

Influência da manta geotêxtil e altura da camada de lodo no desaguamento de lodo anaeróbico em leito de drenagem

Influence of the geotextile blanket and sludge height in anaerobic sludge dewatering using drainage bed

Cali Laguna Achon^{1*} , Paulo Ricardo Santos Coimbra¹ , Erich Kellner¹ 

RESUMO

As estações de tratamento de esgoto (ETEs) geram resíduos, com destaque para o lodo de esgoto, que tem aproximadamente 95% de água e se classifica como resíduo sólido, necessitando de disposição final ambientalmente adequada. Assim, o desaguamento é fundamental no gerenciamento do lodo, já que promove redução de volume. O leito de drenagem (LD) é um sistema natural, sem uso de energia elétrica e produtos químicos, com resultados promissores para o desaguamento de lodo de estações de tratamento de água (ETAs). Nesse sentido, esta pesquisa visou a avaliar o desaguamento de lodo gerado em ETE, proveniente de reator Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB). A análise foi realizada por meio de nove ensaios usando LD em escala de bancada com área de fundo de 31 × 31 cm. Os ensaios foram realizados com 3 diferentes geotêxteis: HaTe 55/55, 80/80 e 105/105 DW; e 3 alturas de lodo bruto: 10, 15 e 20 cm. Nos ensaios, mediu-se o teor de sólidos inicial do lodo bruto e em intervalos de tempo predeterminados: vazão de drenagem, volume drenado, cor aparente, turbidez, pH e condutividade do líquido drenado. Os ensaios com a manta 55/55 obtiveram melhor desempenho, com redução final do volume de lodo superior a 65%, independentemente da altura da camada de lodo. Os resultados de cor e turbidez do líquido drenado para a manta HaTe 55/55 demonstraram tendência de melhoria de qualidade com o aumento da altura da camada de lodo, fato não observado para as outras mantas. Obteve-se melhoria da qualidade do líquido drenado, principalmente após 15 minutos, quando o percentual drenado atingiu 35%.

Palavras-chave: lodo anaeróbico; desaguamento; leito drenagem; manta geotêxtil.

ABSTRACT

Sewage Treatment Plants generate sewage sludge, which has approximately 95% of water and requires a proper disposal. Thus, dewatering is fundamental in sludge's management since it promotes volume reduction of the residue. The drainage bed (DB) is a natural system, without the use of energy and chemicals, with prosperous results for the dewatering of sludge from Water Treatment Plants. In this sense, this research aimed to evaluate sewage sludge's dewatering from Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB). The analysis was performed through nine tests in DB models from laboratory scale with a bottom area of 31 × 31 cm. The tests were performed with three different geotextiles blankets: HaTe 55/55; 80/80 and 105/105 DW and three heights of applied crude sludge: 10, 15 and 20 cm. In the tests, the crude sludge's initial solid content was measured. Then, at predetermined time intervals were measured: drainage flow, drained volume, apparent color, turbidity, pH and drained liquid's conductivity. The tests with the HaTe 55/55 geotextile blanket obtained the best performance, with final reduction of the sludge volume above 65%, independent of the height of the sludge applied. The color and turbidity results of the drained liquid for the HaTe 55/55 geotextile blanket showed a tendency to improve quality with the increase of the sludge height, a fact not observed for the other geotextiles blankets.

Keywords: anaerobic sludge; dewatering; drainage bed; geotextile blanket.

INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de esgoto (ETEs), durante o processo de tratamento, geram resíduos, com destaque para o lodo de esgoto. Conforme dados do Ministério das Cidades (BRASIL, 2008), a

aplicação de sistemas de reatores anaeróbios do tipo Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), no Brasil, está em crescimento e, por isso, torna-se cada vez mais importante a gestão do lodo gerado nesse tipo de sistema.

¹Universidade Federal de São Carlos - São Carlos (SP), Brasil.

*Autor correspondente: caliachon@gmail.com

Recebido: 04/09/2017 - Aceito: 25/06/2018 - Reg. ABES: 184786

O lodo anaeróbico de reator UASB, objeto de estudo desta pesquisa, é composto por matéria orgânica e inorgânica e mais de 95% de seu volume é constituído por água, o que dificulta o manejo desse resíduo (VON SPERLING, 2005). Além disso, o volume de lodo gerado encarece o correto gerenciamento, representando parcela significativa nos custos operacionais de uma ETE (CORDEIRO, 2001).

Embora tenha em sua composição grande quantidade de água, o lodo de esgoto é classificado como resíduo sólido, devendo, portanto, estar em conformidade com a NBR 10004:2004 (ABNT, 2004) e em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), esta última instituída pela Lei nº 12.305/2010, a qual estabeleceu a ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, só então, a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Assim, o lodo de esgoto, como resíduo sólido, deve atender a essas prioridades. Ainda conforme a PNRS, rejeitos são resíduos sólidos que esgotaram as possibilidades técnico-econômicas de recuperação, devendo ser destinados para aterros. Dessa forma, o lodo deve receber gerenciamento prévio adequado, visando à redução e à reutilização de maneira a atender às prioridades, em vez de ser simplesmente descartado como rejeito.

Para tal, uma maneira de realizar redução do volume do resíduo é o desaguamento. Esse processo pode ser realizado de maneira mecânica ou natural, sendo o leito de drenagem (LD), objeto de estudo desta pesquisa, um sistema natural, sem consumo de energia elétrica e insumos químicos. Além disso, Kuroda *et al.* (2014), ao estudarem os processos de drenagem e secagem do lodo de decantadores de estações de tratamento de água (ETAs), empregando mantas geotêxteis, destacaram como vantagens os baixos custos de implantação e manutenção, além da facilidade de operação em relação aos sistemas mecânicos.

Cordeiro (2001) estudou os sistemas naturais e propôs modificações no tradicional leito de secagem, por intermédio da adição de mantas geotêxteis como camada filtrante e retirada da camada de areia, promovendo melhoria no tempo de drenagem da água livre. Tais modificações constituíram o sistema denominado de LD.

Diversos foram os estudos que utilizaram o LD aplicado ao desaguamento de lodo oriundo de ETA. Fontana (2004), Barroso (2007), Achon, Barroso e Cordeiro (2008), Reis (2011), Silveira (2012), Kuroda *et al.* (2014), Cordeiro *et al.* (2014) e Silveira *et al.* (2015) encontraram resultados promissores para o lodo de ETA, atestando sua aplicação e suscitando novos estudos.

Segundo Barroso (2007), o desaguamento de lodo de ETA em LD pode ser subdividido em duas fases: drenagem e secagem. Na primeira predomina a filtragem da água livre, e na segunda, a evaporação por ação e influência das variáveis climáticas (Barroso, 2007).

Fontana *et al.* (2007) utilizaram dois módulos de LD, com volume total de 262 m³ cada. O primeiro foi revestido com manta geotêxtil tecida

de polipropileno com densidade de 160 g/m², enquanto o segundo, com manta geotêxtil não tecida de poliéster com densidade de 400 g/m². A operação do LD foi realizada em 2 ciclos de 30 dias, com utilização de condicionante químico (polímero) e taxa de aplicação de sólidos (TAS) entre 14 e 17 kgST/m², resultando em redução de volume da ordem de 94% após a fase de secagem.

