

Avaliação da secagem térmica de lodo de esgoto sanitário

Evaluation of the thermal drying of sanitary sludge

- **Data de entrada:**
06/01/2018
- **Data de aprovação:**
22/05/2018

Alexandre Almeida Júnior* | Valderi Duarte Leite | Fernando Fernandes Vieira |
Aldre Jorge Morais Barros | Ketyla Karla Rodrigues do Nascimento

DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.045>

Resumo

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento da secagem convectiva de lodo de esgoto sanitário nos níveis de temperaturas de 60, 70, 80 e 90 °C, e procurar definir modelos matemáticos que façam a predição do processo de secagem. O lodo de esgoto sanitário foi coletado em reator UASB, e o processo de secagem realizado em estufa convectiva utilizando-se uma massa de lodo de 500g, para realização dos ensaios em triplicatas e nos quatro níveis diferentes de temperatura. O percentual de umidade da massa de lodo de esgoto sanitário *in natura* era de 92,5%. Dentre os modelos matemáticos estudados, os de Midilli e de Page apresentaram melhores parâmetros estatísticos aplicados, apresentando possibilidade de aplicação para explicação do processo de secagem térmica de lodo de esgoto sanitário em escala de bancada. Sugere-se 90°C como a temperatura com maior capacidade de aplicação neste processo de secagem, haja vista reduzir o tempo de secagem e propiciar relação custo/benefício mais favorável.

Palavras-chave: Lodo de esgoto sanitário. Secagem Térmica. Modelos matemáticos.

Abstract

The objective of this work was to analyze the behavior of convective drying of sanitary sewage sludge at temperatures of 60, 70, 80 and 90 °C, and to define mathematics models that do prediction of the drying process. The sanitary sewage sludge was collected in a UASB reactor and the process of drying was carried out in a convective oven using a sludge mass of 500 g for triplicates and at four different temperature levels. The percentage of moisture content of the sewage sludge in natura was 92.5%. Among the mathematical models studied, those of Midilli and Page presented better statistical parameters applied, presenting possibility of application of the thermal drying process of sanitary sewage sludge on bench scale. To suggest 90°C as the temperature with better capacity of application in this process of drying, once that reduces the time of drying and propitiates relation cost / benefit more favourable.

Keywords: Sanitary sewage sludge. Thermal drying. Mathematics models.

Alexandre Almeida Júnior – Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Graduado em Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba. Técnico de Laboratório na área sucroalcooleira na Universidade Federal da Paraíba.

Valderi Duarte Leite – Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba.

Fernando Fernandes Vieira – Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba.

Aldre Jorge Morais Barros – Doutor em Química Inorgânica pela Universidade Federal da Paraíba. Professor associado da Unidade Acadêmica de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal da Campina Grande.

Ketyla Karla Rodrigues do Nascimento – Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Graduada em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba.

***Endereço para correspondência:** Rua Rosa Farias Dantas, Nº 281 Casa 06, CEP: 58415-448. Cruzeiro – Campina Grande, PB – Brasil. Telefone: (83) 98822-0750. E-mail: alexandre_junior.02@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A composição física e química de lodo de esgoto sanitário depende do seu processo de tratamento e da fonte geradora, sendo constituída por uma mistura complexa de material sólido de origem orgânica e inorgânica, podendo conter significativas quantidades de substâncias tóxicas, tais como metais pesados, substâncias orgânicas e microrganismos patogênicos (JINDAROM et al., 2007).

De maneira geral, lodo de esgoto sanitário contém percentual de sólidos totais variando de 5 a 9% (% p/p), justificando a necessidade de desagumamento, haja vista propiciar a redução de custos de transporte e tratamento (LEITE, INGUNZA e ANDREOLI, 2006). Dos sólidos contidos, 70 a 80% são matéria orgânica, incluindo óleos e graxas, mas é possível haver presença significativa de metais pesados e de diversos outros tipos de compostos químicos. A alta fração de material orgânico biodegradável, portanto, potencialmente putrescível, contida no lodo confere-lhe a característica de instabilidade biológica (ANDREOLI, SPERLING e FERNANDES, 2001).

O principal objetivo do tratamento do lodo de esgoto é gerar um produto estável e com menor volume para facilitar seu manuseio e, conseqüentemente, reduzir os custos nos processos subsequentes (PEDROZA et al., 2010). Diante da necessidade de preservação ambiental ao se destinar corretamente os resíduos resultantes do tratamento de esgoto, torna-se imperativo o uso de formas economicamente viáveis e ecologicamente seguras para tratamento de lodo. Neste sentido, destaca-se a secagem térmica, processo que promove a otimização de rotinas e minimização de custos operacionais inerentes ao gerenciamento de lodo. Isso porque promove simultaneamente a redução do volume e a higienização do material (POSSETTI et al., 2012).

No processo de secagem térmica, é possível e necessário determinar a velocidade de perda de umidade em função do tempo de secagem, aplicando-se princípios e fundamentos cinéticos da secagem, os quais podem explicar o comportamento do processo, sendo representado pelas curvas de secagem e de taxa de secagem (MENEZES et al., 2013). O comportamento da curva de secagem de um resíduo úmido mediante um fluxo de ar a uma determinada temperatura é sempre o mesmo, segundo Foust et al. (1980). Já a curva da taxa de secagem é obtida derivando-se os dados de umidade em função do tempo de secagem e descrita por modelos matemáticos (MENEZES et al., 2013).

Vários modelos matemáticos são descritos na literatura para descrever o processo de secagem térmica. Grande parte desses modelos são baseados na teoria de difusão, e assumem que a transferência de calor e massa é restrita à camada delgada na superfície das partículas.

Os modelos matemáticos são usados para prever o processo de secagem, visando otimizar, projetar e controlar os sistemas de secagem. Devido à importância de se entender melhor a migração de umidade em sólidos, o desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever o processo de secagem tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores por várias décadas. Esses modelos podem ser divididos em: modelos empíricos e semi-empíricos, modelos difusivos e modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis (FARIAS, 2011).

