

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ESTUDO DA CINÉTICA E DA DIFUSIVIDADE EFETIVA NA SECAGEM DE LODO DE ESGOTO

*Luan de Souza Leite'
Tsunao Matsumoto'

STUDY OF KINETICS AND EFFECTIVE DIFFUSIVITY ON SEWAGE SLUDGE DRYING

Recibido el 26 de marzo de 2017; Aceptado el 9 de mayo de 2018

Abstract

The management of sewage sludge is a complex and expensive activity. If poorly executed, it can compromise expected environmental and health benefits of the system. Since drying is an essential step in the process, its investigation is extremely important because it allows volume reduction and consequently covers the cost in subsequent steps. The aim of the present work was to investigate the drying of sludge obtained from a facultative pond by means of a low temperature drier using two methods of dehydration: thermal drying by infrared lamps and convective drying. In order to understand the process kinetics, three sludge thicknesses (10, 25 and 50 mm) were tested. The obtained data was adjusted to the Midelli model and it fit to satisfactory results ($r > 0.99$), despite the use of layers higher than those presented in the literature. The effective diffusivity range found was $5.170 - 7.13E-09$, $9.286 - 9.464E-09$ and $2.120 - 2.504E-08$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) for the thicknesses of 10, 25 and 50 mm, respectively.

Keywords: effective diffusivity, sludge drying, thermal dry.

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Campus de Ilha Solteira, Brasil 1.

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Brasil, Alameda Bahia, 550, CEP 15385-000, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. Email: eng.luanleite@gmail.com

Resumo

O gerenciamento do lodo de estações de tratamento de esgoto é uma atividade de grande complexidade e de alto custo, caso seja mal executado, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados. Como a secagem constitui uma etapa essencial no processo de gerenciamento de lodo, é de extrema importância sua investigação, pois permite redução de volume e custo dos procedimentos subsequentes. O presente trabalho buscou investigar a secagem de lodo, proveniente de lagoa de estabilização do tipo facultativa, por meio de secador de baixa temperatura que utiliza dois métodos distintos de desidratação: a secagem térmica por lâmpadas de infravermelho e secagem convectiva. Com intuito de compreender a cinética do processo, foram utilizadas três espessuras de lodo (10, 25 e 50 mm) nos ensaios. Verificou-se o ajuste do modelo de Midilli aos dados obtidos de forma satisfatória ($r > 0.99$), mesmo com espessuras maiores que as citadas na literatura. A faixa de difusividade efetiva encontrada foi de $5.170 - 7.13E-09$, $9.286 - 9.464E-09$ e $2.120 - 2.504E-08$ ($m^2 s^{-1}$) para as espessuras de 10, 25 e 50 mm, respectivamente, demonstrando assim, a influência da espessura na cinética e na taxa de secagem de lodo.

Palavras chave: difusividade efetiva, secagem de lodo, secagem térmica.

Introdução

As lagoas de estabilização se destacam entre os processos biológicos para tratamento de esgoto no Brasil e estão presente em aproximadamente 44% das 1513 cidades que tratam suas águas residuárias (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2008). Suas vantagens como baixo custo de implantação e operação e simplicidade operacional, aliado ao clima favorável, tornam-se este sistema ideal para cidades brasileiras de pequeno e médio porte que dispõe de área para sua construção.

Considerando que apenas 44.92 % do esgoto nacional gerado é tratado (Instituto Trata Brasil, 2018). As lagoas de estabilização possuem um futuro próspero, no sentido de atender parcela da demanda existente em que cabe o seu uso.

Segundo estudos, a produção de lodo durante a operação desse tipo de sistema é da ordem de 0.03 a 0.08 m^3 / hab.ano, cabendo a manutenção (retirada do lodo) quando a camada de sólido alcançar cerca de 1/3 da profundidade da lagoa, que geralmente representa a um período de 5 a 10 anos de operação (Von Sperling, 2007).

Gonçalves et al. (1999) ao estudar 36 ETES brasileiras que utilizam lagoas de estabilização como tratamento secundário, constatou que cerca de 90% nunca foram submetidas à remoção do lodo mesmo estando há mais de 15 anos em operação. Tal situação eleva a importância do estudo e do gerenciamento correto do lodo desse sistema, uma vez que o acúmulo excessivo de sólidos tem impacto direto no desempenho hidráulico e eficiência do tratamento (Coggins et al., 2017).

Para todas as opções de gerenciamento de lodo de esgoto, fica evidente que a secagem torna-se uma etapa fundamental, pois ela promove a redução do volume do lodo, diminuindo o custo das

etapas subsequentes como: manuseio, transporte e armazenamento do produto final (Bennamoun et al., 2013).