Mortara (2011) realizou ensaios em escala laboratorial utilizando testes do tempo de drenagem (TTD) para avaliar a influência da variação de tipos e dosagens de polímero, além de diferentes mantas geotêxteis no desaguamento, particularmente na fase de drenagem. Após a obtenção dos melhores resultados foram escolhidos a manta geotêxtil e o polímero para realização de ensaios de desaguamento em LD de escala piloto. Foram analisadas diferentes TAS, variando entre 9 e 22 kgST/m², além da evolução do teor de sólidos da torta de lodo durante a fase de secagem.

Dessa forma, justifica-se a aplicação do LD para o desaguamento de lodo de gerado em ETE, visto que poucos foram os estudos relacionados ao tema. Nesse contexto, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência de diferentes alturas de camada de lodo e de mantas geotêxteis, aplicadas no LD, na fase de drenagem e nas características qualitativas do líquido drenado durante o processo de desaguamento.

METODOLOGIA

Para realização dos ensaios foi construído um LD em escala de bancada. Conforme Figura 1, esse LD tem formato cúbico, medindo 31 cm, confeccionado em chapa de aço galvanizada com dreno de fundo de ½" e apoiado em suporte de madeira. No interior do LD, tem-se uma camada suporte de brita 1 de 3 cm, que permite a drenagem do líquido e serve também de apoio para manta geotêxtil, conforme desenho apresentado na Figura 1B.

Conforme recomendações de Mortara (2011) e Coimbra & Achon (2016), foram utilizadas nos ensaios três diferentes mantas geotêxteis de polipropileno: geotêxtil tecido HaTe[®] 55/55 (A); geotêxtil tecido HaTe[®] 80/80 (B); e geotêxtil tecido HaTe[®] 105/105 DW (C), cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 1.

Para cada manta geotêxtil foram realizados três ensaios utilizando-se altura inicial de lodo bruto de 10 (1), 15 (2) e 20 cm (3), o que modifica diretamente o volume de lodo bruto aplicado (V_A) e, consequentemente, a TAS dos ensaios. A TAS foi calculada conforme Equação 1.

$$\text{Taxa de aplicação de sólidos (kgST.m}^{-2}\text{)} = \text{ST} \times V_A \times \rho/A \quad (1)$$

Em que:

TAS = a taxa de aplicação de sólidos (kgST.m⁻²);

ST = o teor de sólidos totais do lodo bruto (%);

V_A = o volume de lodo aplicado em cada ensaio (m^3);

A = a área de fundo do leito de drenagem (m^2);

P = a densidade do lodo ($kg.m^{-3}$) assumido como $\rho = 1.030 kg.m^{-3}$, conforme Von Sperling (2005).

Na Tabela 2 são apresentadas as configurações das condições iniciais de cada ensaio.

Foram realizadas seis campanhas de coleta de amostras de lodo, oriundas do reator UASB de uma ETE que trata, em média, 457 L/s. Em cada campanha de amostragem foram coletadas, a partir do registro inferior do reator, amostras com volume de 20 L de lodo. Os ensaios foram realizados em período de, no máximo, 24 horas após as coletas, sendo as amostras armazenadas em recipientes fechados e mantidos a temperatura ambiente.

Para cada um dos ensaios, imediatamente após o despejo do lodo bruto no LD, retirou-se uma amostra de 500 mL para determinação do teor de sólidos totais, fixos e voláteis. As séries de sólidos foram realizadas em triplicata, conforme recomendações da American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) e Water Environment Federation (WEF) (2005), apresentadas na Tabela 3.

Durante os ensaios, mediram-se a vazão de drenagem e o volume do líquido drenado após tempos preestabelecidos, segundo Coimbra & Achon (2016) e Coimbra *et al.* (2016), de 1, 5, 10, 15, 30, 60 e 120 minutos a partir do início de cada ensaio. Para tanto, na parte inferior do LD, logo abaixo do dreno, foi posicionado um becker com capacidade de 500 mL, graduado com fundo de escala em 50 mL, de maneira a permitir a coleta do líquido drenado e

a determinação do volume drenado em cada instante (V_t), do volume acumulado e do volume total drenado (V_D), resultante da soma dos volumes. As vazões de drenagem foram calculadas por meio da razão entre o volume drenado e seu respectivo tempo de coleta. A partir dos volumes aferidos nos tempos determinados, calculou-se a porcentagem de líquido drenado com o tempo, empregando a Equação 2.

Tabela 1 - Especificações das mantas geotêxteis utilizadas nos ensaios.

Parâmetros	Geotecido HaTe® 55/55	Geotecido HaTe® 80/80	Geotecido HaTe® 105/105 DW
Gramatura ($g.m^{-2}$)	272	397	450
Resistência à tração nominal ($kN.m^{-1}$)	55	80	105
Fluxo de água ($l.s^{-1}.m^{-2}$)	15	15	15

Tabela 2 - Condições iniciais dos ensaios realizados.

Ensaio	Manta geotêxtil utilizada	Altura da camada de lodo bruto (cm)	Volume de lodo bruto aplicado (L)
A1	Geotecido HaTe® 55/55	10	9,6
A2	Geotecido HaTe® 55/55	15	14,4
A3	Geotecido HaTe® 55/55	20	19,2
B1	Geotecido HaTe® 80/80	10	9,6
B2	Geotecido HaTe® 80/80	15	14,4
B3	Geotecido HaTe® 80/80	20	19,2
C1	Geotecido HaTe® 105/105 DW	10	9,6
C2	Geotecido HaTe® 105/105 DW	15	14,4
C3	Geotecido HaTe® 105/105 DW	20	19,2

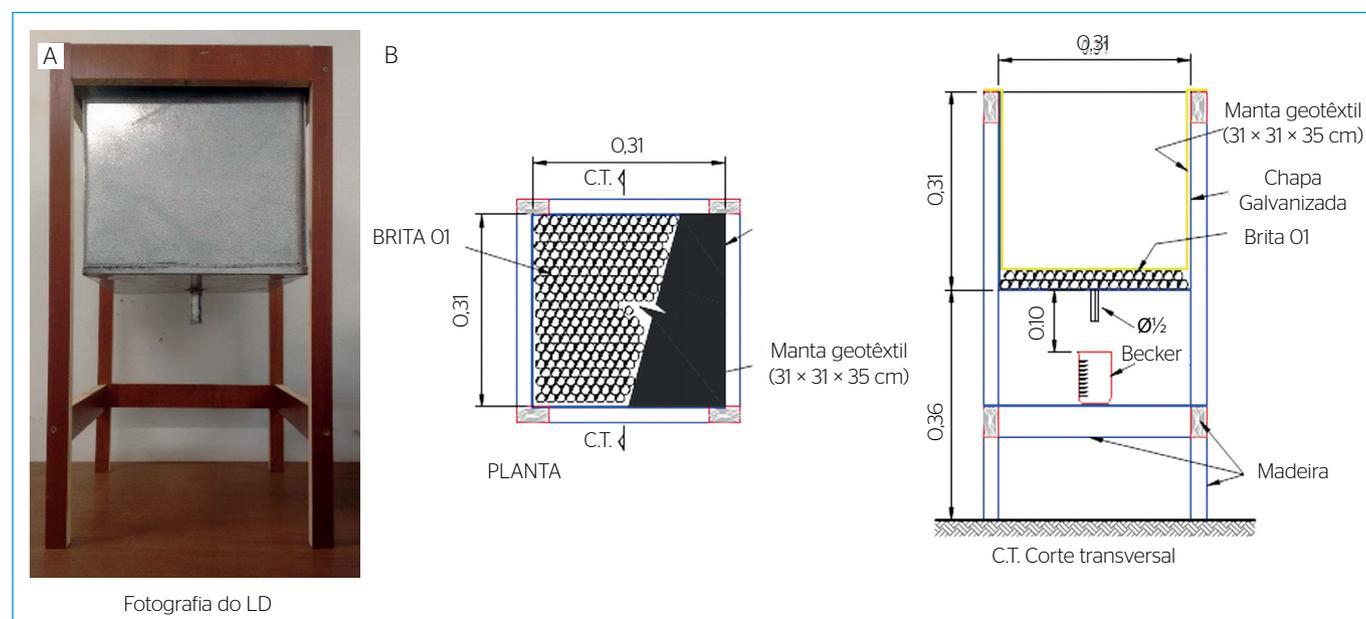


Figura 1 - Esquema geral com fotografia (A) e detalhes técnicos (B) do leito de drenagem em escala de bancada utilizado nos ensaios.