Lewis (1921), por exemplo, sugeriu um modelo semi-empírico, análogo à Lei de Newton do resfriamento em sua forma integral. Esse modelo também é conhecido como “Lei exponencial”, conforme a Equação 1.

$$u = e^{(-k*t)} \quad (1)$$

Page (1949) propôs uma modificação no modelo proposto por Lewis (1921), que envolveu a adição de um termo exponencial na variável tempo, gerando um novo modelo exponencial mais preciso para descrever a cinética de secagem, sendo conhecido como Equação de Page para camada fina, apresentado pela Equação 2.

$$u = \exp(-Kt^V) \quad (2)$$

Henderson e Pabis (1961), a partir de estudos com a secagem de sementes de trigo, propuseram um modelo matemático que foi desenvolvido considerando os efeitos de velocidade, temperatura, razão de mistura do ar, tamanho médio das sementes, e da taxa de redução de volume no decorrer da secagem. Este modelo encontra-se representado na equação 3.

$$u = A \exp(-Kt) \quad (3)$$

No caso de equações empíricas, destaca-se o modelo de Wang & Singh (1978) e o modelo Logarítmico, sendo descritos pelas Equações 4 e 5, respectivamente.

$$u = 1 + Et + Ft^2 \quad (4)$$

$$u = B \exp(-Kt) + c \quad (5)$$

Segundo Dandamrongrak et al. (2002), o modelo de Dois Termos (1974) foi criado na tentativa de melhorar a precisão dos modelos já existentes, especialmente no período final de secagem. Este modelo pode ser aplicado a qualquer tipo de geometria de partícula e condições de contorno, considerando-se que a difusividade é constante. O modelo de Dois Termos (1974) encontra-se representado pela Equação 6.

$$u = C \exp(-K_0 t) + D \exp(-K_1 t) \quad (6)$$

Midilli et al. (2002) observaram que expressões semi-empíricas simples podem descrever adequadamente a cinética de secagem quando a resistência externa para a transferência de calor e massa é eliminada ou minimizada. Os autores propuseram um modelo semi-empírico para descrever a secagem em camada delgada, sendo este modelo comparado com diversos modelos comumente usados, como: Lewis (1921), Page (1949), Henderson e Pabis (1961), logarítmico, entre outros. Os modelos foram ajustados a dados cinéticos de secagem de cogumelo, pólen e pistache, e o modelo proposto pelos autores obteve um resultado superior aos demais modelos estudados. O modelo proposto pelos autores é apresentado pela Equação 7.

$$u = A \exp(-Kt^n) + Bt \quad (7)$$

O processo de secagem térmica pode ser entendido como a remoção de água e de determinadas substâncias voláteis de um material seja ele sólido ou líquido, pela existência de uma diferença de gradientes de umidade e de temperatura entre o meio do qual a umidade é removida para o meio para qual é transferida (LOBATO, 2011). No processo de secagem térmica ocorre a redução da umidade do lodo por meio da perda de água por evaporação e da destruição de microrganismos (ANDREOLI et al., 2006).

Durante a secagem térmica convectiva devem ocorrer dois processos simultâneos; o primeiro consiste na evaporação da umidade da parte superficial do lodo, e o segundo consiste na transferência da umidade do lodo para sua superfície e sua consequente evaporação pelo primeiro processo (MUJUMDAR, 2006). Contudo, a transferência de umidade não é constante até o final da secagem, e a taxa de secagem pode variar de acordo com o tipo de lodo e de secador.

Uma vez que a amostra é colocada em contato com ar quente durante o processo de secagem térmica, ocorre uma transferência do calor do ar ao produto sob o efeito do gradiente de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença entre as pressões parciais de vapor d'água existentes entre o ar e a superfície do produto determinam uma transferência de matéria (massa) para o ar. Esta última se faz na forma de vapor de água. Uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água. A evolução dessas transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos (PARK et al., 2014):

- Período 0: O calor que entra no processo de secagem em excesso acarreta uma elevação da temperatura do produto, ocorrendo um aumento de pressão e da velocidade de secagem. Esse fenômeno continua até que a transferência de calor fique equivalente à transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior àquela do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio. A duração desse período é insignificante em relação ao período total de secagem;
- Período 1: O período de velocidade (taxa) constante de secagem. Durante esse período, como no anterior, a quantidade de água disponível dentro da amostra é elevada. A água evapora-se como água livre. A pressão de vapor de água na superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do material submetido a secagem, por sua vez, é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam. A velocidade de secagem é, por conseguinte, constante;
- Período 2: O período de velocidade (taxa) decrescente de secagem. No momento em que a

água começa a ser inferior na superfície, a velocidade de secagem diminui.

As curvas de secagem variam com a espécie, variedade, condições ambientais, entre outros fatores. Nesse sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem (CORRÊA et al., 2007). Os modelos semi-empíricos se baseiam na analogia com a Lei de Newton para o resfriamento, aplicada à transferência de massa, enquanto os modelos empíricos apresentam uma relação entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem e consideram como mecanismo principal a difusão baseada na segunda Lei de Fick (MENEZES et al., 2013).

De acordo com Andreoli, Sperling e Fernandes (2001), é recomendável o desaguamento dos lodos entre 15 a 30% de teor de sólidos antes de aplicar esse processo. Esses autores relatam que o processo de secagem térmica deve ser realizado com fonte de calor de origem externa como biogás, gás natural, óleo combustível, entre outras, podendo-se obter tortas com teores de sólidos de 90-95%.

Aksoy, Kurt e Sanin (2015) realizaram experimentos utilizando a energia solar, fornecendo calor por meio de painéis fotovoltaicos a um sistema de leito de secagem, onde por meio do calor fornecido ao lodo conseguiram atingir o teor de sólidos totais de 70%, apontando a necessidade de mais fornecimento de energia para obterem um percentual mais elevado.

Entre os benefícios da utilização da secagem térmica destacam-se a redução significativa do peso e volume do lodo, com consequente redução dos custos de transporte e disposição final desse material, além da destruição de organismos patogênicos presentes no lodo (FRANÇA JUNIOR, 2008). A principal desvantagem da secagem térmica são seus elevados custos de investimento e operacionais, especialmente no que concerne ao consumo de energia elétrica.

Neste artigo foi analisado o comportamento da secagem convectiva do lodo de esgoto sanitário em quatro diferentes temperaturas. Além disso, foi observado qual dos modelos matemáticos apresentados na literatura melhor representa o comportamento da secagem térmica deste resíduo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa experimental foi realizada nas dependências físicas da Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários (EXTRABES) da Universidade Estadual da Paraíba, localizada no bairro do Tambor, na cidade de Campina Grande-PB (latitude: 7° 13' 50"; longitude: 35° 52' 52", a 551 m acima do nível do mar).

O Lodo de Esgoto Sanitário, estudado neste trabalho, foi coletado em um reator UASB, o qual se encontra instalado e monitorado na EXTRABES. Foram coletados 10 litros de lodo de esgoto sanitário de uma única vez para a realização de todos os ensaios experimentais. A secagem do lodo de esgoto sanitário foi realizada em estufa convectiva (QUIMIS Modelo Q-314M222) nas seguintes temperaturas: 60, 70, 80 e 90 °C, com variação de $\pm 2,5^\circ\text{C}$. Todos os ensaios foram realizados com massa de lodo sanitário *in natura* de 500g. Pesava-se a bandeja com amostra em balança digital (MARTE Modelo BL3200H – precisão: 0,01 g) conforme os intervalos descritos na Tabela 1:

Tabela 1 - Intervalos de pesagem da amostra de lodo de esgoto sanitário.