Os métodos de secagem de lodo tradicionais têm sido substituídos por tecnologias térmicas que permitem maiores reduções de peso e volume (Kliopova e Makarskiene, 2015). É possível obter teores de sólidos na faixa de 90 a 95 %, além da possibilidade de destruição dos organismos patogênicos, que se mantêm presentes nos lodos mesmo após os processos de estabilização (Tunçal e Uslu, 2014). Assim, constitui um processo de melhoria da qualidade do lodo ou do biossólido.

A secagem térmica por ser um processo que requer uma alta demanda de energia, torna-se necessária uma investigação da eficiência energética dos equipamentos utilizados visando um processo cada vez mais sustentável (Tańczuk et al., 2016). Tal motivação induz pesquisas com baixa temperatura (<100 °C), objetivando pesquisar o potencial custo efetivo (Nazari et al., 2017).

O fenômeno da secagem não pode ser generalizado para materiais biológicos, pois possuem características próprias e propriedades que podem sofrer importantes alterações durante a secagem (Ruiz et al., 2007). Pesquisas recentes mostram que durante a secagem térmica de lodo, podem ser observados fenômenos que modificam a dinâmica da secagem como o encolhimento, surgimento de fissuras e fendas e a formação de película que retarda a secagem (Bennamoun et al., 2014; Font et al., 2011; Tao et al., 2005a; Tao et al., 2005b).

A parte mais relevante da tecnologia de secagem é a modelagem matemática do processo, uma vez que fornecem base teórica para a concepção, projeto, construção e operação dos secadores. Porém, esse processo é complexo, uma vez que ocorrem simultaneamente processos de transferência de calor e massa. Considerando isso, as equações de camada fina se destacam por serem práticas além de, fornecerem bons resultados.

O termo secagem em camada fina geralmente significa secar em uma única camada de amostra. Por causa da sua estrutura pequena, a distribuição de temperatura pode ser facilmente assumida como uniforme (Erbay e Icier, 2010). Visando a distribuição uniforme da temperatura, pesquisas de secagem de lodo têm sido amplamente realizadas com espessuras delgadas (Celma et al., 2007; Danish et al., 2016; Deng et al., 2015; Idlimam et al., 2016; Yu et al., 2009; Zhou e Jin, 2016).

Visando a aplicabilidade no processo de secagem de lodo em grandes volumes, o ajuste dos resultados de secagem para modelos matemáticos simples e práticos, como as equações de camada fina, e sua simulação de dados de cinética podem auxiliar no projeto de secadores. Considerando o lado econômico, a compreensão do processo de secagem com grande espessura é interessante para reduzir os custos do processo de desidratação e melhorar o *design* de secadores.

Frente a intensa utilização das equações de camadas finas no processo de secagem de lodo, é cabível investigar a aplicabilidade destas equações na secagem com camadas mais espessas que as citadas em literatura. Este fato, aliado à investigação do uso de tecnologias alternativas de baixa temperatura para a secagem de lodo proveniente de lagoa de estabilização do tipo facultativa, pouco investigado e citado em literatura, foram os desafios do presente trabalho.

Assim, neste trabalho foi investigada a cinética da secagem de lodo proveniente de lagoa de estabilização, ao aplicar equações de camada fina para determinar a difusividade efetiva dos resultados encontrados experimentalmente para algumas espessuras investigadas.

Metodologia

O lodo estudado foi coletado da ETE de Ilha Solteira-SP, onde o tipo de tratamento empregado é o de lagoa facultativa primária. A ETE é composta por duas lagoas operando em paralelo com 445x105x1.50 m (comprimento x largura x profundidade) cada uma e o tempo de retenção hidráulica (TDH) estimado é de 24 dias (operando com 1.40 m de profundidade). De acordo com o projeto, as lagoas possuem 141,510 m³ de volume útil e vazão afluente média de 66 L s⁻¹. A coleta e o transporte de lodo foi realizado por um caminhão tipo “limpa fossa” e armazenado em dois reservatórios (Fortlev^{MR}) de 2,000 L cada um, que se encontram instalados próximos ao Laboratório de Saneamento da FEIS (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira) - UNESP.

No laboratório, o lodo foi peneirado para remoção do material grosseiro e posto para secar numa estufa agrícola, em bandejas cobertas com mantas geotêxtil drenante (bidim^{MR}). Após 3 dias de exposição no sol, a amostra atingiu cerca de 20 % de teor de sólidos, para assim, ser colocado para a secagem em secadores construídos para a finalidade desta pesquisa.

