar o resíduo gerado e definir o local de lançamento do efluente drenado do leito, com base nos critérios da legislação. Além disso, a prototipagem permite avaliar algumas dificuldades ainda na fase de planejamento, e com isso obter resultados mais assertivos na construção e operação definitivas do LD.

OBJETIVO

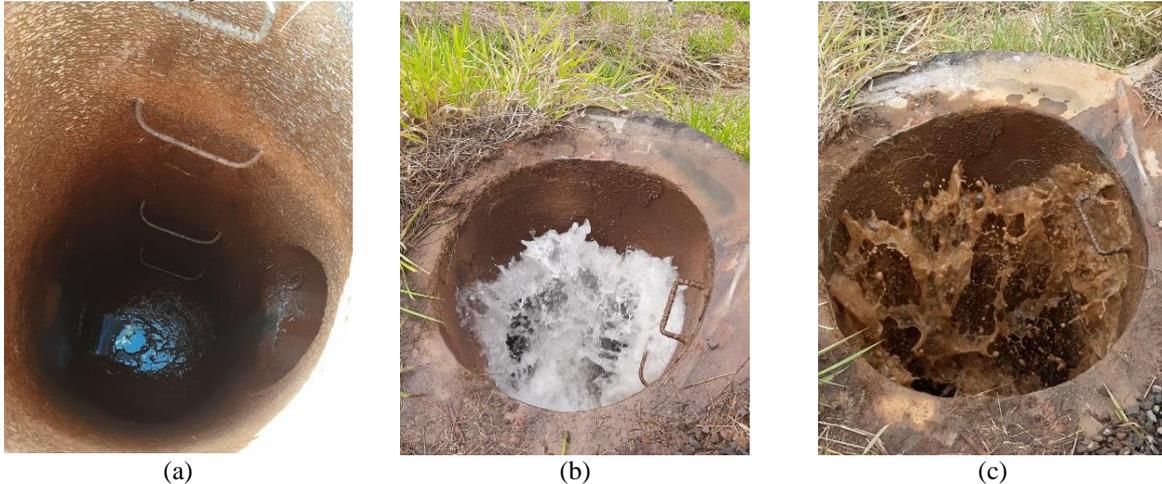
O presente trabalho teve como objetivo geral construir e operar um protótipo de LD utilizando lodo de uma Estação de Tratamento de Água no interior do Estado de São Paulo. Os objetivos específicos foram: i) obter subsídios para dimensionar o LD a ser implantado; ii) classificar o lodo seco segundo a NBR 10.004/2004 a fim de definir o aterro para disposição; e iii) realizar análises no efluente drenado, comparando os resultados aos limites estabelecidos pela legislação e com isso selecionar local de lançamento ambientalmente adequado.

METODOLOGIA UTILIZADA

O presente estudo foi realizado utilizando-se lodo de uma ETA de ciclo completo do interior do Estado de São Paulo, coletado durante a lavagem de um dos decantadores. A última lavagem desse decantador havia ocorrido 103 dias antes. A coleta foi realizada no PV adjacente ao local onde se pretende construir o LD. O processo de lavagem durou mais de cinco horas e, conforme a Figura 1, a concentração de sólidos do efluente variou durante o período. Com base na aparência do efluente, somente foram coletadas amostras nos momentos em que se identificou maior concentração de sólidos, tendo em vista que esta será a condição de operação, para reduzir a área construída do LD.

No total foram coletados 520 L de lodo, com uso de baldes, que foram armazenados em um tanque com capacidade de 1.000 L. Na amostra coletada, foram feitas análises de sólidos suspensos e sólidos dissolvidos em laboratório acreditado, bem como análises de TS e sólidos sedimentáveis em cone de Imhoff no laboratório da ETA, utilizando métodos padronizados (APHA, 2017).

Figura 1 – PV de chegada do lodo da ETA (a) vazio (b) em momentos em que o efluente chega com baixa concentração de sólidos e (c) com elevada concentração de sólidos.



Fonte: dos autores (2022).

Para a construção do protótipo fez-se uma base de concreto, sobre a qual foi assentada uma aduela de 1 m de diâmetro e 0,5 m de altura. O fundo da aduela foi selado com argamassa, havendo uma saída para conduzir o líquido drenado por uma tubulação de PVC. Dentro da aduela foi aplicada uma camada de brita 1 com 5 cm de espessura e sobre esta uma manta geotêxtil de 600 g.m². Foi feita uma vala para posicionar um tanque de 1.000 L, conforme Figura 2, para receber o volume drenado.

Figura 2 – Protótipo do leito de drenagem e tanque para acúmulo do líquido drenado.



Fonte: dos autores (2022)

O experimento foi realizado 15 dias após a coleta do lodo e teve início durante o período da manhã, em um dia com boas condições climáticas. A amostra foi homogeneizada e conduzida ao protótipo com o auxílio de uma mangueira, até atingir o limite superior da aduela. Registrou-se o volume aplicado para calcular a Taxa de Aplicação de Sólidos (kg.m⁻²) do experimento, que é a quantidade de sólidos totais secos aplicados em 1 m² de área do LD (MINATEL, 2021). Foram coletadas amostras do drenado nos tempos de 0, 10, 30, 60 e 120 min para análises de pH, cor e turbidez, realizadas no laboratório da ETA com métodos padronizados (APHA, 2017). Tanto o volume drenado quanto a altura da camada de lodo foram registrados ao longo do tempo.

Ao fim da fase de drenagem da água livre, que terminou entre 8 horas e 23 horas após a aplicação do lodo, foi coletada uma amostra composta homogeneizada do tanque para avaliar, em laboratório acreditado, a conformidade do drenado aos Valores Máximos Permitidos (VMP) definidos pela legislação. Uma vez que o corpo hídrico mais próximo ao local onde se pretende construir o LD é enquadrado como Classe 3, foram feitas análises para todos os parâmetros da resolução CONAMA n° 430 (C430), artigo 16, e do Decreto Estadual n° 8.468/76 (DE), artigo 18, que determinam os VMPs para lançamento de efluentes diretamente em

corpo receptor dessa classe. Também foram analisados os parâmetros limites para corpo receptor Classe 3, de modo a verificar se o drenado possui potencial para desenquadrá-lo, conforme estabelecido pela resolução CONAMA nº 357 (C357), artigo 16 e pelo artigo 12 do DE. Por fim, os resultados foram comparados aos VMPs do artigo 19 do DE, que estabelece os limites para lançamento de efluentes em sistema público de esgoto. Foram obtidos dados históricos do corpo receptor estudado e da água bruta afluyente à ETA, a fim de subsidiar a discussão dos resultados.