Tempo de monitoramento (t - min)	Intervalo de pesagem(min)
t < 60	A cada 5 min
60 < t < 120	A cada 10 min
120 < t < 180	A cada 15 min
t > 180	A cada 30 min

Com esses dados coletados, foram construídas as curvas de secagem e de taxa de secagem. A primeira foi obtida a partir do gráfico de umidade adimensional em função do tempo. A umidade em base seca em cada instante foi obtida a partir da Equação 8.

$$X(b.s) = \frac{M_{úmida} - M_{seca}}{M_{seca}} \quad (8)$$

Em que: X (b.s) é a razão entre a massa de água presente na amostra ($M_{úmida} - M_{seca}$) e a massa de sólido isenta desta umidade (M_{seca}), em um determinado tempo. $M_{úmida}$ é a massa da amostra (lodo *in natura*) antes de submetida a secagem na estufa (g) e M_{seca} é a massa seca obtida em estufa (g) após secagem (lodo seco).

Segundo McCabe et al. (1993), para estudar a operação de secagem, pode-se obter a curva que relaciona a variação adimensional de umidade X_r (que pode ser calculada pela Equação 9) em função do tempo, em que X_0 é o teor de umidade inicial.

$$X_r = \frac{X(b.s) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (9)$$

Para a determinação do teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) utilizou-se a razão entre a massa úmida ($M_{úmida}$) e a massa seca (M_{seca}). A X_{eq} considerada para o cálculo do teor de umidade do produto (X_r) foi estimada quando a razão $M_{úmida}/M_{seca}$ tornava-se constante. Desta forma, para cada condição de secagem a amostra possuía um teor de umidade de equilíbrio equivalente.

As taxas de secagem foram obtidas a partir do diferencial ponto a ponto, apresentado pela Equação 10.

$$\frac{\Delta X_i}{\Delta t_i} = \frac{X_{i-1} - X_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (10)$$

No qual: X_{t-1} é o conteúdo de umidade em b.s. (g/g) da medida anterior; X_t , conteúdo de umidade em b.s. (g/g) atual; t_t , tempo atual (min); e, t_{t-1} , tempo da medida anterior (min).

As características químicas do lodo de esgoto sanitário foram determinadas de acordo

com as recomendações do *Standard Methods for Examination of the Water and Wastewater* (APHA, 2012), exceto para carbono orgânico total (COT), adotando-se os métodos indicados na Tabela 2.

Tabela 2: Métodos utilizados para caracterização química do lodo de esgoto sanitário proveniente de reator UASB.

Parâmetros	Métodos Utilizados
Umidade (%)	Gravimétrico
Sólidos totais (ST)	Gravimétrico
Sólidos totais voláteis (STV)	Gravimétrico
Carbono Orgânico Total -COT	Kiehl (1998)
Nitrogênio total - NTK	Método semi-micro Kjeldhal com digestão
Fósforo total -PT	Espectrofotométrico com ácido ascórbico e digestão em persulfato de amônio

Objetivando-se verificar se há ou não diferença significativa dos resultados dos nutrientes (COT, NTK e fósforo total), quando o lodo de esgoto sanitário foi submetido a secagem nas temperaturas estudadas, foi realizada a comparação das médias dos parâmetros por meio do teste de Tukey.

A cinética de secagem convectiva foi caracterizada a partir dos dados do adimensional de

umidade (u) em função do tempo do processo. Os modelos descritos na Tabela 3 foram utilizados no ajuste aos dados experimentais. Os mesmos foram escolhidos por serem difusivos e devido à maioria destes serem propostos para a modelagem matemática da secagem de produtos orgânicos, especialmente grãos como milho, arroz e soja.

Tabela 3 – Modelos matemáticos para avaliação da cinética de secagem do lodo de esgoto sanitário.

Modelo	Equação	Referências
Henderson e Pabis	$u = A \exp(-Kt)$	Henderson e Pabis (1961)
Exponencial Simples	$u = \exp(-Kt)$	Abe e Afzal (1997)
Page	$u = \exp(-Kt^v)$	Karathanos e Belessiotis (1999)
Exponencial dois termos	$u = C \exp(-K_0t) + D \exp(-K_1t)$	Ozdemir e Devres (1999)
Logaritmo	$u = B \exp(-Kt) + c$	Yaldiz et al. (2001)
Midilli	$u = A \exp(-Kt^n) + Bt$	Midilli et al. (2002)

u – Umidade adimensional;
 t – tempo de secagem, min;
 k, k_0, k_1 – constantes de secagem, e
 v, A, B, C, D, E, F – coeficientes dos modelos.

Os parâmetros dos modelos cinéticos e de generalização foram obtidos por regressão não-linear (Gauss-Newton), critério de convergência de 0,00001, com o auxílio do software Minitab. Os critérios de escolha do melhor modelo para os modelos cinéticos foram determinados com base nos maiores valores do coeficiente de determinação (R2), da análise de variância (Teste F), e no menor valor da raiz do erro médio (RM), conforme apresentado nas Equações 11 e 12.

$$RM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{exp,i} - X_{pred,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$TESTE F = \frac{MQ_R}{MQ_r} = \frac{\frac{SQ_R}{GL_R}}{\frac{SQ_r}{GL_r}} \quad (12)$$

Onde:

$$SQ_R = \sum_{i=1}^N (X_{pred,i} - \bar{X}_{exp,i})^2$$

$$SQ_r = \sum_{i=1}^N (X_{exp,i} - X_{pred,i})^2$$

Em que: $X_{exp,i}$ é a umidade obtida experimentalmente, $X_{pred,i}$ a umidade predita pelo modelo, $\bar{X}_{exp,i}$ é a média dos valores experimentais da umidade adimensional, GL_r são os graus de liberdade

da regressão, GL_r são os graus de liberdade dos resíduos e N, o número de experimentos.