Aparato experimental

Para a realização dos ensaios, foram construídos dois secadores com as seguintes dimensões: 0.93x0.31x0.65 m (comprimento x largura x altura) em chapas de aço de 1.2 mm de espessura, usadas na vedação da estrutura, como mostrado na Figura 1. Os secadores foram revestidos internamente com materiais isolantes, como placas cerâmicas e manta térmica, ambos foram fixados com massa plástica. Os secadores eram idênticos e cada um continham 4 (quatro) lâmpadas de infravermelhos, de 220 V e 250 W (Ourolux^{MR}), encaixadas no topo, cerca de 0.30 m acima da base, além de um ventilador Akasa^{MR} (modelo F1825SM-CB) instalado rente a base, com as seguintes características: vazão de ar de 87.9 m³ h⁻¹, potência de 3.6 W e 0.18 m diâmetro da hélice. A temperatura média no interior do secador durante a secagem foi de 50 °C.

Para os ensaios em questão de secagem, térmica e convectiva, foram utilizadas 4 lâmpadas acesas (1,000 W) e o ventilador acionado.

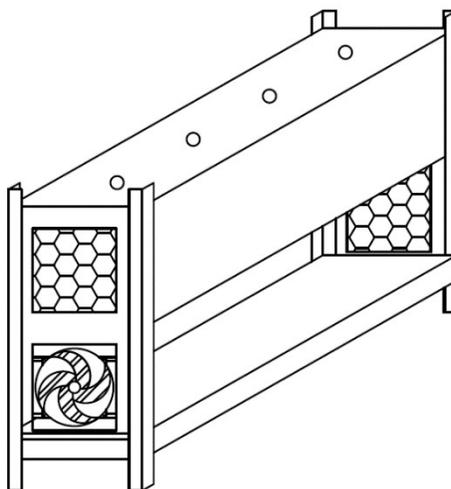


Figura 1. Aspectos construtivos da estufa

Procedimento experimental

Para a secagem, foram utilizadas duas bandejas em cada secador com dimensões de 33 x 21 x 5 cm (comprimento x largura x altura). O fundo foi perfurado igualmente com 77 furos de 0,5 cm de diâmetro, para possibilitar a ação da secagem convectiva. As bandejas foram colocadas em estruturas de suporte em locais pré-determinados para realização de todas as séries de ensaios e, antes de receberem o lodo, as bandejas foram forradas com manta geotêxtil drenante (bidim^{MR}) de 6.0 mm de espessura.

Para todos os ensaios, foram determinadas as umidades iniciais do lodo pelo método gravimétrico. As amostras possuíam umidade inicial diferente, dentro da faixa entre 2.23 e 4.70 kg água/ kg de sólido seco. As bandejas com o lodo foram pesadas de hora em hora. Os ensaios tiveram de 6 h para a espessura de 10 mm e de 12 h para 25 mm e 50 mm e foram realizadas de 3 a 5 repetições para cada combinação de espessura e tempo.

Análise dos dados

A umidade da amostra pode ser convertida em um adimensional de teor de água (MR), conforme a Equação (1).

$$MR = \frac{X_i - X_e}{X_o - X_e}$$

Equação (1)

Onde X_t, X_e, X_o representam os valores de umidades, em base seca (b.s), em diferentes tempos: em um dado tempo qualquer (X_t), no equilíbrio, quando alcançado o valor de umidade constante (X_e) e a umidade inicial da amostra (X_o).

Quando o valor da umidade de equilíbrio é muito pequeno em relação às outras umidades, a Equação (1) pode ser simplificada para a Equação (2).

$$MR = \frac{X_t}{X_o} \quad \text{Equação (2)}$$

O modelo proposto por Midilli (Midilli *et al.*, 2002) (Equação 3) tem sido utilizado por diversos autores (Celma *et al.*, 2007; Idlimam *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2017) com sucesso, para descrever a secagem, em camada fina, de diversos tipos de lodo por diferentes tipos de secagem.

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad \text{Equação (3)}$$

Para verificar o ajuste do modelo de Midilli aos dados experimentais encontrados foram utilizados três parâmetros estatísticos, sendo eles: coeficiente de correlação (r), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE). Esses parâmetros foram escolhidos por serem os mais usuais na literatura para verificar o ajuste de modelos matemáticos de camadas finas aos dados experimentais (Erbay e Icier, 2010). Os dois últimos podem ser calculados pelas Equações 4 e 5.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} + MR_{exp,i})^2}{N - n} \quad \text{Equação (4)}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} + MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde $MR_{exp,i}$ é o valor encontrado experimental, $MR_{pre,i}$ é o valor previsto pelo modelo, N é número de pontos e n é o número de constantes do modelo de Midilli.

A taxa de secagem (TS), utilizada para entender o comportamento da secagem, é definida como a quantidade de água evaporada durante o período estudado (g água/ g matéria seca.min), sendo determinado pela Equação 6.

$$TS = \frac{X_{t+\Delta t} - X_t}{\Delta t} \quad \text{Equação (6)}$$

Difusividade efetiva

A difusividade em sólidos, durante a secagem, é um processo complexo que deve envolver processos como: difusão molecular, fluxo de capilar, fluxo de Knudsen, fluxo hidrodinâmico ou difusão superficial (Erbay e Icier, 2010). Nas equações de camadas finas, todos esses fenômenos são combinados em um termo denominado de difusividade efetiva.