Diariamente até o oitavo dia, e em dias alternados a partir de então, foram coletadas amostras de lodo para avaliar o TS no laboratório da ETA, utilizando métodos padronizados (APHA, 2017). Após 19 dias, encerrada a fase de secagem, o lodo remanescente foi enviado para análise em laboratório acreditado, visando a classificação do resíduo conforme NBR 10.004/2004.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As características do lodo coletado estão apresentadas na Tabela 1. O Teor de Sólidos (TS) da amostra de lodo bruto foi 2,5%, próximo ao utilizado por outros autores em seus protótipos ou leitos em escala real, como Fontana (2004) de 2,2%, Achon et al. (2008) de 1,4% e 2,6%, Reis et al. (2021) de 0,18% a 2,22% e Minatel (2021) de 0,5% a 3,0%. O resultado de sólidos sedimentáveis do lodo bruto aplicado no protótipo foi comparável ao obtido por Barroso (2007), que realizou tratamento das amostras de lodo por congelamento para melhorar a sedimentabilidade. Dessa forma, observa-se que o lodo da ETA utilizado no protótipo apresentou boa capacidade de sedimentação.

Tabela 1 - Caracterização do lodo bruto utilizado no Leito de Drenagem.

Teor de sólidos	Sólidos sedimentáveis em 1h (mL.L ⁻¹)	Sólidos Suspensos (mg.L ⁻¹)	Sólidos Dissolvidos (mg.L ⁻¹)
2,5%	505	28.525,0	220,0

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir da chegada do efluente passaram-se cerca de dois minutos até iniciar a fase de drenagem e 14 minutos até atingir o nível máximo do LD, resultando em uma camada de lodo de 40 centímetros (Figura 3). Quando o LD atingiu o nível máximo a mangueira foi fechada para evitar o transbordamento. Foram aplicados 380 L dos 520 L de lodo coletados, resultando em uma Taxa de Aplicação Superficial (TAS) de 12,1 kg.m⁻² (peso específico do lodo de 1.000 kg.m⁻³). Comparando a outros estudos, a TAS do experimento se manteve dentro do intervalo utilizado por Minatel (2021), entre 0,5 e 15 kg.m⁻², e foi maior que o estudado por Silveira (2012) de 7,5 kg.m⁻² e por Santos (2012) entre 1,75 kg.m⁻² e 7,0 kg.m⁻².

Figura 3 – Protótipo de Leito de Drenagem preenchido com lodo de ETA até 40 cm de altura.



Fonte: dos autores (2022).

Observa-se na Tabela 2 que houve uma melhora significativa na qualidade do drenado quanto à cor e à turbidez à medida que ocorreu a formação do pré-filtro, conforme descrito por Minatel (2021). Os valores observados aos 120 minutos para Cor e Turbidez, de 60 mg Pt.L⁻¹ e 7 uT foram inferiores aos VMPs para enquadramento, ou seja, 75 mg Pt.L⁻¹ e 100 uT respectivamente, o que demonstra a que o sistema tem potencial para produzir um drenado de boa qualidade após algum tempo da aplicação.

Tabela 2 – Características físico-químicas do líquido drenado durante o ensaio de desaguamento de lodo de ETA no protótipo de Leito de Drenagem.

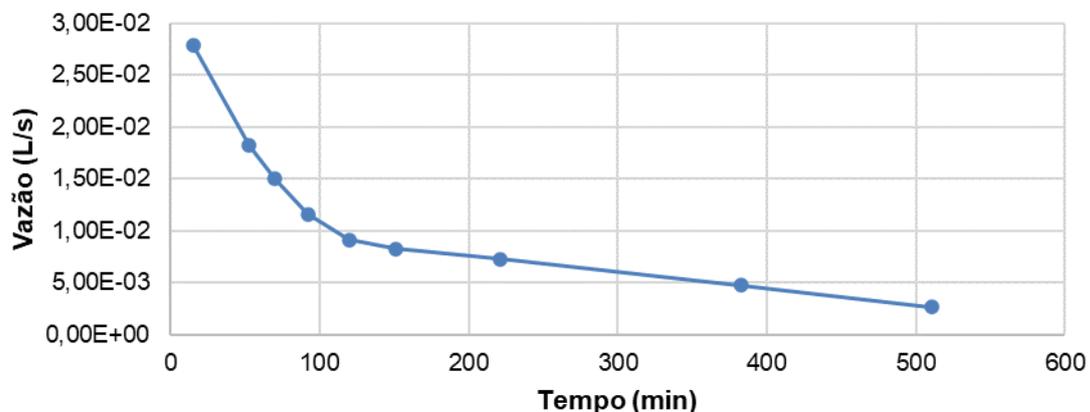
Tempo (min)	Cor (Pt/Co)	Turbidez (uT)	pH
0	400	237	7,7
10	350	80	7,2
30	275	51	7,2
60	125	20	7,6
120	60	7	7,5

Fonte: Elaborado pelos autores.

A vazão de drenagem (variação do volume em um intervalo de tempo Δt) apresentou valor inicial de $2,8 \times 10^{-2}$ L.s⁻¹, (ou $3,6 \times 10^{-2}$ L.s⁻¹.m⁻² considerando a área aplicada), conforme Figura 4. Tal valor foi próximo ao observado por Achon et al. (2008), de aproximadamente 2×10^{-2} L.s⁻¹. No entanto, enquanto a fase de drenagem total de Achon et al. (2008) encerrou-se em 1 hora para lodo proveniente de ETA que utilizava PAC, no protótipo durou entre oito horas e meia e 23 horas, uma vez que não foi possível observar o momento exato em que a drenagem foi concluída (conforme Figura 5). Comparativamente, o maior tempo de drenagem observado para o protótipo pode ser devido ao maior volume aplicado e o maior TS, que foi de 25 L e 1,4% para o experimento de Achon et al. (2008) e de 380 L e 2,5% para o protótipo estudado.