Porcentagem de líquido drenado com o tempo (%) = $(V_t/V_D) \cdot 100$ (2)

Em que:

V_t = o volume drenado até o instante t estabelecido para a coleta (mL);

V_D = o volume total drenado após 120 minutos (L).

Calculou-se também a redução de volume de lodo para os ensaios, empregando a Equação 3.

Redução de volume de lodo (%) = $(V_D/V_A) \cdot 100$ (3)

Em que:

V_D = o volume total drenado após 120 minutos (L);

V_A = o volume de lodo aplicado em cada ensaio (L).

Tabela 3 – Parâmetros e procedimentos utilizados para análise do lodo bruto.

Parâmetros	Procedimento (APHA/AWWA/WEF)	Unidade
Sólidos totais	2540G	%
Sólidos totais fixos	2540G	%
Sólidos totais voláteis	2540G	%

APHA: American Public Health Association; AWWA: American Water Works Association; WEF: Water Environment Federation.

Tabela 4 – Parâmetros e procedimentos utilizados para análise do líquido drenado.

Parâmetros	Procedimento (APHA/AWWA/WEF)	Unidade
Cor aparente	2120 B	PtCo
Turbidez	2130 B	UTN
Condutividade	2510 B	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
pH	4500H+B	-

APHA: American Public Health Association; AWWA: American Water Works Association; WEF: Water Environment Federation.

Tabela 5 – Resultados da caracterização do lodo bruto e taxa de aplicação de sólidos dos ensaios.

Ensaio	Manta geotêxtil utilizada	Altura da camada de lodo bruto (cm)	Volume de lodo bruto aplicado (L)	Teor de sólidos totais (%)	Teor de sólidos Totais fixos (%)	Teor de sólidos totais voláteis (%)	TAS (kgST.m ⁻²)
A1	HaTe® 55/55	10	9,6	1,77	39,99	60,01	1,82
A2	HaTe® 55/55	15	14,4	4,30	35,96	64,04	6,64
A3	HaTe® 55/55	20	19,2	2,92	37,18	62,82	6,01
B1	HaTe® 80/80	10	9,6	4,07	36,42	63,58	4,19
B2	HaTe® 80/80	15	14,4	2,95	37,09	62,91	4,56
B3	HaTe® 80/80	20	19,2	4,89	40,75	59,25	10,07
C1	HaTe® 105/105 DW	10	9,6	3,02	37,06	62,94	3,11
C2	HaTe® 105/105 DW	15	14,4	2,70	36,30	63,70	4,17
C3	HaTe® 105/105 DW	20	19,2	4,74	- ⁽¹⁾	- ¹	9,76

⁽¹⁾ Não foi possível realizar a determinação dos teores de sólidos totais fixos e voláteis; TAS: taxa de aplicação de sólidos.

Foram coletadas, nos tempos predeterminados, as amostras do líquido drenado para serem caracterizadas em relação aos parâmetros de cor aparente, turbidez, pH e condutividade. Essas análises seguiram recomendações da APHA/AWWA/WEF (2005), conforme Tabela 4.

Ressalta-se que, as alíquotas utilizadas para as análises qualitativas do líquido drenado foram coletadas diretamente na tubulação de saída de ½" (dreno) do LD, com o auxílio de um bécquer com capacidade de 50 mL, graduado com fundo de escala em 5 mL, e não do recipiente contendo o líquido drenado acumulado durante o decorrer do ensaio. Assim, o volume das alíquotas coletado nos tempos predeterminados foi somado ao volume drenado V_t , de forma a não alterar os resultados de volume acumulado e volume total drenado após 120 minutos (V_D).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos da caracterização do lodo bruto e da TAS de todos os ensaios realizados.

Conforme apresentado na Tabela 5, pode-se observar que o teor de sólidos totais do lodo bruto variou entre 1,8 e 4,9% por conta das várias campanhas de coleta de amostras. Os valores de sólidos totais fixos variaram entre 36,0 e 40,8% e os de sólidos totais voláteis, entre 60,0 e 64,0%.

Em relação à TAS, notou-se que o aumento da altura da camada de lodo bruto usada nos ensaios promove aumento do volume de lodo aplicado, porém não necessariamente da TAS, visto que o teor de sólidos totais do lodo bruto também é diretamente proporcional à TAS, conforme indicado na Equação 1. Assim, a TAS para os ensaios das séries B e C aumentou de acordo com o aumento do volume de lodo aplicado, o que não ocorreu para os ensaios da série A.

Na Tabela 6, têm-se os resultados das vazões de drenagem que foram aferidas nos tempos predeterminados, assim como a vazão

média e máxima de cada ensaio. Na Figura 2, apresenta-se o gráfico das vazões de drenagem em função do tempo.

Analisando os ensaios para cada tipo de manta geotêxtil, a vazão de drenagem média foi superior para os ensaios em que houve maior aplicação de volume de lodo bruto, e conseqüentemente, da altura da camada de lodo. Entretanto isso não se observa na análise da vazão máxima de cada ensaio, pois a maior vazão encontrada para os ensaios da série A ocorreu no ensaio A2 (15 cm) com tempo de 5 minutos. Para os ensaios da série B o ensaio B1 (10 cm) obteve a maior vazão no tempo de 5 minutos e para os ensaios da série C, a maior vazão encontrada ocorreu no ensaio C3 (20 cm) também no tempo de 5 minutos.

De modo geral, as vazões máximas ocorreram entre 5 e 10 minutos. Após esse tempo, as taxas de drenagem tendem a diminuir. Em apenas uma ocorrência, ensaio C2, a vazão máxima ocorreu com tempo de 1 minuto. Após 60 minutos, a vazão diminuiu até chegar a valores reduzidos, não sendo possível mensurar a taxa de drenagem.

Barroso (2007) estudou o desaguamento de lodo de ETA em LD e observou uma relação inversamente proporcional entre a TAS e a vazão de drenagem inicial, por meio da realização de 11 ensaios. Contudo, essa relação não foi notada nesta pesquisa, considerando os resultados dos nove ensaios realizados para o desaguamento de lodo de ETE, mesmo analisando as vazões máximas ou médias.

Tabela 6 - Vazão de drenagem ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) nos ensaios nos tempos predeterminados, vazão média e máxima para cada ensaio.