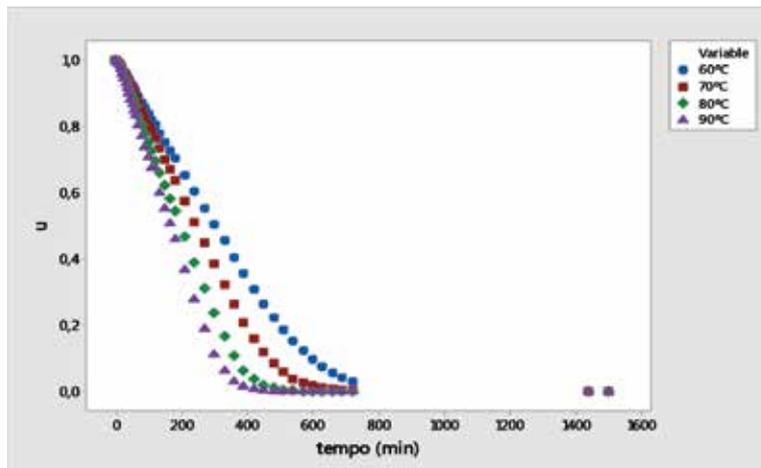
Por fim, a partir dos tempos médios de secagem, em cada temperatura estudada, foi estimado o custo médio de secagem deste material utilizando-se de estimativas de consumo médio em kwh da estufa utilizada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A média de umidade inicial em base seca do lodo de esgoto sanitário foi de 12,15gH₂O/g sólidos secos. A umidade do resíduo, em base úmida, representa 92,51% de sua massa total.

Na Figura 1 são apresentadas as curvas de secagem obtidas experimentalmente nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C. As curvas foram plotadas utilizando-se os dados da umidade adimensional em função do tempo de secagem. As curvas apresentam um comportamento típico da secagem, em que o aumento de temperatura causa uma diminuição no tempo de secagem. Observa-se nitidamente que na temperatura de 90°C obtém-se a condição de equilíbrio de umidade em menor tempo de secagem. Observa-se que o aumento de 30°C na temperatura de secagem reduz o tempo médio de secagem para obtenção da umidade de equilíbrio em cerca de 300 minutos.

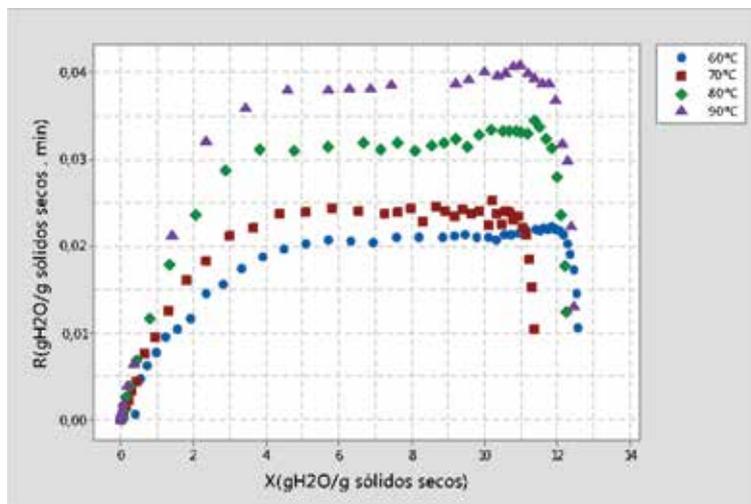
Figura 1 – Curvas de secagem para o lodo de esgoto sanitário nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C ±2,5°C



No início da secagem, as amostras apresentaram perdas similares na umidade adimensional. Porém, depois de aproximadamente 240 minutos de secagem, as amostras passaram a apresentar algumas

diferenças no comportamento nas diferentes temperaturas estudadas. Resultados semelhantes foram obtidos por Scalcon et al. (2015) no estudo da secagem de lodo proveniente de biodigestão anaeróbia.

Figura 2 – Curvas de taxa de secagem para o lodo de esgoto sanitário nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C±2,5°C



Analisando os comportamentos das curvas de taxa de secagem apresentadas na Figura 2, nota-se que as mesmas apresentaram três períodos bem definidos do processo de secagem. O período inicial refere-se ao processo de acondicio-

namento do material ao processo de secagem. Neste período inicial ocorre a evaporação da umidade superficial presente no lodo de esgoto sanitário. Essa umidade é mais fácil de ser removida, e por esse motivo tem-se um período inicial

de taxa de secagem crescente. Após o período de acondicionamento e estabilização do lodo às condições de secagem, nota-se a formação de um período de taxa constante, onde o material a ser seco não tem influência direta sobre a taxa de secagem, e a partir dessa etapa inicia-se a transferência da umidade presente nos interstícios dos flocos de lodo para a camada superficial para posterior evaporação. Por fim, a taxa de secagem tem a tendência a zero até atingir a umidade de equilíbrio do lodo de esgoto sanitário.

Notam-se semelhanças entre as quatro etapas principais de secagem caracterizadas por Deng et al. (2009) e Vaxelaire et al. (2004) e as curvas de taxa de secagem obtidas para o lodo de esgoto sanitário neste trabalho. No entanto, neste trabalho conseguiu-se visualizar apenas uma

etapa decrescente, e não duas conforme relatam Deng et al. (2009) e Vaxelaire et al. (2004).

De acordo com a Resolução CONAMA 375 de 29 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006), para ser considerado estável para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto deve apresentar relação entre sólidos voláteis e sólidos totais inferior a 0,70, e isto foi conseguido para todas as amostras analisadas, inclusive após secagem.

Os dados que estão apresentados na Tabela 4 para as temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C foram obtidos após obtenção da umidade de equilíbrio. Os dados obtidos são para apresentar as características do material que foi submetido a secagem, uma vez que uma variação nessas características, principalmente no teor de umidade, em outros estudos posteriores, pode causar alterações na curva de secagem deste tipo de material.

Tabela 4 – Dados da caracterização química do lodo de esgoto sanitário in natura e após secagem.

Parâmetros	Lodo in natura	60°C	70°C	80°C	90°C
Umidade (%)	92,50	9,21	8,98	9,03	8,88
ST (g.L ⁻¹)	75,0	7,90	10,2	9,7	11,2
STV (g.L ⁻¹)	27,9	2,98	3,75	3,56	4,12
STF (g.L ⁻¹)	47,1	4,92	6,45	6,14	7,08
NTK (g.L ⁻¹)	2,63	0,215	0,210	0,213	0,212
COT (g.L ⁻¹)	15,5	1,65	2,08	1,98	2,29
COD (g.L ⁻¹)	0,246	0,196	0,208	0,193	0,199
PT (g.L ⁻¹)	0,594	0,399	0,502	0,346	0,469
C/N	5,89	7,67	9,90	9,30	10,80
C/P	26,18	4,13	4,14	5,72	4,88

Analisando os dados que estão sendo apresentados na Tabela 4, observa-se que a relação gNTK/gST apresentou redução após a amostra ter sido submetida a secagem. No lodo “in natura”, essa relação foi de 0,035g NTK/gST; já na temperatura de secagem de 90°C, essa relação foi de 0,019gNTK/gST, ou seja, tem-se uma redução de 45,71%. A relação gCOT/ gST do lodo “in natura”

e após a secagem permaneceu constante no valor de 0,21 gCOT/ gST.