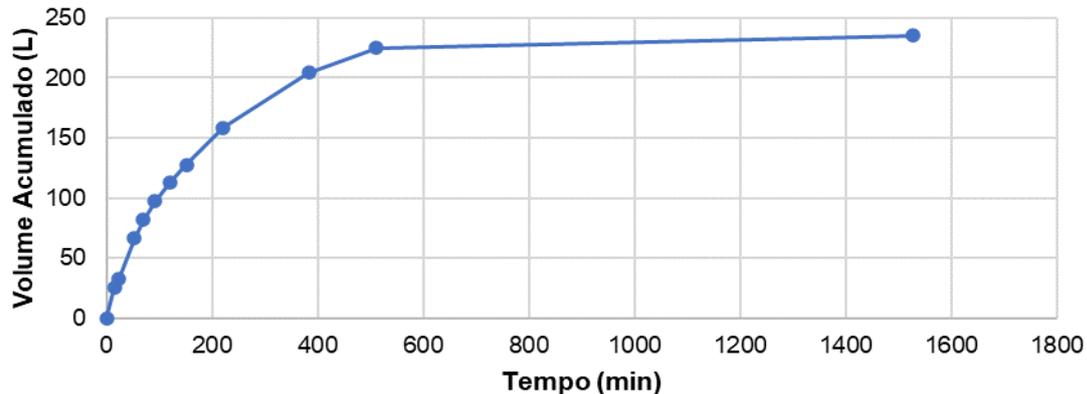
Silveira (2012) utilizando lodo de PAC, em escala reduzida e escala piloto, observou respectivamente tempos de drenagem de 43 e 30 horas, tendo sido aplicado 25 e 165 litros de lodo, com TS de 1,6 e 1,3%, TAS de 7,5 e 6,5 kg.m⁻² e lâmina líquida de 39 e 33 cm. O tempo de drenagem foi, portanto, superior ao observado para o protótipo em estudo, que aplicou TAS 12,1 kg.m⁻², TS 2,5% e lâmina líquida de 40 cm. De forma contrária, a partir de uma série de experimentos Minatel (2021) observou uma forte correlação entre menores valores de TAS e menores tempos de término de drenagem, com maior influência da altura da camada de lodo do que do TS sobre o parâmetro.

Figura 4 – Variação da vazão de drenagem da água livre do lodo no protótipo, em função do tempo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5 – Volume acumulado de efluente drenado do lodo no protótipo, em função do tempo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O volume total de drenado acumulado no tanque foi 235 L, que é 62% dos 380 L aplicados no LD. No entanto, o volume medido no tanque pode ter sido inferior ao volume total drenado, devido à absorção visível de água pelo concreto das paredes e do fundo do LD. O percentual é próximo ao observado por outros autores, como Fontana (2004) que obteve acumulado de 69% do volume total aplicado, Achon et al. (2008) de 74%, Minatel (2021) entre 58% e 97%, e Silveira (2012) de 95 e 82% em escala reduzida e piloto, respectivamente.

Após o término da drenagem o efluente armazenado no tanque foi homogeneizado e foi coletada uma amostra para envio ao laboratório. Os resultados das análises e os VMPs estabelecidos pela legislação, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores máximos permitidos para corpos hídricos enquadrados como Classe 3, para lançamento em sistema público de esgoto e para lançamento em corpos hídricos Classe 3, bem como resultado da análise de amostra do líquido drenado do lodo no protótipo de Leito de Drenagem.

Item	Unidade	Corpo hídrico Classe 3		S. esgoto	Lançamento direto		Drenado
		DE-12	C357-16	DE-19	DE-18	C430-16	
1,1-Dicloroetano	µg.L ⁻¹	-	30	-	-	-	<2
1,2-Dicloroetano	mg.L ⁻¹	-	0,01	-	-	-	<0,002
2,4,6 - Triclorofenol	mg.L ⁻¹	-	0,01	-	-	-	<0,01
2,4,5-T	µg.L ⁻¹	-	2,0	-	-	-	<1
2,4,5-TP	µg.L ⁻¹	-	10,0	-	-	-	<10
2,4-D	µg.L ⁻¹	-	30	-	-	-	<1,0
Aldrin + Dieldrin	µg.L ⁻¹	-	0,03	-	-	-	<0,001
Alumínio dissolvido	mg.L ⁻¹	-	0,2	-	-	-	3,54
Arsênio total / Arsênico	mg.L ⁻¹	0,1	0,033	0,2	0,2	0,5	<0,01
Atrazina	µg.L ⁻¹	-	2	-	-	-	<1
Bário	mg.L ⁻¹	1,0	1,0	-	5,0	5,0	0,589
Belírio total	mg.L ⁻¹	-	0,1	-	-	-	<0,01
Benzeno	mg.L ⁻¹	-	0,005	-	-	1,2	<0,001
Benzo (a)pireno	µg.L ⁻¹	-	0,7	-	-	-	<0,01
Boro	mg.L ⁻¹	-	0,75	-	5,0	5,0	0,014
Cádmio	mg.L ⁻¹	0,01	0,01	0,2	0,2	0,2	<0,001
Carbaril	µg.L ⁻¹	-	70	-	-	-	<0,01
Chumbo	mg.L ⁻¹	0,1	0,033	0,5	0,5	0,5	<0,01
Cianeto total	mg.L ⁻¹	0,2	-	0,2	0,2	1,0	<0,05