Ensaio	TAS ($\text{kgST}\cdot\text{m}^{-2}$)	Vazão de drenagem ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) nos tempos predeterminados						Vazão máxima ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	Vazão média ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)
		T=1 min	T=5 min	T=10 min	T=15 min	T=30 min	T=60 min		
A1	1,82	43,3	142,2	139,6	128,1	83,0	43,0	142,2	96,5
A2	6,64	121,9	249,7	239,7	168,7	110,8	44,2	249,7	155,8
A3	6,01	169,8	218,9	248,8	230,9	150,2	89,8	248,8	184,7
B1	4,19	100,8	212,7	166,4	112,2	51,4	9,4	212,7	108,8
B2	4,56	65,2	140,1	160,8	132,5	70,7	32,1	160,8	100,2
B3	10,07	75,6	159,4	175,8	166,3	113,1	61,5	175,8	125,3
C1	3,11	166,5	222,6	146,9	137,9	51,5	29,9	222,6	125,9
C2	4,17	133,8	97,4	90,0	80,1	61,8	¹	133,8	92,6
C3	9,76	217,8	266,7	246,0	159,1	101,9	48,1	266,7	173,2

¹ Valor muito baixo, inferior à faixa de medição; TAS: taxa de aplicação de sólidos.

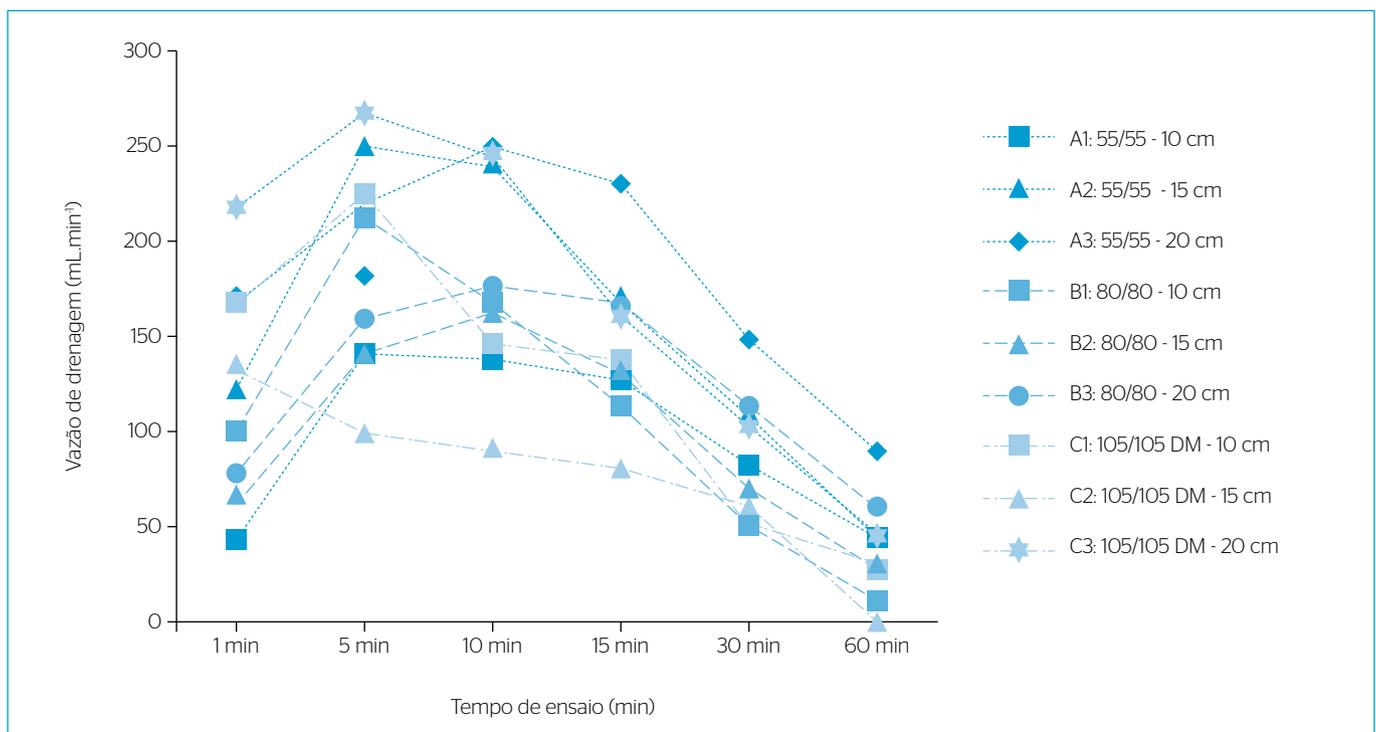


Figura 2 - Variação da vazão de drenagem ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$) em função do tempo para os nove ensaios realizados.

Mortara (2011) realizou dois experimentos de desagamento de lodo de reator anaeróbio sem condicionamento químico em leito de drenagem. O autor utilizou cerca de 700 L de lodo e altura da camada de lodo de 50 cm aplicados sobre manta geotêxtil Hate® 55kN/55kN com gramatura de 289 g.m⁻². Em um ensaio com teor de sólidos totais do lodo bruto de 2,76% e TAS de 15,4 kgST.m⁻² alcançou vazão por unidade de área (fluxo de água) de 5 L.min⁻¹.m⁻² e em outro, com 2,45% de sólidos totais e TAS de 13,6 kgST.m⁻², obteve vazão inicial de 6 L.min⁻¹.m⁻². Considerando área de fundo do LD utilizado por Mortara (2011) igual

a 1,26 m², as vazões obtidas pelo autor são 6,3 e 7,6 L.min⁻¹. Esses valores são bastante superiores aos encontrados nos ensaios desta pesquisa, com máximo igual a 0,267 L.min⁻¹ em C3, e essa diferença pode ser explicada pelas diferentes quantidades de lodo aplicadas, além das alturas de lodo bruto empregadas.

Na Tabela 7, apresenta-se a quantificação do volume de líquido drenado durante os ensaios.

A Figura 3 traz o gráfico do volume acumulado drenado durante os ensaios.

Tabela 7 - Volume do líquido drenado (mL) aferidos nos tempos predeterminados e volume total drenado em cada ensaio.

Ensaio	Volume do líquido drenado (mL) aferidos nos tempos predeterminados							Volume total drenado V _D (mL)
	Até 1 min	Entre 1 e 5 min	Entre 5 e 10 min	Entre 10 e 15 min	Entre 15 e 30 min	Entre 30 e 60 min	Entre 60 e 120 min	
A1	75	275	675	650	1400	1900	1300	6275
A2	25	875	1.250	1.100	2.250	2.525	1.430	9.455
A3	200	750	1.250	1.200	2.900	3.750	3.300	13.350
B1	50	650	950	700	1.200	800	250	4.600
B2	50	350	750	750	1.600	1.750	1.400	6.650
B3	50	475	850	850	1.950	2.400	2.350	8.925
C1	150	850	1.050	800	1.325	1.150	600	5.925
C2	200	550	500	450	950	1.450	75	4.175
C3	100	1.150	1.350	1.050	2.100	2.050	1.400	9.200