A solução analítica da segunda Lei de Fick, para placa infinita, pode descrever o transporte de umidade durante o processo de secagem, no período de decaimento da quantidade de água da amostra. Assumindo que a difusividade efetiva é constante e a temperatura uniforme, a Lei de Fick pode ser descrita pela Equação (7).

$$MR = \frac{X_t}{X_o} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad \text{Equação (7)}$$

Onde: t é o tempo de secagem, D_{eff} a difusividade de umidade efetiva e L a espessura da camada de lodo.

A Equação 7 pode ser linearizada aplicando logaritmo conforme a Equação (8).

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right) \quad \text{Equação (8)}$$

O coeficiente da difusão efetiva é obtido plotando os dados encontrados experimentalmente em termos de $\ln(MR)$ por tempo (s). Ao fazer o ajuste dos dados a uma equação de primeiro grau, o coeficiente angular da reta encontrada (k_1) proporciona encontrar facilmente D_{eff} , através da Equação (9).

$$k_1 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad \text{Equação (9)}$$

Resultados e discussões

Os resultados são apresentados para três séries de cada espessura e discutido para uma série de cada (Série 1 das três espessuras), uma vez que apresentam um comportamento similar às demais repetições. As eficiências médias de secagem encontradas são apresentadas na Figura 2.

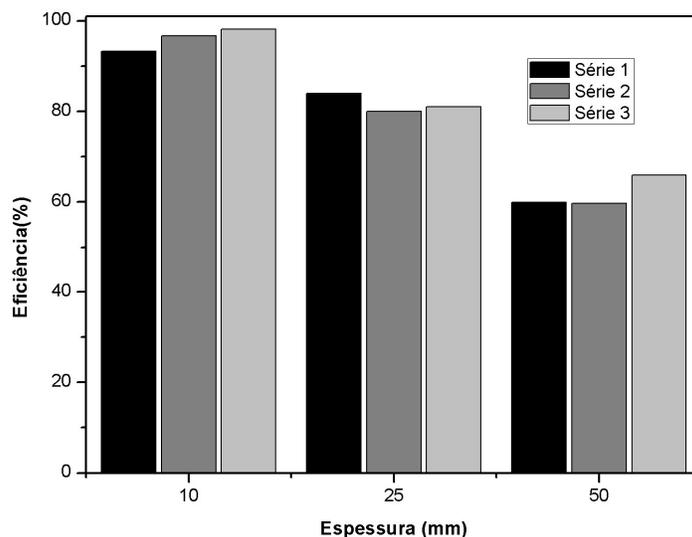


Figura 2. Eficiência do processo de secagem para as três espessuras

Cinética da secagem

A Figura 3 apresenta a variação do MR em função do tempo para espessuras estudadas, é perceptível a influência da espessura da camada do lodo a ser seca, uma vez que a espessura de 50 mm apresenta um menor decaimento em termos de umidade em relação às demais.

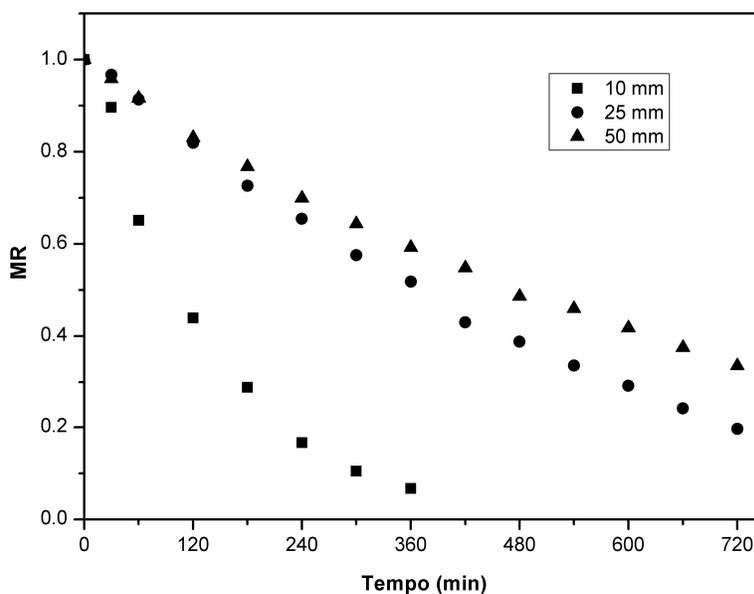


Figura 3. Variação do MR com o tempo de secagem para as três espessuras

A partir dos dados de MR encontrado, foi verificado seu ajuste ao modelo proposto por Midilli (Equação 3). Para a realização das regressões foi utilizado o suplemento SOLVER do Excel. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados do ajuste matemático à curva de secagem para as três espessuras