Item	Unidade	Corpo hídrico Classe 3		S. esgoto	Lançamento direto		
		DE-12	C357-16	DE-19	DE-18	C430-16	Drenado
Cianeto Livre	mg.L ⁻¹	-	0,022	-	-	0,2	<0,002
Cianobactérias	células.mL ⁻¹	-	50.000	-	-	-	<1
Clordano (cis+trans)	µg.L ⁻¹	-	0,3	-	-	-	<0,01
Cloreto total	mg.L ⁻¹	-	250	-	-	-	92,70
Clorofila-a	µg.L ⁻¹	-	60	-	-	-	<3
Clorofórmio	mg.L ⁻¹	-	-	-	-	1,0	<0,002
Cobalto total	mg.L ⁻¹	-	0,2	-	-	-	<0,01
Cobre	mg.L ⁻¹	1,0	-	1,0	1,0	-	<0,005
Cobre dissolvido	mg.L ⁻¹	-	0,013	-	-	1,0	<0,005
Coliformes fecais / termotolerantes	NMP.100 mL ⁻¹	4.000	4.000	-	-	-	34
Coliformes totais	NMP.100 mL ⁻¹	20.000	-	-	-	-	<1,6
Cor verdadeira	mg Pt-Co.L ⁻¹	-	75	-	-	-	5
Cromo hexavalente	mg.L ⁻¹	-	-	0,5	0,1	0,1	<0,05
Cromo total	mg.L ⁻¹	0,05	0,05	5,0	5,0	-	<0,01
Cromo trivalente	mg.L ⁻¹	-	-	-	-	1,0	<0,05
DBO	mg.L ⁻¹	10	10	-	60	-	29,00
DDT (p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD)	µg.L ⁻¹	-	1,0	-	-	-	<0,001
Demeton (Demeton-O + Demeton-S)	µg.L ⁻¹	-	14,0	-	-	-	<0,01
Dicloroeteno (somatório de 1,1 + 1,2cis + 1,2 trans)	mg.L ⁻¹	-	-	-	-	1,0	<0,002
Dodecacloro Pentaciclodecano	µg.L ⁻¹	-	0,001	-	-	-	<0,001
Endossulfan (a + b + sulfato)	µg.L ⁻¹	-	0,22	-	-	-	<0,01
Endrin	µg.L ⁻¹	-	0,2	-	-	-	<0,001
Estanho	mg.L ⁻¹	2,0	-	4,0	4,0	4,0	0,913
Estireno	mg.L ⁻¹	-	-	-	-	0,07	<0,002
Etilbenzeno	mg.L ⁻¹	-	-	-	-	0,84	<0,002
Fenóis	mg.L ⁻¹	0,001	0,01	5	0,5	0,5	0,204
Ferro solúvel / dissolvido	mg.L ⁻¹	-	5	30	15	15	2,478
Fluoreto / Fluor	mg.L ⁻¹	1,4	1,4	10	10	10	0,13
Fósforo total	mg.L ⁻¹	-	0,15	-	-	-	0,039
Glifosato	µg.L ⁻¹	-	280	-	-	-	<10
Gution	µg.L ⁻¹	-	0,005	-	-	-	<0,003
Heptacloro epóxido + Heptacloro	µg.L ⁻¹	-	0,03	-	-	-	<0,03
Lindano (g-HCH)	µg.L ⁻¹	-	2,0	-	-	-	<0,02
Lítio total	mg.L ⁻¹	-	2,5	-	-	-	<0,01
Malation	µg.L ⁻¹	-	100,0	-	-	-	<0,05
Manganês solúvel / dissolvido	mg.L ⁻¹	-	-	-	1,0	1,0	5,627
Manganês total	mg.L ⁻¹	-	0,5	-	-	-	5,825
Materiais sedimentáveis	mL.L ⁻¹	-	-	10	1,0	1,0	<0,36
Mercúrio	mg.L ⁻¹	0,002	0,002	0,01	0,01	0,01	<0,0002
Metoxicloro	µg.L ⁻¹	-	20,0	-	-	-	<0,01
Níquel	mg.L ⁻¹	-	0,025	2,0	2,0	2,0	<0,01
Nitrato	mg.L ⁻¹	10,0	10,0	-	-	-	0,19



Item	Unidade	Corpo hídrico Classe 3		S. esgoto DE-19	Lançamento direto		Drenado
		DE-12	C357-16		DE-18	C430-16	
Nitrito	mg.L ⁻¹	1,0	1,0	-	-	-	<0,1
Nitrogênio amoniacal total / Amônia	mg.L ⁻¹	0,5	13,3	-	-	20,0	0,76
OD	mg.L ⁻¹	4	4	-	-	-	7,59
Óleos e graxas / Substâncias solúveis em hexano	mg.L ⁻¹	Virt. ausentes	Virt. ausentes	100	100	-	<5,0
Óleos minerais	mg.L ⁻¹	-	-	-	-	20	<5,0
Óleos vegetais e gorduras animais	mg.L ⁻¹	-	-	-	-	50	<5,0
Paration	µg.L ⁻¹	-	35,0	-	-	-	<0,01
PCBs - Bifenilas policloradas	µg.L ⁻¹	-	0,001	-	-	-	<0,001
Pentaclorofenol	mg.L ⁻¹	-	0,009	-	-	-	<0,001
pH	-	-	de 6 a 9	de 5 a 9	de 5 a 9	de 5 a 9	5,99
Prata	mg.L ⁻¹	-	0,05	0,1	0,02	0,1	<0,01
Selênio	mg.L ⁻¹	0,01	0,05	0,2	0,02	0,30	<0,01
Sólidos dissolvidos totais	mg.L ⁻¹	-	500	-	-	-	252,0
Substâncias tenso-ativas que reagem com o azul de metileno	mg.L ⁻¹	-	0,5	-	-	-	<0,1
Sulfato	mg.L ⁻¹	-	250	-	-	-	15,24
Sulfeto	mg.L ⁻¹	-	0,3	50	-	1,0	<1
Temperatura	°C	-	-	40	40	40	23,1
Tetracloroeto de carbono	mg.L ⁻¹	-	0,003	-	-	1,0	<0,002
Tetracloroetano	mg.L ⁻¹	-	0,01	-	-	-	<0,002
Tolueno	mg.L ⁻¹	-	-	-	-	1,2	<0,002
Toxafeno	µg.L ⁻¹	-	0,21	-	-	-	<0,01
Tributilestanho	µg.L ⁻¹	-	2,0	-	-	-	<0,05
Tricloroetano	mg.L ⁻¹	-	0,03	-	-	1,0	<0,002
Turbidez	UNT	-	100	-	-	-	5,38
Urânio total	mg.L ⁻¹	-	0,02	-	-	-	0,020
Vanádio total	mg.L ⁻¹	-	0,1	-	-	-	0,010
Xileno	mg.L ⁻¹	-	-	-	-	1,6	<0,002
Zinco	mg.L ⁻¹	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	0,485

Fonte: Elaborado pelos autores. Legenda: C357-16: CONAMA 357 - Artigo 16. C430-16: CONAMA 430 - Artigo 16. DE-12: Decreto Estadual 8.468/76 - Artigo 12. DE-18: Decreto Estadual 8.468/76 - Artigo 18. DE-19: Decreto Estadual 8.468/76 - Artigo 19. S. esgoto: Sistema de esgotamento sanitário.