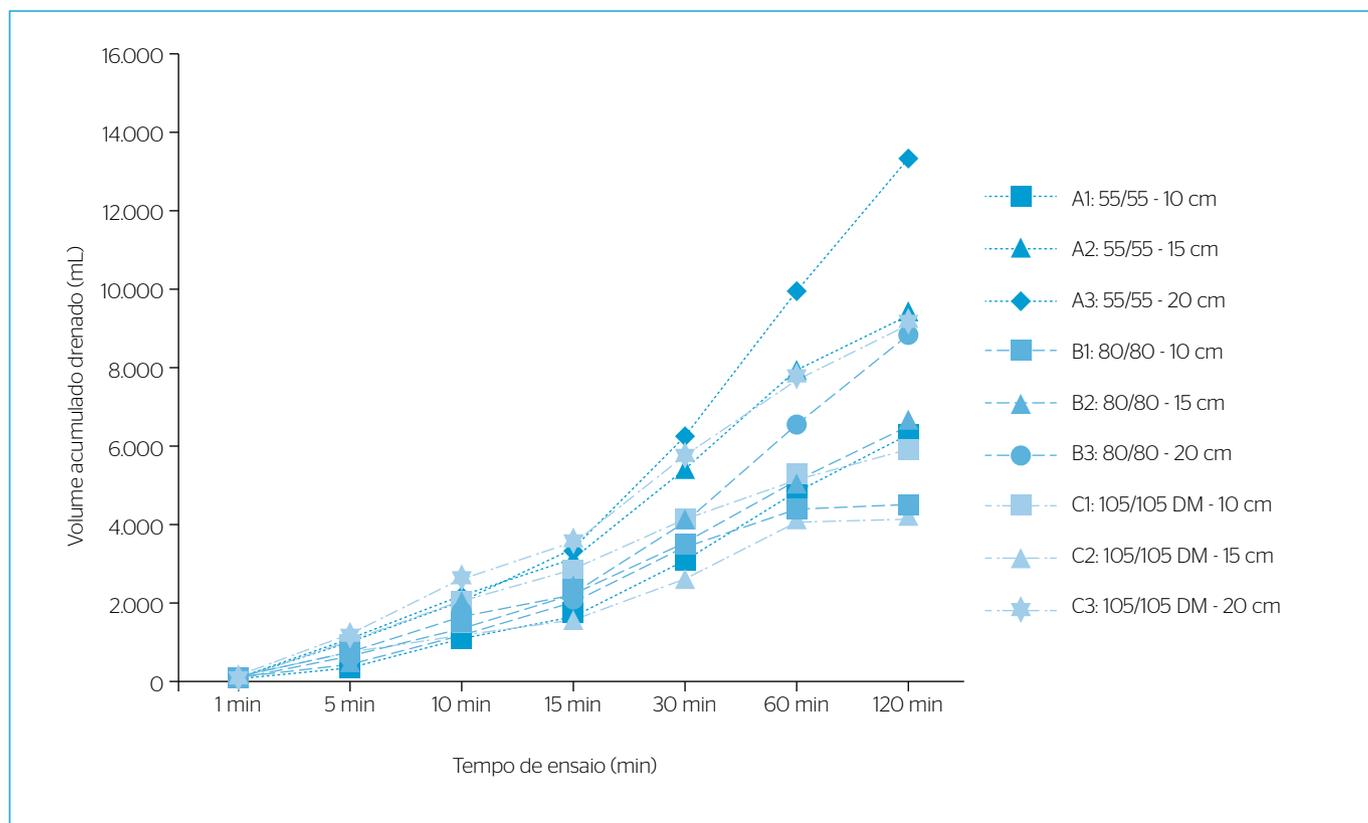


Figura 3 - Volume acumulado drenado em função do tempo para os nove ensaios realizados.

Com exceção do C2 para a altura de 15 cm, nos demais ensaios houve incremento no volume acumulado drenado, conforme aumentava-se a altura da camada de lodo bruto aplicado.

Segundo Barroso (2007), para o desaguamento de lodo de ETA em LD, quanto menor o teor de sólidos inicial do lodo bruto, maior é o volume de lodo drenado. Tal afirmação não pôde ser verificada nos ensaios realizados para o lodo de ETE desta pesquisa, pois a variação no teor de sólidos inicial foi acompanhada por variação na altura da camada aplicada.

O volume total drenado após 120 minutos foi maior para o ensaio A3 (manta 55/55), com 13,35 L. O volume total drenado para a manta 80/80 foi de 8,93 L no ensaio B3 e para a manta 105/105 DW foi de 9,20 L no ensaio C3, todos para altura de 20 cm.

Por meio da Equação 3 calculou-se a redução total de volume de lodo nos ensaios e os resultados são apresentados na Figura 4.

Analisando a redução de volume apresentada na Figura 4, os ensaios da série C tiveram resultados dispersos, porém os resultados dos ensaios das séries A e B foram mais uniformes, mesmo com a variação da altura da camada de lodo. Os ensaios da série A resultaram em redução de volume de lodo superior a 65%, independentemente da altura de lodo, enquanto nos ensaios da série B a redução foi superior a 46%.

Nos ensaios da série A houve pequena tendência de aumento da redução para maiores alturas de lodo (volume maior), porém nos ensaios da série B os resultados foram semelhantes, independentemente da altura da camada de lodo e do volume aplicado. Esse fato é interessante, pois pode permitir que maiores volumes de lodo sejam aplicados no LD, resultando em porcentagem de redução de volume de lodo semelhantes, quando se utilizam as mantas 55/55 e 80/80.

Os ensaios da série C, com manta 105/105 DW, resultaram em redução de volume máxima de 61% (C1) com altura de 10 cm e mínima de 29% (C2) para 15 cm, e o ensaio C3 com altura de 20 cm apresentou valor intermediário de 48%.

Analisando a redução parcial por meio da Equação 2 é possível definir a porcentagem de volume drenado nos intervalos de tempo das medições, cujos resultados são apresentados na Tabela 8.

Analisando os dados da Tabela 8, conclui-se que a maior parte do volume drenado ocorre a partir de 15 minutos, visto que a soma das porcentagens médias do líquido drenado entre 15 e 120 minutos resulta em 64,5%. Destaca-se que para os ensaios A3 e B3 foram registrados valores próximos a 75% do volume drenado após 15 minutos. De maneira semelhante, o percentual do drenado após 30 minutos chega a 41,4%, em média, novamente com destaque para A3 e B3, nos quais o percentual drenado após 30 minutos atingiu valor superior a 52%.

A partir disso, quanto ao volume drenado, a manta 55/55 (A) obteve desempenho superior às mantas 80/80 (B) e 105/105 DW (C), e constatou-se que a altura de 20 cm de lodo bruto aplicado foi mais favorável do que as demais. Para análise dos parâmetros de qualidade, as Figuras 5, 6 e 7 apresentam os resultados da cor aparente e turbidez para os ensaios.

Os resultados do parâmetro de cor aparente para os ensaios da série A demonstraram melhoria na qualidade do líquido drenado ao longo do tempo e conforme aumento da camada de lodo aplicado, enquanto para os ensaios da série B o aumento da camada de lodo provocou piora na qualidade final do líquido drenado. Para os ensaios da série C, o resultado foi mais uniforme, variando entre 130 (C1) e 155 (C3) PtCo. Do mesmo modo que para cor aparente, os ensaios das séries A



Figura 4 - Redução total de volume de lodo nos ensaios após 120 minutos.

e B apresentaram resultados de turbidez mais dispersos, enquanto na série C os resultados foram mais próximos, variando entre 33 e 49 NTU. Assim, em relação à qualidade do líquido drenado, o melhor resultado

ocorreu para o ensaio B1, que após 60 minutos atingiu 85 PtCo de cor aparente e 24 NTU de turbidez. Porém, é importante destacar que, após 60 minutos todos os ensaios atingiram valores inferiores a 154 NTU.