Espessura (mm)	Série	Variáveis do modelo	r	χ^2	RMSE
10	1	a = 1.01208; k = 0.00354; n = 1.14345; b = 6.21E-05	0.9978	1.01E-03	0.0225
	2	a = 1.00553; k = 0.00149; n = 1.30410; b = - 2.03E-05	0.9998	1.15E-04	0.0076
	3	a = 0.98887; k = 0.00243; n = 1.17764; b = - 2.10E-04	0.9990	5.17E-04	0.0161
25	1	a = 1.00406; k = 0.00106; n = 1.07958; b = -1.04E-04	0.9994	1.21E-04	0.0093
	2	a = 1.00168; k = 0.00113; n = 1.05063; b = -1.82E-04	0.9999	1.40E-05	0.0032
	3	a = 1.00307; k = 0.00194; n = 0.9327; b = -9.52E-05	0.9998	3.06E-05	0.0047
50	1	a = 1.00160; k = 0.00183; n = 0.94495; b = -8.40E-05	0.9998	3.10E-05	0.0047
	2	a = 1.00505; k = 0.00111; n = 1.01266; b = -2.11E-05	0.9997	2.86E-05	0.0045
	3	a = 1.00490; k = 0.00101; n = 1.01557; b = -5.83E-05	0.9998	1.65E-05	0.0034

O sucesso do ajuste é indicado por um alto valor de (r) e baixos valores de (χ^2) e (RMSE) (Thakor *et al.*, 1999). Assim, foi possível verificar pelos resultados, que mesmo trabalhando com espessuras maiores do que comumente encontradas na literatura (Celma *et al.*, 2007; Idlimam *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2017) o modelo de Mindilli também é válido para os resultados obtidos.

O comportamento da taxa de secagem (TS) é mostrado pela Figura. 4. A TS tem seu pico próximo de meia a uma hora de secagem, sendo que antes desse período ele apresenta ascendência (elevação da temperatura do lodo) e, após, uma tendência decrescente. O pico apresentado é de 0.03288, 0.0080 e 0.0032 g água/ g matéria seca.min para 10, 25 e 50 mm, respectivamente. Pode notar que as TS são inversamente proporcionais à espessura de lodo a ser seca, uma vez que a espessura de 10 mm apresenta os maiores valores e 50 mm os menores. A curva de 10 mm é mais acentuada, enquanto a de 25 mm e 50 mm oscilam em uma tendência descendente.

A secagem, praticamente em um único período decrescente e sem períodos constantes, é compatível com os resultados encontrados na literatura (Tao *et al.*, 2005b; Celma *et al.*, 2007; Yu *et al.*, 2009, Deng *et al.*, 2015; Idlimam *et al.*, 2016; Zhou e Jin, 2016).

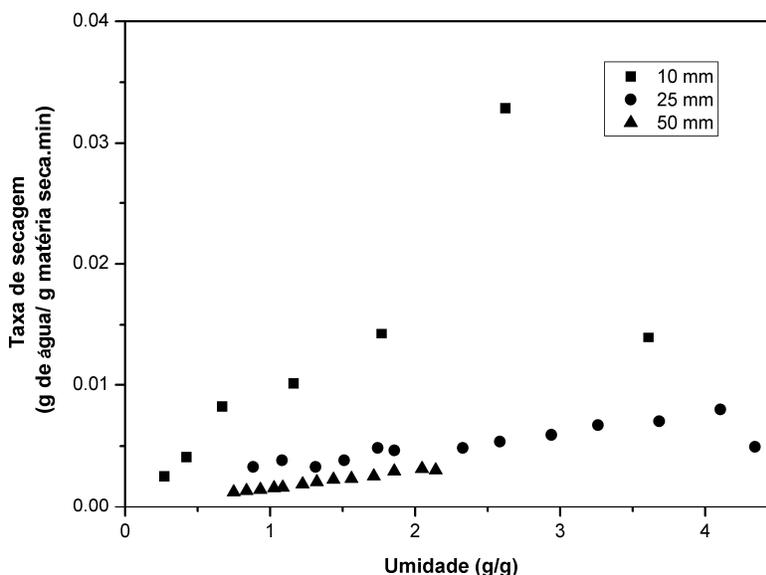


Figura 4. Variação da taxa de secagem pela umidade para as três espessuras.

Determinação da difusividade

O coeficiente de difusividade efetiva foi encontrado a partir da Figura 3. Com o auxílio do software Origin 8.0, foram determinados os coeficientes do ajuste linear aos dados e por consequência, houve a determinação da difusividade efetiva média. Os resultados do procedimento estão apresentados na Tabela 2 e Figura 5.