Os resultados indicam que o LD foi eficaz na remoção de sólidos sedimentáveis, tendo em vista que enquanto para o lodo aplicado obteve-se 505 mL.L⁻¹ em uma hora no cone de Imhoff, para o drenado (amostra homogeneizada) obteve-se <0,36 mL.L⁻¹. Além disso, este mesmo drenado apresentou turbidez 5,38 NTU e cor 5 mg Pt-Co.L⁻¹, ambos abaixo dos VMPs estabelecidos pela C357 (100 NTU e 75 mg Pt-Co.L⁻¹). Como consequência, os demais VMPs para lançamento e enquadramento foram atendidos para a maior parte dos parâmetros e todos os VMPs para o lançamento em redes de esgoto foram atendidos.

A concentração observada superou os VMPs segundo a C357 para alumínio dissolvido, DBO, fenóis, manganês total e sulfeto; e segundo o DE para DBO, fenóis e amônia, tendo, portanto, potencial para desenquadrar o corpo hídrico em função da vazão de lançamento. Considerando os VMPs para lançamento, apenas o VMP de manganês dissolvido foi superado, tanto para a C430 quanto para o DE. A seguir, serão discutidos cada um destes valores.

A concentração de alumínio dissolvido no drenado ($3,54 \text{ mg.L}^{-1}$) foi maior do que o VMP da C357 ($0,2 \text{ mg.L}^{-1}$). Consultando dados da série histórica de análises do corpo receptor, tem-se que em junho de 2021 e junho de 2022 a concentração de alumínio obtida foi respectivamente $0,393 \text{ mg.L}^{-1}$ e $0,236 \text{ mg.L}^{-1}$, ambas acima do VMP de enquadramento. Assim, ainda que o corpo hídrico já apresente concentrações superiores ao VMP, o efluente tem potencial para alterar a qualidade da água para além dos padrões permitidos a depender da vazão de lançamento do drenado. A concentração elevada de alumínio no drenado pode ser decorrente do uso de Policloreto de Alumínio (PAC) como coagulante na ETA, que pode se acumular no lodo sedimentado no decantador da estação e conseqüentemente no efluente drenado do LD. Cabe destacar que não é estabelecido VMP deste parâmetro para enquadramento ou lançamento no DE, nem para lançamento pela C430.

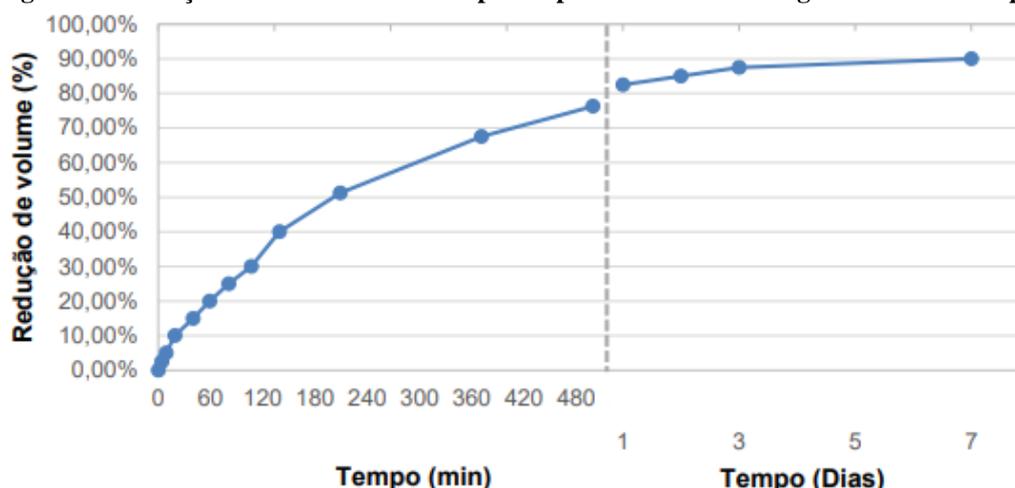
A DBO do drenado foi de 29 mg.L^{-1} , acima do VMP de 10 mg.L^{-1} pela C357 e pelo DE. Pode-se atribuir tal resultado à DBO da água bruta afluenta à ETA, que em junho de 2022 foi de 19 mg.L^{-1} . Ainda assim, a DBO obtida está abaixo do VMP para lançamento determinado pelo DE, de 60 mg.L^{-1} , e não há VMP para lançamento pela C430. A concentração de fenóis obtida foi $0,204 \text{ mg.L}^{-1}$, superior à permitida para o corpo hídrico pelo DE, de $0,001 \text{ mg.L}^{-1}$, e pela C357, de $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$. Entretanto, tal valor foi inferior ao VMP de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ estabelecido para lançamento pela C430 e pelo DE. Desse modo, para ambos os parâmetros se atende o padrão de lançamento, no entanto, dependendo da vazão de lançamento o efluente tem potencial de elevar a concentração a valores acima dos VMPs de enquadramento.

O teor de manganês dissolvido do drenado foi de $5,627 \text{ mg.L}^{-1}$, superior ao VMP de lançamento da C430 e do DE, de $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$. Do mesmo modo, a concentração de manganês total de $5,825 \text{ mg.L}^{-1}$ está acima do VMP de enquadramento da C357, de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$. A concentração de amônia no efluente foi de $0,76 \text{ mg.L}^{-1}$, superior ao VMP de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ para corpo hídrico segundo o DE e inferior ao VMP de $13,3 \text{ mg.L}^{-1}$ para $\text{pH} < 7,5$ da C357. No entanto, atende ao VMP de 20 mg.L^{-1} para lançamento da C430.

Devido ao método utilizado não foi possível verificar se a concentração de sulfeto obtida para o efluente, de $< 1 \text{ mg.L}^{-1}$, foi inferior ao VMP para corpo hídrico da C357 de $0,3 \text{ mg.L}^{-1}$. No entanto, a concentração de sulfeto no drenado foi inferior ao VMP de 1 mg.L^{-1} da C430 para lançamento. Cabe destacar que as concentrações observadas podem ter sido influenciadas pelo armazenamento do lodo e do drenado, que foi feito em tanques anteriormente utilizados para armazenar PAC. Ainda que os tanques tenham sido previamente limpos, pode ter restado algum resíduo do líquido armazenado.