Nas Tabelas 5, 6 e 7 estão sendo apresentados os dados referentes ao teste de Tukey, o qual foi realizado para avaliar se entre as temperaturas estudadas houve diferença significativa nas concentrações de COT, NTK e Ptotal.

Tabela 5 – Teste de Tukey para os dados de COT nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C

Temperatura (°C)	N	Média	Grupo
60	3	1,65	A
70	3	2,08	A
80	3	1,98	A
90	3	2,29	A

Tabela 6 – Teste de Tukey para os dados de NTK nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C

Temperatura (°C)	N	Média	Grupo
60	3	0,214	A
70	3	0,210	A
80	3	0,213	A
90	3	0,212	A

Tabela 7 – Teste de Tukey para os dados de PT nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C

Temperatura (°C)	N	Média	Grupo
60	3	0,399	A
70	3	0,502	A
80	3	0,346	A
90	3	0,469	A

Com base nos resultados obtidos, após submeter os dados de COT, NTK e Fósforo total ao teste de Tukey, nas Tabelas 5, 6 e 7, observou-se que não houve diferença significativa no valor de cada nutriente quando submetida às diferentes temperaturas estudadas. Constatou-se que não houve variações significativas nos valores médios dos nutrientes presentes no lodo de esgoto

sanitário após ser submetido ao processo de secagem térmica.

Nas Figuras 3 a 10 são apresentados os ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais obtidos no processo de secagem do lodo de esgoto sanitário nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C.

Figura 3 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page e exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 60°C

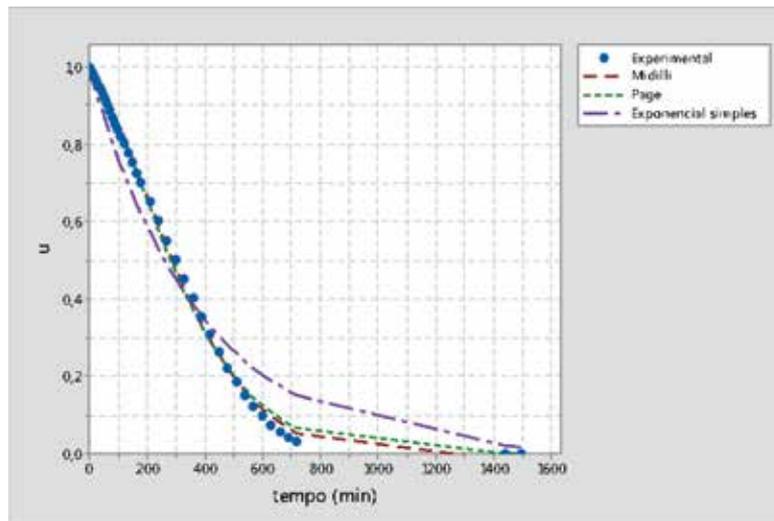


Figura 4 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis, logaritmo e exponencial de dois termos aos dados de secagem na temperatura de 60°C

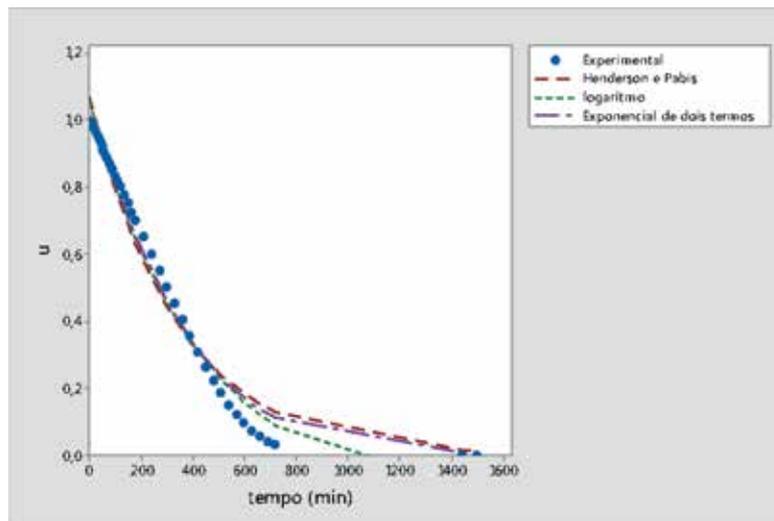


Figura 5 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page, exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 70°C

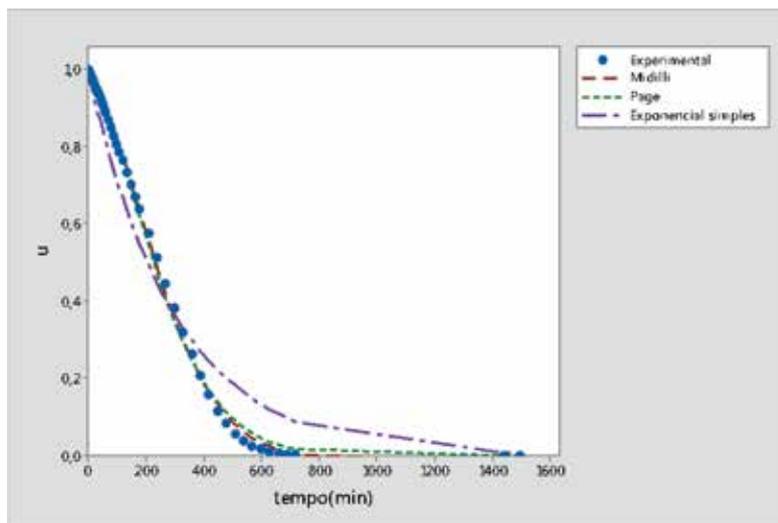


Figura 6 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis, logaritmo e exponencial de dois termos aos dados de secagem na temperatura de 70°C