Tabela 2. Resultados da determinação da difusividade efetiva

Espessura (mm)	Série	ln (MR) = a*t + b		r	Deff (m ² /s)
		a	b		
10	1	-1.276E-04	0.06531	0.9989	5.170E-09
	2	-1.578E-04	0.22104	0.9916	6.386E-09
	3	-1.759E-04	0.30756	0.9752	7.130E-09
25	1	-3.666E-05	0.06576	0.9958	9.286E-09
	2	-3.666E-05	0.06576	0.9958	9.286E-09
	3	-3.736E-05	0.07461	0.9939	9.464E-09
50	1	-2.472E-05	0.00294	0.9994	2.504E-08
	2	-2.092E-05	0.01605	0.9995	2.120E-08
	3	-2.104E-05	0.010905	0.9996	2.131E-08

Pelos resultados, é possível verificar o aumento da difusividade efetiva com o aumento da espessura do lodo. Algo esperado, pois o coeficiente engloba todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água durante a secagem, sendo que em espessuras maiores haverá um maior fluxo de água sendo retirado durante o procedimento.

Zhou e Jin (2016) ao realizar a secagem térmica por infravermelho do lodo, com espessura de 2 mm e peso máximo de 110 g, encontraram as seguintes difusividade: $1.167E-09$ e $1.334 E-08 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ e $135 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. A faixa encontrada pelos autores se assemelha aos resultados da presente pesquisa, apesar de utilizar temperaturas e espessuras diferentes. Tal fato pode estar atrelado aos fenômenos complexos que podem ocorrer durante a secagem, tais como: encolhimento da amostra, desenvolvimento de fendilhamento e formação de película superficial que impede a secagem do interior da camada (Font *et al.*, 2011; Tao *et al.*, 2005a; Tao *et al.*, 2005b).

Para compreender o comportamento da difusividade ao longo da secagem, foi construído a Figura 6 utilizando a Equação 8. Pela evolução, é possível verificar numericamente que ao final da secagem, a difusão efetiva é semelhante à encontrada previamente, sendo que os últimos valores apresentados pelo gráfico são: $5.064E-09$, $9.538E-09$ e $2.562E-08 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para 10, 25 e 50 mm, respectivamente.

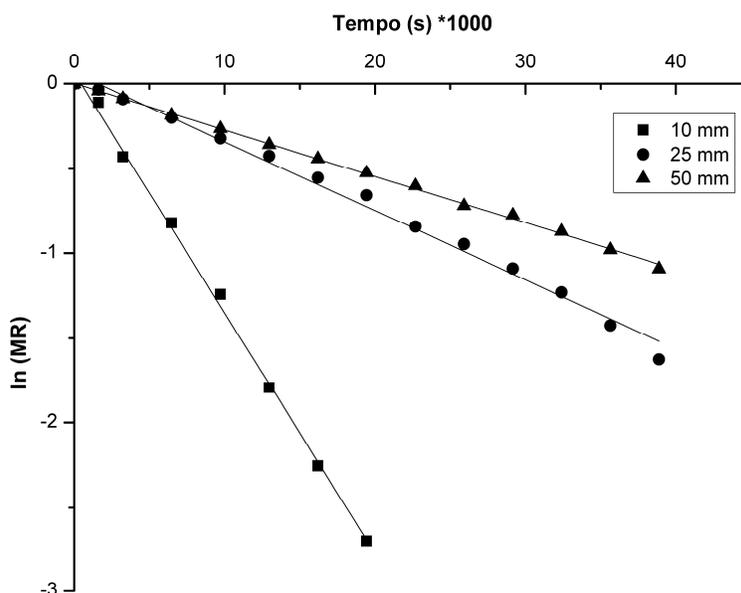


Figura 5. Ln(MR) versus tempo para as três espessuras

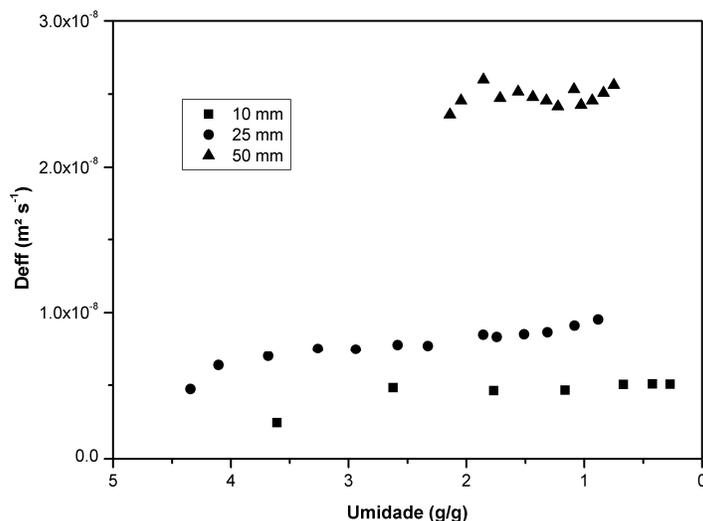


Figura 6. Variação da difusão de umidade efetiva durante a secagem para as três espessuras

Curva característica de secagem (CCS)

A CCS é uma ferramenta simples que possui como objetivo sintetizar os resultados da secagem, visando sua aplicabilidade (Idlimam *et al.*, 2016; Mghazli *et al.*, 2017).