Tabela 8 - Porcentagem do líquido drenado durante os intervalos de tempo analisados.

Ensaio	Porcentagem de líquido drenado no intervalo de tempo							TOTAL (%)
	Até 1 min	Entre 1 e 5 min	Entre 5 e 10 min	Entre 10 e 15 min	Entre 15 e 30 min	Entre 30 e 60 min	Entre 60 e 120 min	
A1	1,2%	4,4%	10,8%	10,4%	22,3%	30,3%	20,7%	100
A2	0,3%	9,3%	13,2%	11,6%	23,8%	26,7%	15,1%	100
A3	1,5%	5,6%	9,4%	9,0%	21,7%	28,1%	24,7%	100
B1	1,1%	14,1%	20,7%	15,2%	26,1%	17,4%	5,4%	100
B2	0,8%	5,3%	11,3%	11,3%	24,1%	26,3%	21,1%	100
B3	0,6%	5,3%	9,5%	9,5%	21,8%	26,9%	26,3%	100
C1	2,5%	14,3%	17,7%	13,5%	22,4%	19,4%	10,1%	100
C2	4,8%	13,2%	12,0%	10,8%	22,8%	34,7%	1,8%	100
C3	1,1%	12,5%	14,7%	11,4%	22,8%	22,3%	15,2%	100
Média	1,5%	9,3%	13,2%	11,4%	23,1%	25,8%	15,6%	-

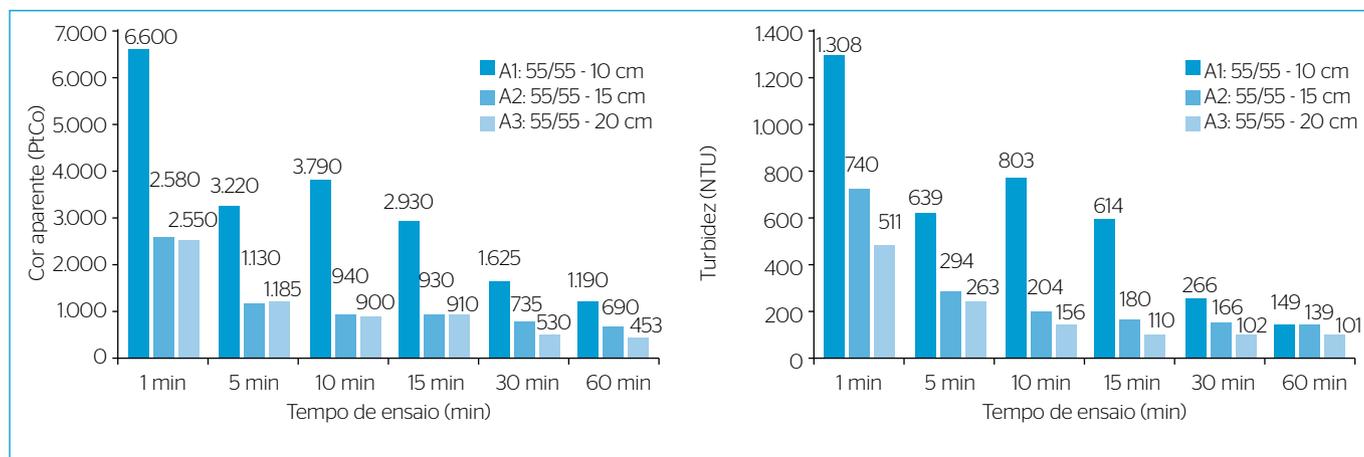


Figura 5 - Cor aparente e turbidez após diferentes tempos de ensaios da série A.

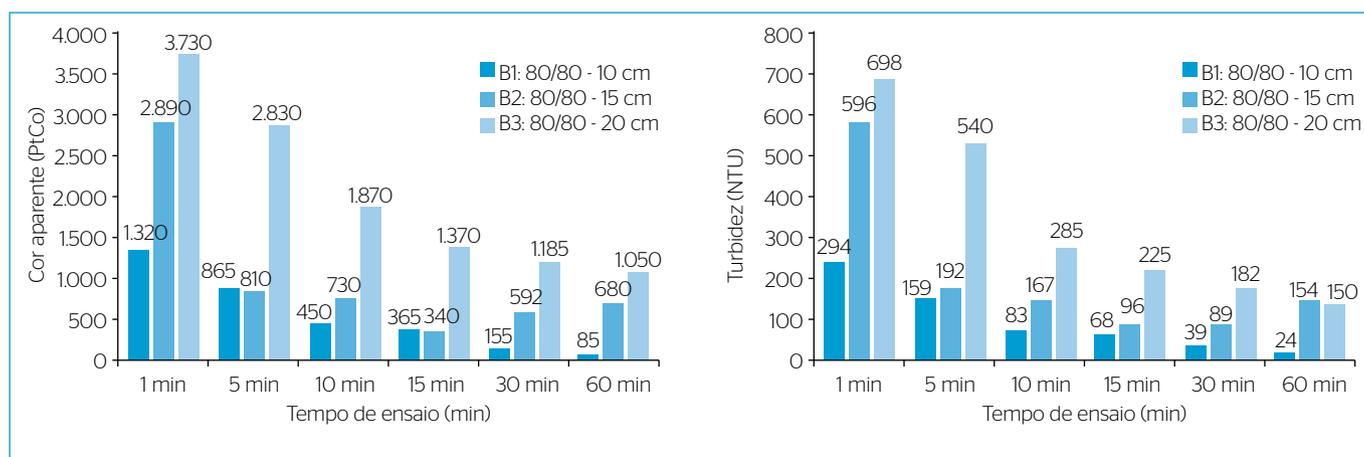


Figura 6 - Cor aparente e turbidez para diferentes tempos de ensaios da série B.

Fontana *et al.* (2007) encontraram turbidez final do líquido drenado entre 31NTU e 39NTU ao realizar o desaguamento em LD de lodo digerido em lagoas de estabilização. Mortara (2011) apresentou resultados superiores a 60NTU para o líquido drenado de lodo anaeróbico. Dessa forma, os valores de turbidez após 60 minutos encontrados para a manta 105/105 DW estão entre 33NTU e 49NTU, e próximos aos valores encontrados na literatura.

O ensaio A1 apresentou resultados de qualidade do líquido drenado, em termos de cor e turbidez, mais diversos com relação aos demais e isso pode ser explicado pela influência do teor de sólidos inicial do lodo bruto de 1,77% nesse ensaio, enquanto todos os outros

foram realizados com valores superiores a 2,70% de ST para o lodo bruto. Retirando os resultados do ensaio A1, as Figuras 8 e 9 trazem o compilado dos resultados de cor aparente e turbidez, respectivamente.

Conforme Tabela 8, em média 64,5% do volume drenado ocorre após 15 minutos, sendo na série A entre 65,6 e 74,5%. Analisando os resultados de cor aparente e turbidez apresentados nas Figuras 8 e 9, os valores apresentados após 15 minutos ficaram abaixo de 1400PtCo e 250NTU, respectivamente, para todos os ensaios com exceção do A1.