Outro aspecto avaliado foi a redução do volume do lodo no protótipo após o término da aplicação, apresentado na Figura 6. Observa-se que após três horas e meia do início do ensio no LD o volume havia sido reduzido em 50%, 75% em cerca de oito horas, 83% em 24 horas e 90% em sete dias. No experimento realizado por Achon et al. (2008) utilizando lodo proveniente de ETA que utilizava PAC, obteve-se redução de volume de 80% em menos de 20 minutos e 87% aos sete dias, próximo ao obtido no período pelo protótipo. Fontana (2004), utilizando lodo de ETA que utilizava sulfato de alumínio, obteve redução de volume cerca de 75% em nove dias em um protótipo e cerca de 80% em quatro dias para um leito real.

Figura 6 – Redução do volume de lodo no protótipo do Leito de Drenagem até sete dias após a aplicação.

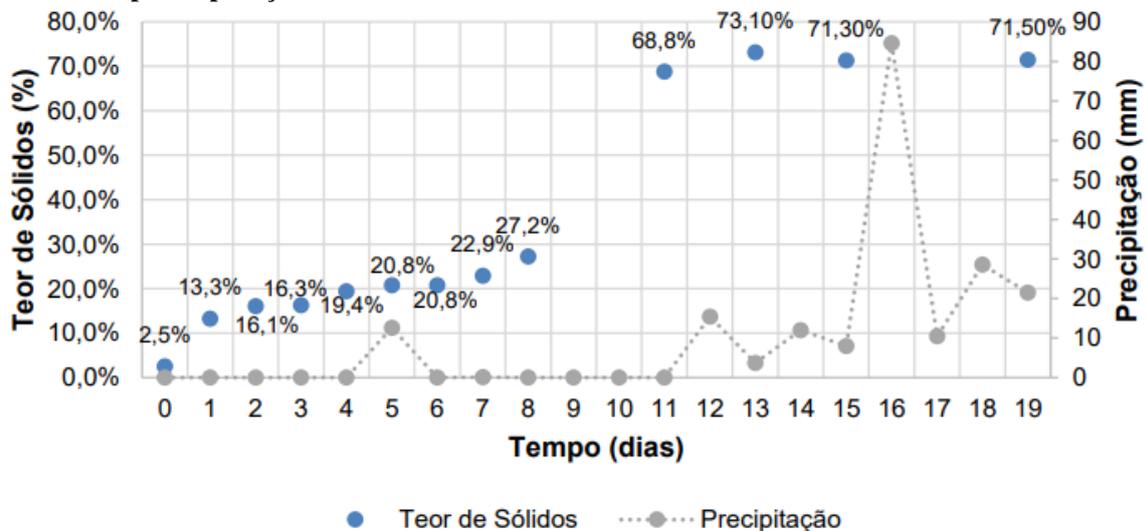


Fonte: Elaborado pelos autores.

Além da redução de volume pela remoção da água livre, o LD também promoveu a secagem do lodo, o que pode ser verificado na Figura 7 que apresenta a variação de TS ao longo do tempo. Após oito dias da aplicação foi ultrapassado o TS de 25%, mínimo recomendável para disposição em aterros sanitários (O’KELLY, 2016). Em 13 dias o TS foi superior a 70%, o que é bastante superior ao mínimo recomendável. Observou-se que, embora tenha ocorrido precipitação em alguns dias, o TS se manteve inalterado, mostrando que a manta permitiu a passagem da água de chuva pelo sistema, sem absorção de água pelos sólidos. Esse resultado se deve ao fato de que, quando ocorreu a precipitação, já haviam se formado ranhuras no lodo que facilitaram a drenagem da água. A mudança no aspecto do lodo com o passar dos dias pode ser observada na Figura 8.

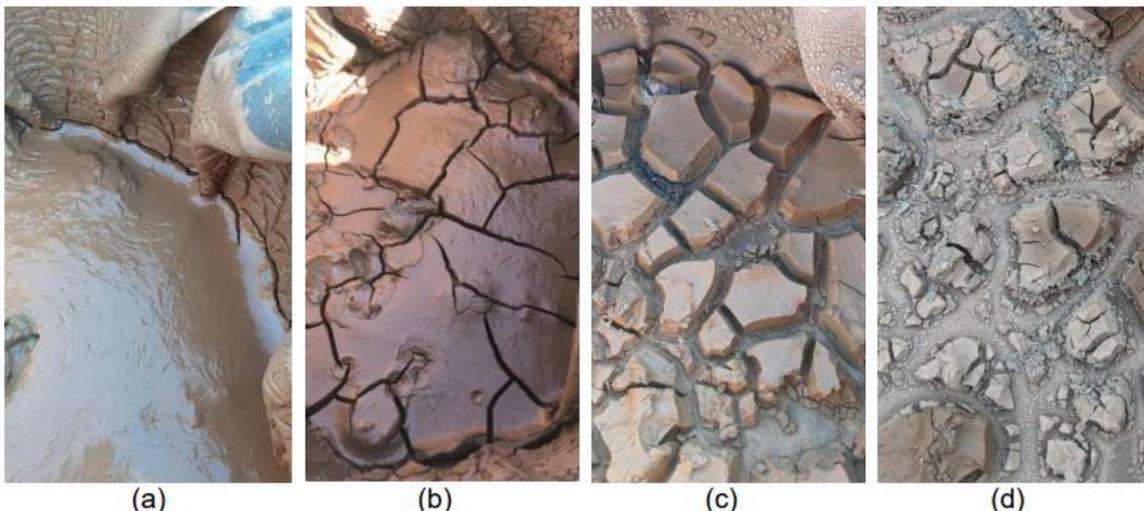
Os resultados foram próximos aos obtidos no experimento de Achon et al. (2008), em que foi atingido TS de 28,4% aos sete dias, e 88,0% aos 21 dias. Fontana (2004) obteve TS de 18,5 a 20,5% em oito dias, mas devido às más condições climáticas o TS em 21 dias variou de 22,1 a 68,9%. Foi reportado pelo autor que embora as condições climáticas possam interferir no TS, o lodo obtido não apresentou problemas para manejo e destinação. Reis et al. (2021) para reduzir a interferência da precipitação na secagem estudaram a utilização de cobertura e obtiveram lodo até 56% mais seco do que sem nenhuma proteção.