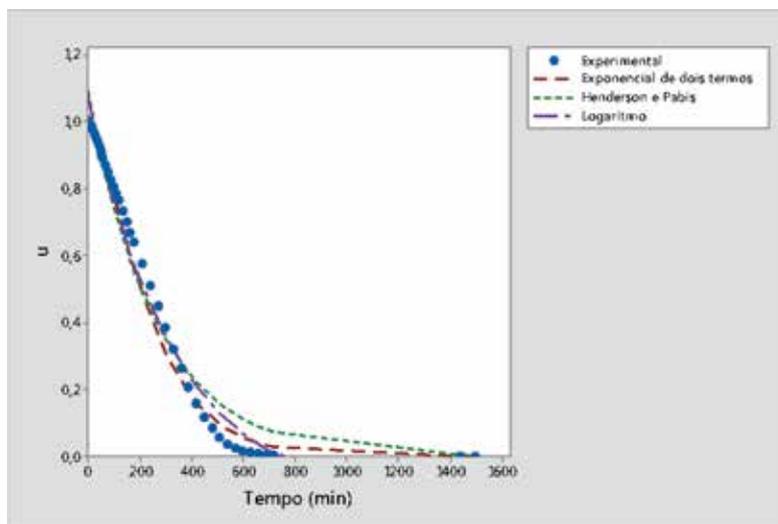


Figura 7 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page, exponencial de dois termos e exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 80°C

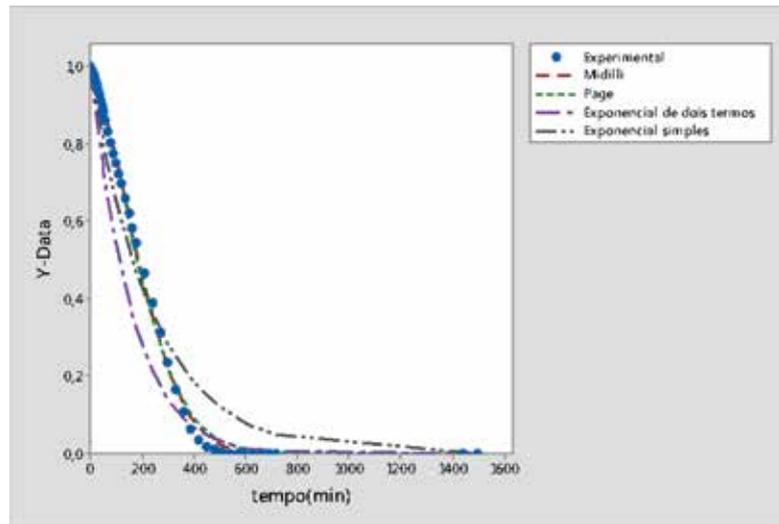


Figura 8 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis e logaritmo aos dados de secagem na temperatura de 80°C

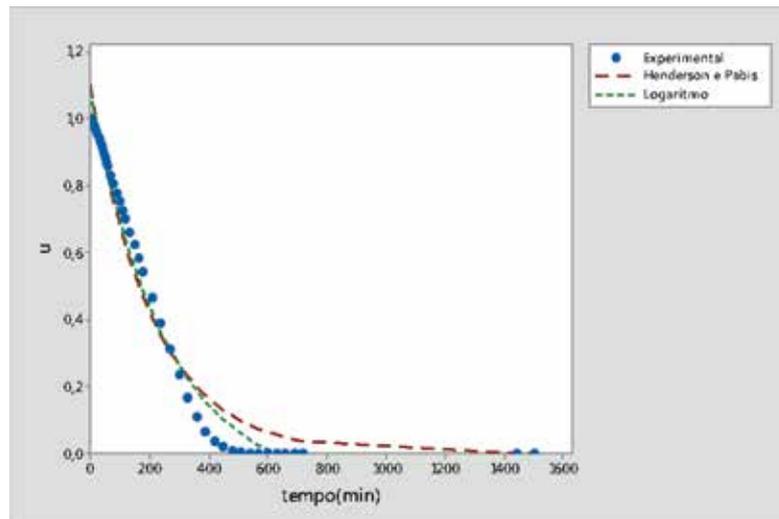


Figura 9 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page, exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 90°C

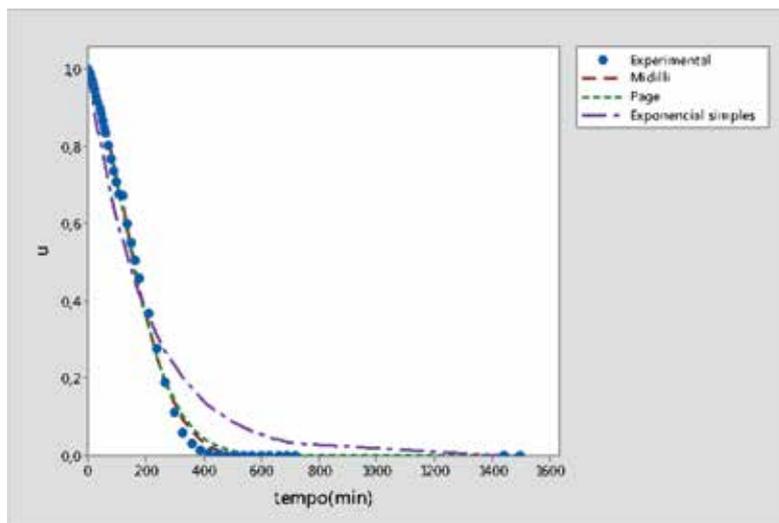
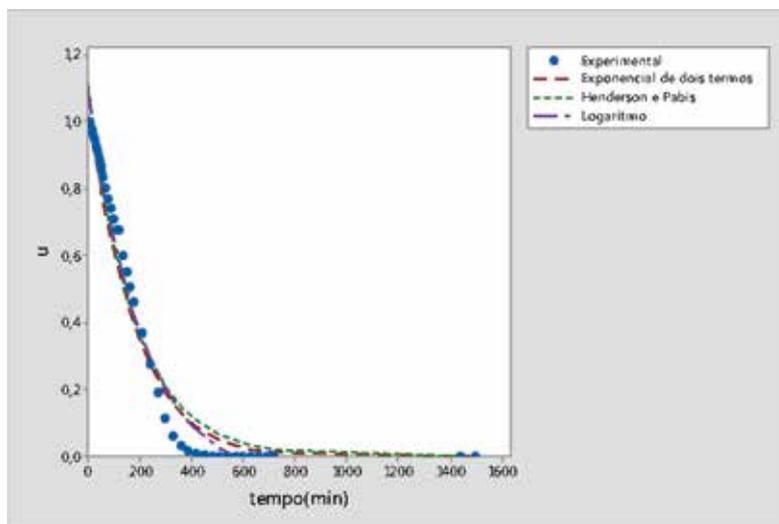


Figura 10 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis, logaritmo e exponencial de dois termos aos dados de secagem na temperatura de 90°C



Com relação aos modelos matemáticos, observa-se nas Figuras 3 a 10 que o modelo de Dois Termos (1974), Henderson e Pabis (1961) e logaritmo não foram aceitáveis para predição do processo de secagem do lodo de esgoto sanitário, haja vista que os valores preditos pelos modelos do teor de umidade inicial (X_0) foram maiores do que 1,0.