No geral, as mantas apresentaram tendência de redução do volume de lodo semelhante. Após 15 minutos do ensaio, observa-se redução média de 65% para os resultados de cor aparente e 70% para turbidez,

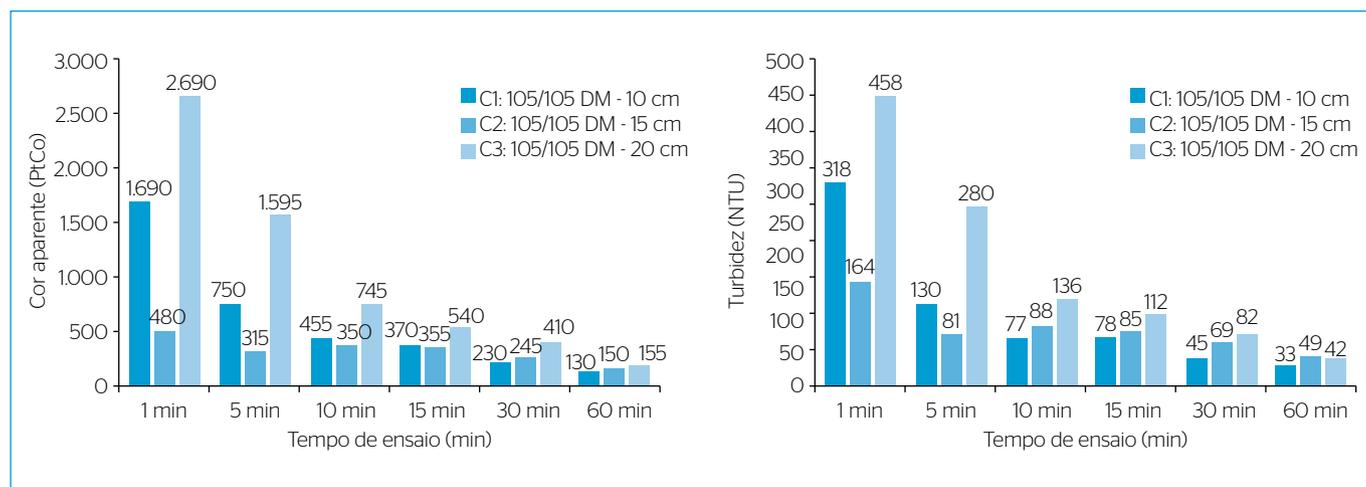


Figura 7 - Cor aparente e turbidez para diferentes tempos de ensaios da série C.

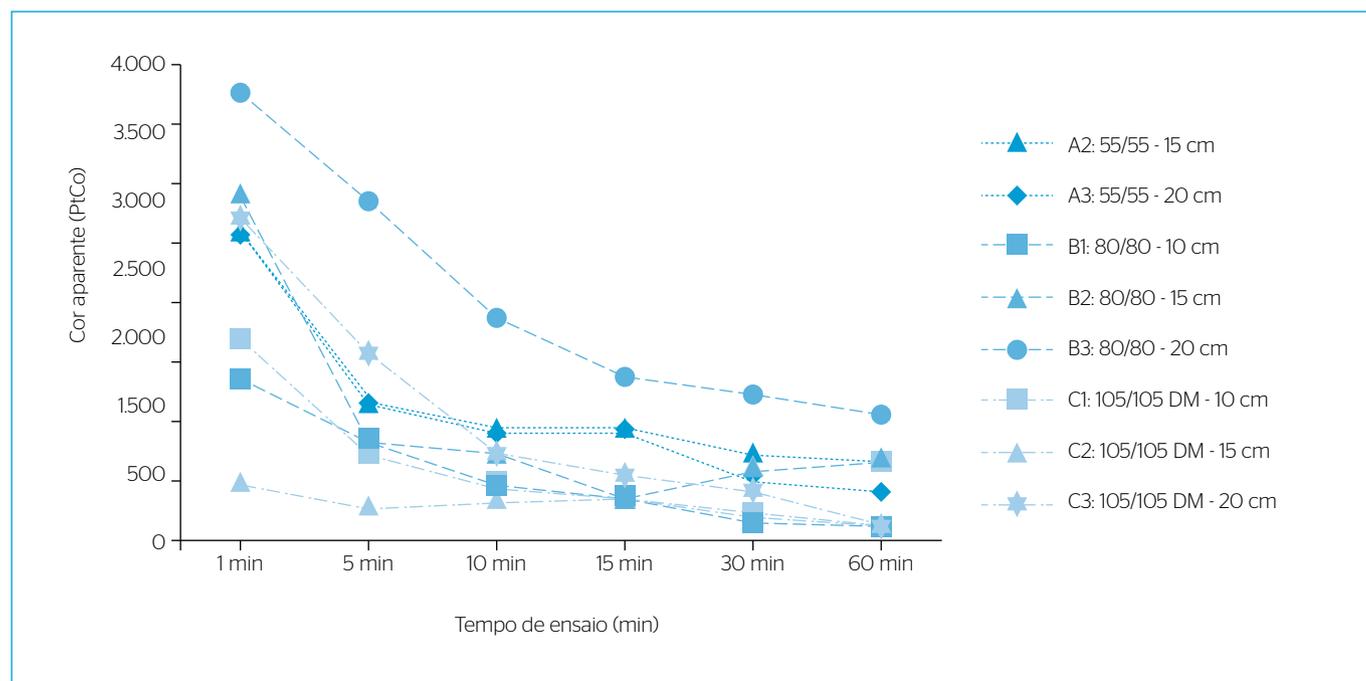


Figura 8 - Cor aparente para diferentes tempos de ensaios dos experimentos, com exceção de A1.

quando comparados aos valores iniciais. Esse aspecto é importante, uma vez que a maioria do volume drenado acontece com qualidade bastante superior à apresentada no início do ensaio.

A análise da qualidade do líquido drenado revelou a tendência de melhoria com o passar do tempo, tanto para cor aparente, quanto para turbidez. Apesar de o ensaio B1 ter atingido os melhores resultados para cor aparente e turbidez, pode-se considerar que, no geral, o uso da manta 105/105 DW (ensaios da série C) apresentou os melhores resultados quanto à qualidade do líquido drenado, por conta da uniformidade destes diante das variações da altura da camada de lodo aplicada.

Quanto à condutividade, os resultados obtidos são apresentados pela Tabela 9.

De acordo com Barroso (2007), a variação do pH pode interferir na capacidade drenante das mantas geotêxteis para lodo de ETA. Segundo Christensen *et al.* (2015), a diminuição nas taxas de drenagem pode ser provocada pelo aumento na condutividade ou também por valores elevados de pH para os lodos de esgoto, porém Mortara (2011) encontrou como resultado a ausência de influência dos parâmetros pH e condutividade no desaguamento de lodo anaeróbico em LD, mesmo utilizando condicionantes químicos. Nesta pesquisa foi analisado o pH apenas em dois ensaios, A2 e A3, que resultaram em valores entre 7,1 e 7,8. Conforme a