Figura 7 – Variação do Teor de Sólidos do lodo no protótipo de Leito de Drenagem e precipitação diária até 19 dias após a aplicação.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8 – Lodo aplicado no protótipo do Leito de Drenagem (a) 1 dia após a aplicação do lodo (TS = 13,3%); (b) 2 dias após a aplicação do lodo (TS = 16,1%); (c) sete dias após a aplicação do lodo (TS = 22,9%); (d) 11 dias após a aplicação do lodo (TS = 68,8%).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Após 19 dias de secagem o sólido retido no protótipo do LD foi enviado para laboratório, de modo a classificar o resíduo segundo a NBR 10.004/2004. Foram realizadas análises na massa bruta e ensaios de solubilização e lixiviação, conforme resultados das Tabela 4, 5 e 6. Com base nos resultados, o lodo foi classificado como Classe II A (não perigoso, não inerte), uma vez que tanto os ensaios de massa bruta quanto de lixiviado não ultrapassaram os VMPs. Entretanto, na análise de solubilizado os parâmetros Chumbo e Manganês não satisfizeram os limites permitidos.

Tabela 4 – Valores máximos permitidos para a massa bruta e resultado de análises do lodo desaguado/seco após 19 dias no protótipo do Leito de Drenagem.

Item	VMP	Massa Bruta
Cianeto (reatividade)	250 mg.kg ⁻¹	<0,20 mg.kg ⁻¹
Cromo Hexavalente	-	0,072 mg.kg ⁻¹
Líquidos Livres	-	Ausente
Óleos e Graxas Totais	-	0,058 mg.kg ⁻¹
pH 1:1	2 a 12,5	7,03
Porcentagem de sólidos	-	77,57%
Sulfeto (reatividade)	500 mg.kg ⁻¹	<0,04 mg.kg ⁻¹
Umidade	-	24,8%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 5 – Valores máximos permitidos para ensaio de solubilização e resultado de análises para o lodo desaguado/seco após 19 dias no protótipo do Leito de Drenagem.

Item	Limite máximo no extrato (mg.L ⁻¹)	Lodo solubilizado (mg.L ⁻¹)
2,4,5-T	0,002	<0,001
2,4,5-TP	0,03	<0,01
2,4-D	0,03	<0,01
Aldrin e dieldrin	0,00003	0,000002
Alumínio	0,2	<0,02
Arsênio	0,01	<0,01
Bário	0,7	0,434
Cádmio	0,005	<0,001
Chumbo	0,01	0,02
Cianeto	0,07	<0,05
Clordano (todos os isômeros)	0,0002	<0,0001
Cloreto	250	19,07
Cobre	2	<0,005
Cromo total	0,05	<0,01
DDT (todos os isômeros)	0,002	<0,001
Endrin	0,0006	<0,000001
Fenóis totais	0,01	<0,001
Ferro	0,3	0,033
Fluoreto	1,5	<1,0
Heptacloro e seu epóxido	0,00003	<0,000002
Hexaclorobenzeno	0,001	<0,000001
Lindano (γ-BHC)	0,002	<0,000005
Manganês	0,1	1,009
Merúrio	0,001	<0,001
Metoxicloro	0,02	<0,000001
Nitrato (expresso em N)	10	<0,1
Prata	0,05	<0,01
Selênio	0,01	<0,01
Sódio	200	5,109

Item	Limite máximo no extrato (mg.L ⁻¹)	Lodo solubilizado (mg.L ⁻¹)
Sulfato (expresso em S04)	250,0	12,37
Surfactantes	0,5	0,013
Toxafeno	0,005	<0,00005
Zinco	5	0,03

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 6 – Valores máximos permitidos para ensaio de lixiviação e resultado de análises para o lodo desaguado/seco após 19 dias no protótipo do Leito de Drenagem.

Item	Limite máximo no extrato (mg.L ⁻¹)	Lodo solubilizado (mg.L ⁻¹)
1,1-Dicloroetileno	3	<0,002
1,2-Dicloroetano	1	<0,002
1,4-Diclorobenzeno	7,5	<0,002
2,4,5-T	0,2	<0,001
2,4,5-TP	1	<0,01
2,4,5-Triclorofenol	400	<0,01
2,4,6-Triclorofenol	20	<0,01
2,4-D	3	<0,01
2,4-Dinitrotolueno	0,13	<0,0001
Aldrin + dieldrin	0,003	<0,000002
Arsênio	1	<0,01
Bário	70	1,862
Benzeno	0,5	<0,002
Benzo(a) pireno	0,07	<0,00001
Cádmio	0,5	0,001
Chumbo	1	<0,01
Clordano	0,02	<0,0001
Cloreto de vinila	0,5	<0,002
Clorobenzeno	100	<0,002
Clorofórmio	6	0,024
Cresol total	200	<0,00015
Cromo total	5	<0,01
DDT (p,p´DDT+p,p´DDD+p,p´DDE)	0,2	<0,001
Endrin	0,06	<0,000001
Fluoreto	150	<1,0
Heptacloro e seus epóxidos	0,003	<0,000002
Hexaclorobenzeno	0,1	<0,00001
Hexaclorobutadieno	0,5	<0,002
Hexacloroetano	3	<0,002
Lindano	0,2	<0,000005
m-Cresol	200	1
Mercúrio	0,1	<0,001
Metiletilcetona	200	<0,03
Metoxicloro	2	<0,000001
Nitrobenzeno	2	<0,0001
o-Cresol	200	1
p-Cresol	200	1
Pentaclorofenol	0,9	<0,001
Piridina	5	<0,03

Item	Limite máximo no extrato (mg.L ⁻¹)	Lodo solubilizado (mg.L ⁻¹)
Prata	5	<0,01
Selênio	1	0,055
Tetracloroeto de carbono	0,2	<0,002
Tetracloroetileno	4	<0,002
Toxafeno	0,5	<0,1
Tricloroetileno	7	<0,002