Scalcon et al. (2015) avaliaram o ajuste dos modelos matemáticos de Henderson e Pabis (1961) e o modelo logaritmo como preditivos para o processo de secagem de lodo proveniente de digestão anaeróbia. No entanto, neste trabalho ambos os modelos foram considerados ineficazes na predição do processo de secagem do lodo anaeróbio de esgoto sanitário, uma vez que es-

timam o valor da umidade adimensional inicial superior a 1,0 (um). Dessa forma, não foram considerados aceitáveis para a predição do processo de secagem estudado.

Analisando o comportamento dos modelos apresentados nas Figuras 3 a 10, pode-se inferir que o modelo exponencial simples também não se ajusta bem aos dados experimentais propostos,

porém foi feito o estudo estatístico para avaliar se o mesmo é estatisticamente aceitável para predizer o processo de secagem.

Na Tabela 8 estão sendo apresentados os dados referentes à análise estatística (R², teste F e RM) e os parâmetros obtidos para os modelos matemáticos ajustados ao processo de secagem nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, respectivamente.

Tabela 8 – Dados estatísticos e parâmetros obtidos para os modelos matemáticos ajustados ao processo de secagem térmica do lodo de esgoto sanitário nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C

Modelo	T(°C)	Parâmetros				R ²	Teste F	RM
		A		K				
Henderson e Pabis	60	1,07214		0,00292349		0,977	246,47	0,054
	70	1,09233		0,00377869		0,972	203,54	0,063
	80	1,10177		0,00475988		0,974	216,82	0,064
	90	1,10839		0,00554421		0,975	226,90	0,063
		K						
Exponencial Simples	60	0,00264212				0,965	222,58	0,066
	70	0,00335364				0,958	176,15	0,078
	80	0,00418895				0,960	184,20	0,079
	90	0,00484402				0,961	189,91	0,079
		K		v				
Page	60	0,000187051		1,4561		0,996	1816,67	0,021
	70	0,000155459		1,5467		0,997	1908,06	0,022
	80	0,000202841		1,56198		0,997	1852,37	0,023
	90	0,000218739		1,59399		0,997	2100,45	0,022
		C	D	K0	K1			
Exponencial dois termos	60	7,73206	-6,71842	0,0043341	0,00469551	0,988	262,96	0,039
	70	6,22019	-5,20484	0,00686888	0,00794839	0,990	343,91	0,039
	80	4,16634	-3,17078	0,00836413	0,00925594	0,900	30,68	0,125
	90	7,50994	-6,49812	0,00774253	0,00826495	0,976	124,64	0,062
		B	K	C				
Logaritmo	60	1,19239	0,00232866	-0,13474		0,984	294,55	0,044
	70	1,20457	0,002997	-0,130128		0,982	259,21	0,051
	80	1,18666	0,00389867	-0,10369		0,983	269,18	0,052
	90	1,17298	0,00470509	-0,081865		0,982	257,40	0,053
		A	B	K	n			
Midilli	60	0,970356	-0,000012942	0,0000902679	1,56897	0,998	1669,59	0,016
	70	0,967346	-0,000013932	0,0000724688	1,66891	0,998	1829,77	0,017
	80	0,965722	-0,000010995	0,0000928283	1,69365	0,998	1546,99	0,019
	90	0,964319	-0,000006962	0,0000942944	1,7421	0,998	1699,50	0,019

*RM – Raiz do erro médio

Segundo Barros Neto et al. (1995), a análise estatística do teste F pode ser utilizada para determinar se o modelo é preditivo, ou seja, se ele pode ser utilizado para fins de predição da va-

riável estudada. Segundo os autores, para que o modelo proposto seja útil para fins preditivos, o valor de $F_{\text{calculado}}$ (Quadrado do erro médio da regressão/quadrado do erro médio do resíduo)

deve ser no mínimo quatro a cinco vezes o valor de F_{tabelado} . Avaliando-se dessa forma, obtém-se que todos os modelos foram preditivos para o processo de secagem do lodo de esgoto sanitário seguindo este critério. No entanto, os valores de R^2 e RM foram acrescentados na escolha do melhor modelo para a predição do processo de secagem.

Constata-se a partir dos dados apresentados na tabela 8 que os melhores modelos para predição do processo de secagem do lodo de esgoto sanitário de acordo com os critérios estatísticos pré-estabelecidos, foram os modelos de Midilli et al. (2002) e o modelo de Page (1949). Apesar de não atingirem todos os critérios estatísticos conforme estabelecidos, os mesmos foram estatisticamente satisfatórios no processo de predição da secagem do lodo de esgoto sanitário.

Serenotti (2009) e Zhou e Jin (2016) avaliaram alguns modelos matemáticos para predição do

processo de secagem do lodo de esgoto e entre os modelos estudados, o modelo de Midilli et al. (2002) apresentou ajustes estatísticos satisfatórios para predição do processo de secagem.

Nota-se a partir dos dados que estão apresentados na Tabela 8 que há tendência de aumento nas constantes de secagem com o aumento da temperatura empregada no processo de secagem térmica. O aumento da temperatura gera também aumento nas constantes exponenciais “v e n” dos modelos de Page (1949) e Midilli et al. (2002). Isso era esperado, uma vez que com o aumento da temperatura reduz-se o tempo necessário para atingir a umidade de equilíbrio.

Na Tabela 9 estão sendo apresentados os dados da análise de variância (ANOVA) para os modelos de Page (1949) e Midilli et al. (2002) considerados preditivos para o processo de secagem do lodo de esgoto sanitário.

Tabela 9 – Análise de variância para os modelos de Page (1949) e Midilli et al. (2002).

Modelo	T(°C)	Fonte de variação	GL	Soma dos quadrados	Média quadrática	F calculado	F tabelado	Teste F	R ²
Page	60	Regressão	2	5,41202	2,706011	5867,84	3,23	1816,67	0,996
		Residual	41	0,01891	0,000461				
		Total	43	5,37347					
	70	Regressão	2	6,31996	3,159982	6163,04	3,23	1908,06	0,997
		Residual	41	0,02102	0,000513				
		Total	43	6,30308					
	80	Regressão	2	6,73779	3,368893	5983,15	3,23	1852,37	0,997
		Residual	41	0,02309	0,000563				
		Total	43	6,73660					
	90	Regressão	2	6,88743	3,443715	6784,45	3,23	2100,45	0,997
		Residual	41	0,02081	0,000508				
		Total	43	6,85669					
Midilli	60	Regressão	4	5,31006	1,327516	4357,63	2,61	1669,59	0,998
		Residual	39	0,01188	0,000305				
		Total	43	5,37347					
	70	Regressão	4	6,21485	1,553713	4775,71	2,61	1829,77	0,998
		Residual	39	0,01269	0,000325				
		Total	43	6,30308					
	80	Regressão	4	6,63315	1,658288	4037,64	2,61	1546,99	0,998
		Residual	39	0,01602	0,000411				
		Total	43	6,73660					
	90	Regressão	4	6,75839	1,689597	4435,68	2,61	1699,50	0,998
		Residual	39	0,01486	0,000381				
		Total	43	6,85669					

Observa-se a partir dos dados na Tabela 9 que os modelos apresentam valores de Teste F e R² satisfatórios estatisticamente e por este motivo foram escolhidos como os modelos que fazem com maior fidedignidade a predição do processo de secagem do lodo de esgoto sanitário.