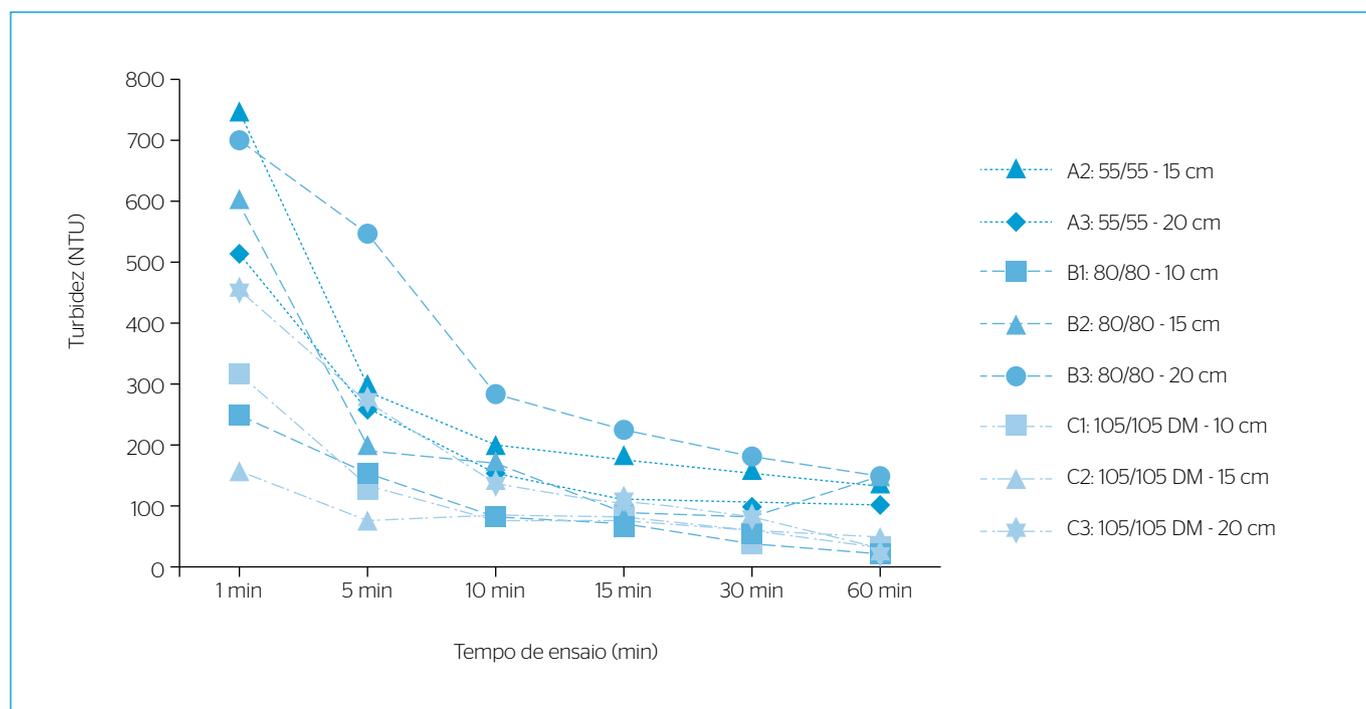


Figura 9 - Turbidez para diferentes tempos de ensaios dos experimentos, com exceção de A1.

Tabela 9 - Valores da condutividade das amostras do líquido drenado coletadas.

Ensaio	Condutividade do líquido drenado (µS.cm ⁻¹)					
	T=1 min	T=5 min	T=10 min	T=15 min	T=30 min	T=60 min
A1	1.174	1.393	1.225	1.124	1.484	1.500
A2	1.205	1.198	1.203	1.194	1.199	1.202
A3	1.194	1.205	1.211	1.215	1.227	1.206
B1	843	834	831	833	836	845
B2	∅	∅	∅	∅	∅	∅
B3	1.946	1.855	1.821	1.867	1.886	1.687
C1	886	875	879	884	880	893
C2	∅	∅	∅	∅	∅	∅
C3	947	950	955	950	956	959

∅ Não foi possível determinar os valores de condutividade para esses ensaios.

Tabela 9, os resultados de condutividade para o líquido drenado variam de $831 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a $1.946 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, porém não foi possível identificar ou estabelecer relação direta entre a condutividade ou pH e a taxa de drenagem.

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, concluiu-se que o aumento na altura da camada de lodo e, conseqüentemente, da carga hidráulica resultou em aumento nas vazões e nos volumes drenados, independentemente da manta utilizada.

A máxima vazão de drenagem ocorreu entre 5 e 10 minutos para todos os ensaios realizados, e os ensaios com as mantas 55/55 e 80/80 resultaram em reduções de volume de lodo que variaram entre 65 e 69%. Nos ensaios com a manta 105/105 DW a redução de volume de lodo variou de 29 a 61%, este último para altura de 10 cm.

Quanto à qualidade do líquido drenado, observou-se a melhoria da qualidade com o passar do tempo, tornando-se mais significativa a partir de 15 minutos, quando atingiu média de 35% do volume de líquido drenado, independentemente da manta utilizada. Especificamente para a manta 55/55 observou-se também a tendência de melhoria da qualidade do líquido drenado com o aumento da altura de camada de lodo aplicado.

Assim, o desaguamento de lodo de reatores UASB por meio de LDs em escala de bancada apresentou resultados promissores, exibindo tendência de redução de volume do lodo, sem a utilização de condicionantes químicos.

FONTE DE FINANCIAMENTO

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- 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*, Rio de Janeiro. v.13, n.1, p.54-62. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522008000100008>
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (2005) *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*. Washington, D.C.: APHA, AWWA & WEF.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2004) *NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT. 71 p.
- BARROSO, M.M. (2007) *Influência das micro e macropropriedades dos lodos de estações de tratamento de águas no desaguamento por Leito de Drenagem*. 2007. 249f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BRASIL. (2008) Ministério das Cidades (org.). *Lodo gerado durante o tratamento de água e esgoto*. Transversal: guia do profissional em treinamento: nível 2. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. 90 p.
- BRASIL. (2010) *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Congresso Nacional.
- CHRISTENSEN, M.L.; KEIDING, K.; NIELSEN, P.H.; JØRGENSEN, M.K. (2015) Dewatering in biological wastewater treatment: a review. *Water Research*, Londres, v. 82, p. 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.019>
- COIMBRA, P.R.S.; ACHON, C.L. (2016) Lodo de reatores UASB: desaguamento através de protótipos de Leito de Drenagem. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, Tupã, v. 4, n. 24, p. 28-42. <http://dx.doi.org/10.17271/2318847242420161322>
- COIMBRA, P.R.S.; OLIVEIRA, G.S.; MAROLA, B.C.; ESCOBAL, A.D.; ACHON, C.L. (2016) Desaguamento de lodo anaeróbio em sistema natural com uso de manta geotêxtil - leito de drenagem. *In: ENCONTRO TÉCNICO DA ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS DA SABESP*, 27., 2016. *Anais...* São Paulo: SABESP.
- CORDEIRO, J.S. (2001) Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). *In: ANDREOLLI, C.V. (Coord.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: ABES. p. 215-245.
- 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: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (AIDIS)*, 34., 2014. *Anais...* Monterrey. p. 1-8.
- 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*. 161f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- 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., 2007. *Anais...* Belo Horizonte.

KURODA, E.K.; SILVEIRA, C.; MACEDO, J.G.; LIMA, M.S.P.; KAWAHIGASHI, F.; BATISTA, A.D.; SILVA, S.M.C.P.; FERNANDES, F. (2014) Drenagem/secagem de lodo de decantadores de ETA em manta geotêxtil. *Revista DAE*, São Paulo, n. 194, p. 24-34. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.002>

MORTARA, F.C. (2011) *Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios*. 241f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

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*. 131f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SILVEIRA, C. (2012) *Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem/secagem com manta geotêxtil*. 137f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

SILVEIRA, C.; KURODA, E.K.; ABE, C.H.; YOSHIKI, L.; HIROOKA, E.Y. (2015) Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem/secagem. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 297-306. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522015020000082264>

VON SPERLING, M. (2005) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed. Belo Horizonte: Ed. Universidade Federal de Minas Gerais. 452 p.