Todos os resultados encontrados experimentalmente no presente trabalho são apresentados na Figura 7, na forma de Adimensional da Taxa de Secagem (ATS) e MR. O software Origin Pro 8.0 realizou o tratamento de todos os pontos experimentais. É possível notar uma pequena concentração de dados na região de MR <0.4, pois não foi possível alcançar maiores resultados para as espessuras de 25 e 50 mm, apesar do tempo significativo estudado (12 horas).

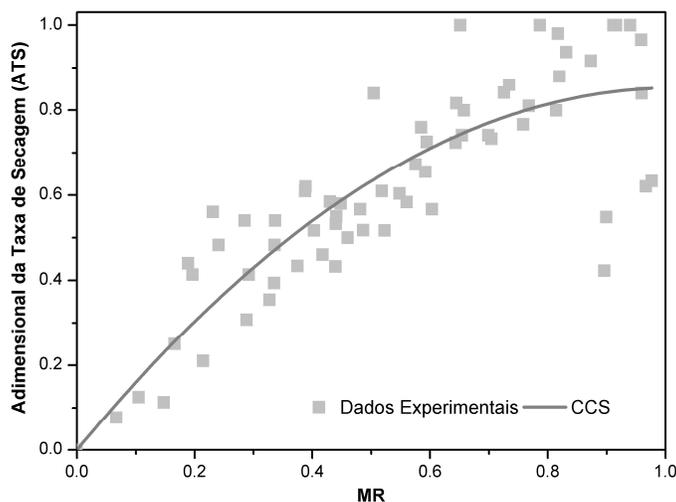


Figura 7. Curva Característica de secagem (CCS) do secador com as condições aplicadas

O melhor ajuste foi encontrado na forma de um polinômio de segundo grau, como mostrado na Equação 10, que apresentou ajuste de $R^2 = 0.96511$ e Erro padrão (Se) = 0.12872.

$$CCS = - 0.82835 MR^2 + 1.68081 MR$$

Equação (10)

Gerenciamento de lodo de lagoa de estabilização

Por ser um prazo bastante dilatado (superior a 5 anos), a operação de retirada do lodo de lagoas de estabilização é muitas vezes negligenciada. O acúmulo excessivo de lodo nesse sistema, reduz o volume útil para qual a lagoa foi dimensionada, alterando o TDH e conseqüentemente, reduz a eficiência prevista para o efluente. Segundo Coggins *et al.* (2017), a redução do tempo de detenção vai de 30% para uma distribuição uniforme de lodo dentro da lagoa à acima de 60% para fluxos “canalizados” pelo material sólido.

O gerenciamento do lodo é bastante complexo, as etapas que o compõe são dinâmicas e devem ser planejadas para um intervalo de tempo. A seleção dos métodos para remoção do lodo, secagem, higienização do lodo e destino final tem implicações importante sobre o custo global do sistema de tratamento, sendo necessário assim, um minucioso estudo ambiental e econômico prévio (Gonçalves *et al.*, 1999).

Conclusões

O presente trabalho buscou compreender a cinética de secagem de lodo de esgoto de lagoas facultativas, ao estudar seu comportamento em um secador de baixa temperatura utilizando a secagem térmica e convectiva. Foi verificado a aderência dos resultados ao modelo de camada fina Midilli ($r > 0.99$), mesmo utilizando espessuras maiores que as citadas na literatura para o modelo. Pelos resultados, foi possível verificar a influência da espessura nas taxas de secagem e na difusividade efetiva. A faixa de difusividade efetiva encontrada foi de $5.170 - 7.13E-09$, $9.286 - 9.464E-09$ e $2.120 - 2.504E-08$ ($m^2 s^{-1}$) para as espessuras de 10, 25 e 50 mm, respectivamente. Esses resultados suportam o uso do modelo de Midilli para descrever a secagem do lodo proveniente de lagoas facultativas, e por ser um modelo matemático simples e prático, torna-se uma ferramenta interessante para projetos de secadores.

Agradecimentos

À FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo auxílio à pesquisa (Proc. 2012/13889-3) e pela concessão de bolsa de Iniciação Científica (Proc. 2014/00291-8).