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto ao dimensionamento do LD, considerando a área disponível, optou-se por construir seis módulos de LD com área útil total de 1.184 m² (quatro com 197 m² e dois com 198 m²) e altura máxima de lodo de 0,50 m. Logo, o LD possui capacidade de receber 592 m³ de lodo no total. Foram feitas medições nos decantadores para estimar o volume de lodo diário produzido, concluindo-se que a ETA produz cerca de 3,5 m³.dia⁻¹ de lodo com TS de 10,7% sedimentado no fundo dos decantadores. Uma vez que durante o processo de lavagem o lodo é diluído para facilitar a remoção, estima-se uma produção de 15 m³.dia⁻¹ considerando o TS de 2,5% do lodo utilizado no protótipo

Dessa forma, o LD tem capacidade para desaguar lodo de 40 dias de produção da ETA. Uma opção é lavar os decantadores existentes na ETA a cada 40 dias, esperar o tempo de secagem de todo o lodo no LD e removê-lo totalmente antes de realizar nova lavagem. Pode-se também lavar um decantador a cada 40 dias, com 20 dias de intervalo entre a lavagem de cada decantador, utilizando três módulos de LD por decantador. Por fim, também pode-se realizar a lavagem de um decantador a cada 26 dias, espaçando-se 13 dias da lavagem do outro decantador e utilizar 2 módulos por lavagem.

Em todas as opções consideradas, o tempo de secagem do lodo é de 40 dias, que é superior aos 19 dias que se mostraram suficientes para elevar o TS no protótipo acima de 70%. Com isso, tem-se maior segurança para a operação. A TAS estimada é de 12,7 kg.m⁻², bastante próxima à testada no protótipo. Cabe destacar que, tendo em vista a variação da quantidade de lodo produzida em função da qualidade da água bruta e a influência das condições climáticas, há espaço previsto para construir novos módulos do LD, caso seja verificada posteriormente a necessidade de ampliar as instalações.

CONCLUSÕES

A construção e operação do protótipo de LD permitiu concluir que a altura da camada e o TS do lodo bruto foram adequados para que o lodo desaguado atingisse elevados valores de TS em poucos dias. O fato de a precipitação ter ocorrido somente após a abertura das ranhuras permitiu que a água da chuva fosse drenada pelo geotêxtil, não sendo absorvida pelos sólidos e não afetando a etapa de secagem.

O líquido drenado produzido no LD atendeu a todos os VMPs para lançamento na rede de esgotamento sanitário, entretanto, superou alguns dos VMPs para lançamento em corpos hídricos Classe 3 e alguns dos VMPs de enquadramento, tendo potencial de desenquadrar o rio a depender da vazão de lançamento. Assim, o lançamento direto do drenado, sem um pré-tratamento, estaria em desacordo com a legislação vigente. O resíduo sólido resultante (lodo seco) foi classificado como não inerte, não perigoso (Classe IIA), e caso não seja economicamente viável tratá-lo e recuperá-lo, deve ser encaminhado para aterro autorizado a receber resíduos dessa classe.

Cabe destacar que o experimento realizado utilizou apenas parte da amostra de lodo gerada pelo decantador, em uma lavagem específica. Assim, tendo em vista que há variações na água bruta afluente à ETA durante o ano, também é esperado que as características do lodo gerado variem, influenciando a qualidade do drenado. Logo, é preciso criar programa de monitoramento do efluente (líquido drenado) do LD, para garantir que não prejudique o tratamento realizado na ETE para a qual será encaminhado, nem supere os limites estabelecidos pela legislação para esse tipo de lançamento.

Em relação aos aspectos operacionais e construtivos, destaca-se que a impermeabilização das paredes e do fundo de concreto é importante para evitar a deterioração da estrutura pela absorção da água do efluente drenado. Além disso, a realização das lavagens precisa ser padronizada, visando manter o TS adequado à

operação do LD, bem como um volume de lodo que o LD seja capaz de receber durante o período de lavagem, sem transbordamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004:2004 – Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, RJ, 2004.
2. ACHON, C.L.; BARROSO, M. M; CORDEIRO, J.S. 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 – No 1 – jan/mar 2008, 54-62p
3. APHA - *American Public Health Association. Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*. 23.ed. Washington DC, USA. 2017.
4. BARROSO, M. M. Influência das micro e macro propriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por leito de drenagem. 249p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
5. BRASIL. Lei Nº 12.305/2010, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: out. 2022.
6. BRASIL. Lei Nº 9.605/1998, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm>. Acesso em: out. 2022.
7. CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357: 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. Brasil, 2005.
8. CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasil, 2011.
9. CORDEIRO, J.S. Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). (Capítulo V). Coordenador: ANDREOLI, C.V. Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB 2, 2001.
10. FONTANA, A.O. 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, 2004.
11. FONTANA, A. O.; CORDEIRO, J. S.; ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; REIS, F. R. Desaguamento de lodos de ETAs: Experiências bem-sucedidas com emprego de leito de drenagem. Ponta Grossa: Editora Atena, 2021. (Coleção desafios das engenharias: Engenharia Sanitária 2, 9).
12. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017. Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário. Rio de Janeiro, RJ, 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pnsb/pnsb-2017>>. Acesso em: jan. 2023.
13. MINATEL, M. M. Influência de múltiplos fatores no desaguamento de lodo de ETA em leitos de drenagem. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana – PPGEU – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2021.
14. O’KELLY, B.C. *Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling*. *Geotechnical Research*, v. 3, p. 148-179, 2016.

15. REIS, F. R.; ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. A importância da cobertura na eficiência do processo de desaguamento de lodo de ETA em leitos de drenagem. Ponta Grossa: Editora Atena, 2021. (Coleção desafios das engenharias: Engenharia Sanitária 2, 10).
16. SANTOS, B. Avaliação da aplicação do sistema de leito de drenagem com tratamento de lodo de estação de tratamento de água Bom Jardim em Uberlândia. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 98 p., 2012.
17. SÃO PAULO. Decreto Estadual No 8.468/1976. Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. 1976.
18. SILVEIRA, C. Desaguamento de lodos de Estações de tratamento de águas por leito de drenagem / secagem com manta geotêxtil. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, 137 p., 2012.
19. URBAN, R.C; ISAAC, R. L.; MORITA, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. Revista DAE. Núm. 219, vol. 67. 2019.