Na Tabela 10 são apresentados os custos estimados da secagem do lodo de esgoto sanitário em cada temperatura estudada.

Tabela 10 – Estimativa do custo de secagem do lodo de esgoto sanitário para as temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C

Temperatura	Custo de secagem para cada 1Kg de lodo a ser seco
60°C	R\$ 0,64
70°C	R\$ 0,53
80°C	R\$ 0,46
90°C	R\$ 0,41

A partir dos dados apresentados na Tabela 10 constata-se que com o aumento da temperatura reduz-se o custo da secagem em virtude de menor tempo médio de secagem requerido para obtenção da umidade de equilíbrio. Nota-se que o aumento de 30°C na temperatura de secagem reduz o custo efetivo da secagem em R\$ 0,23.

4 CONCLUSÕES

O lodo de esgoto sanitário apresentou teor de umidade inicial (base úmida) elevado de 92,51%, enquadrando-se na classificação de lodo fluido ou diluído. Esse resultado reforçou ainda mais a necessidade de um processo de secagem para melhorar sua utilização e também facilitar seu transporte.

Nesse trabalho foram analisados os diferentes modelos matemáticos apresentados na literatura para predição do processo de secagem térmica. Dentre os modelos matemáticos apresen-

tados na literatura, os modelos de Midilli et al. (2002) e o modelo de Page (1949) apresentaram melhores ajustes estatísticos e representaram com maior fidedignidade o processo de secagem do lodo de esgoto sanitário para todas as temperaturas estudadas.

A partir da análise de variância e teste de ajuste dos modelos, foi observado que os modelos de Dois Termos (1974), Henderson e Pabis (1961) e logaritmo não foram aceitáveis para a predição do processo de secagem do lodo de esgoto sanitário, uma vez que extrapolam o valor da umidade adimensional máxima inicial que seria de 1,0 (um). Portanto, esses modelos não fazem a representação fenomenológica do processo de secagem do lodo de esgoto sanitário.

As curvas de secagem observadas neste trabalho para as temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C mostram um comportamento típico da secagem, na qual o aumento de temperatura de secagem reduz o tempo médio para atingir a umidade de equilíbrio. Então, sugere-se a temperatura de 90°C como a melhor temperatura para a secagem do lodo de esgoto sanitário, uma vez que reduz o tempo médio de secagem e consequentemente reduz-se o custo efetivo da secagem do material. Além disso, como entre as temperaturas estudadas não houve diferença significativa na concentração de nutrientes, a mesma apresenta-se como a melhor opção em custo/benefício para a secagem deste material.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKSOY A., KURT M., SANIN F. D. Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements. *Water Research*. v.82, p. 47–57, October 2015.

ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 1ª ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 481 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

- ANDREOLI, C. V., TAMANIN, C. R., HOLSBACK, B., PEGORINI, E. S., NEVES, P. S. Uso de lodo de esgoto na produção de substrato vegetal. In: **Biossólidos - alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: Editora ABES 2006.
- APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for examination of water and wastewater**. 22nd ed. Washington: American Public Health Association; 2012, 1360 p.
- BARROS NETO, B., SCARMÍNIO, I.S., BRUNS, R.E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.501-510, 2007.
- FARIAS, R. P. **Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos**. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), UFCG, 2011.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. Editora Guanabara, 2ª edição. Rio de Janeiro, 1982.
- FRANÇA JUNIOR, A. T. de. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto**. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2008.
- JINDAROM, C., MEEYOO, V., KITIYANAN, B., RIRKSOMBOON, T.; RANGSUNVIGIT, P. Surface characterization and dye adsorptive capacities of char obtained from pyrolysis/gasification of sewage sludge. **Chem. Eng. Journal** **133**, p. 239-246, 2007.
- LEITE, B. Z.; INGUNZA, M. P.; ANDREOLI, C. V. Lodo de decanto-digestores. In ANDREOLI, C. V. (Org). **Alternativas de uso de resíduos de saneamento**. Rio de Janeiro-RJ: ABES, 2006, 361p.
- LOBATO, Livia Cristina de Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- McCABE, W. L., SMITH, J., HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**, McGraw-Hill, Fifth Edition, 1993.
- MENEZES, M. L., STRÖHER, A. P., PEREIRA, N. C., BARROS, S. T. D. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. **Engevista**, v. 15, n. 2. p. 176-186, 2013.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. **A new model for single-layer drying**. *Drying Technology*, 20(7), 2002, pp. 1503-1513.
- MUJUMDAR, A.S.; YUE, P.L.; CHEN, G. **Dewatering and drying of wastewater treatment sludge**. **Handbook of Industrial Drying**. 3ª ed., CRC Press. 1312 p., 2006.
- ÖZDEMİR, M.; DEVRES, Y. O. The thin-layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 225-233, 1999.
- PAGE, G.E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**, Indiana, 1949, Thesis (M. Sc.), Purdue University.
- PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; DAL FABRO, I. M. Secagem: Fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014.
- PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F., PICKLER, A. C., LEAL, E. R. M., MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 89-XX, jul./dez. 2010.
- SCALCON, A.; GIMENES, M. L.; MOREJÓN, C. F. M.; JOHANN, G.; MELO, J. R.; SONE A. P. Estudo da secagem solar de lodo proveniente de biodigestão anaeróbia. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2015.
- SERENOTTI, F. **Avaliação da secagem para redução de volume e inativação de microrganismos em lodo de ete**. 2009. Tese – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- SEWAGE SLUDGE DISPOSAL **Journal of the Institution of Water Environmental Management**, v.3, p.208-211, 1989.
- YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN, H.I. Mathematical modeling of thin-layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, v. 26, p. 457-465, 2001.
- ZHOU, Y., JIN, Y. Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of dewatered municipal sewage sludge (DWMSS). **Procedia Environmental Sciences** **31** p. 758 – 766, 2016.