Referências bibliográficas

- Bennamoun, L., Arlabosse, P., Léonard, A., (2013) Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **28**, 29-43.
- Bennamoun L., Fraikin L., Léonard A. (2014) Modeling and simulation of heat and mass transfer during convective drying of wastewater sludge with introduction of shrinkage phenomena, *Drying Technology*, **32**(1), 13–22.
- Celma, A. R., Rojas, S., López, F., Montero, I., Miranda, T. (2007). Thin-layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction, *Journal of Food Engineering*, **80**(4), 1261-1271.
- Coggins, L.X., Ghisalberti, M., Ghadouani, A. (2017) Sludge accumulation and distribution impact the hydraulic performance in waste stabilisation ponds, *Water Research*, **110**, 354-365.
- Danish, M., Jing H., Pin Z., Ziyang L., Pansheng Q. (2016) A new drying kinetic model for sewage sludge drying in presence of CaO and NaClO, *Applied Thermal Engineering*, **106**, 141–152.
- Deng, S., Wang, X., Tan, H., Mikulčić, H., Li, Z., Cao, R., Wang, Z., Vujanović, M. (2015) Experimental and modeling study of the long cylindrical oily sludge drying process, *Applied Thermal Engineering*, **91**, 354-362.
- Erbay, Z., Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **50**(5), 441–464.
- Font, R., Gomez-Rico, M. F., Fullana, A. (2011) Skin effect in the heat and mass transfer model for sewage sludge drying, *Separation and Purification Technology*, **77**(1), 146–161.
- Gonçalves, R. F., Costa, A. N., Krohling, B., Rodrigues, C., Teles, C. R., Nascimento, C. G., Passamani, F. R. F., Oliveira, F. F., Lima, M. R. P. (1999) Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas, ABES, Rio de Janeiro, 79 pp.
- Idlimam, A., Lamharrar, A., Bougayr, E. H., Kouhila, M., Lakhali, E. K. (2016) Solar convective drying in thin layers and modeling of municipal waste at three temperatures, *Applied Thermal Engineering*, **108**, 41–47.
- Instituto Trata Brasil (2018). Situação Saneamento no Brasil. Consultado em 23 de março de 2018. <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento-no-brasil>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2008). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB. Consultado em 23 de março de 2018. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?=&t=o-que-e>
- Kliopova, I., Makarskiene, K. (2015) Improving material and energy recovery from the sewage sludge and biomass residues, *Waste Management*, **36**, 269–76.
- Mghazli, S., Ouhammou, M., Hidar, N., Lahnine, L., Idlimam, A., Mahrouz, M. (2017) Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves, *Renewable Energy*, **108**, 303-310.
- Midilli, A., Kucuk, H. (2003) Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, *Energy Conversion. Management*, **44**(7), 1111-1122.
- Nazari, L., Yuan, Z., Santoro, D., Sarathy, S., Ho, D., Batstone, D., Xu, C., Ray, M.B. (2017) Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: Process optimization and effects on solubilization and anaerobic degradation, *Water Research*, **113**, 111-123
- Ruiz, T., Wisniewski, C., Kaosol, T., Persin, F. (2007) Influence of organic content in dewatering and shrinkage of urban residual sludge under controlled atmospheric drying, *Process Safety and Environmental Protection*, **85**(1), 104-110.
- Sun, G.Y., Chen, M.Q., Huang, Y.W. (2017) Evaluation on the air-borne ultrasound-assisted hot air convection thin-layer drying performance of municipal sewage sludge, *Ultrasonics Sonochemistry*, **34**, 588-599.
- Tańczuk, M., Kostowski, W., Karaś, M. (2016) Applying waste heat recovery system in a sewage sludge dryer – A technical and economic optimization, *Energy Conversion and Management*, **125**, 121-132.
- Tao, T., Peng, X.F., Lee, D.J. (2005a) Thermal drying of wastewater sludge: change in drying area owing to volume shrinkage and crack development, *Drying Technology*, **23**(3), 669-682.
- Tao, T., Peng, X.F., Lee, D.J. (2005b) Structure of crack in thermally dried sludge cake. *Drying Technology*, **23**(7), 1555-1568.

- Thakor, N.J., Sokhansanj, S., Sosulski, F.W., Yannacopoulos, S. (1999) Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying, *Journal of Food Engineering*, **40**(1), 153-160.
- Tunçal, T., Uslu, O. (2014) A Review of Dehydration of Various Industrial Sludges, *Drying Technology*, **32**(14), 1642-1654.
- Von Sperling, M. (2007). Waste Stabilisation Ponds. International Water Association (IWA) Publishing, U.K., 175 pp.
- Yu, W., Hu, N., Li, P., Hu, Y., Xu, Q., Wang, Q., Yang, J., Yang, G. (2009) Mathematical modeling of drying characteristics of sewage sludge. *Asia-Pacific Power and Energy Eng. Conf.*, Wuhan, China.
- Zhou, Y., Jin, Y. (2016) Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of dewatered municipal sewage sludge (DWMSS), *Procedia Environ. Science*, **31**, 758-766.