



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
PRO-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AMBIENTAL**

**ALEXANDRE ALMEIDA JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DE LODO DE ESGOTO  
SANITÁRIO**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2017**

**ALEXANDRE ALMEIDA JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DE LODO DE ESGOTO  
SANITÁRIO**

Dissertação submetida a Coordenação do  
MCTA/UEPB em cumprimento as  
exigências necessárias para obtenção do  
Título de Mestre em Ciência e  
Tecnologia Ambiental.

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. VALDERI DUARTE LEITE

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2017**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A447a Almeida Júnior, Alexandre.

Avaliação do processo de secagem térmica de lodo de esgoto sanitário [manuscrito] : / Alexandre Almeida Junior. - 2017.

75 p.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.

"Orientação : Prof. Dr. Valderi Duarte Leite, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Lodo. 2. Esgoto sanitário. 3. Secagem térmica. 4. Modelos matemáticos.

21. ed. CDD 628.38


ALEXANDRE ALMEIDA JÚNIOR

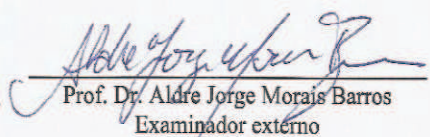
AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DE LODO DE  
ESGOTO SANITÁRIO


Dissertação submetida a  
Coordenação do MCTA/UEPB em  
cumprimento as exigências  
necessárias para obtenção do  
Título de Mestre em Ciência e  
Tecnologia Ambiental.

Dissertação aprovada em 22/10/17

COMISSÃO EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Valderi Duarte Leite  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Aldre Jorge Morais Barros  
Examinador externo

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Fernando Fernandes Vicira  
Examinador interno

Campina Grande

2017

## DEDICATÓRIA

À minha família, aos amigos e ao PPGCTA.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Senhor, Soberano, Majestoso Deus, pela graça da vida, amor e infinita misericórdia, sem a qual não poderia estar aqui.

Aos meus pais Maria do Carmo Silva Almeida e Alexandre José de Almeida Silva por todo apoio e incentivo nesta jornada.

Aos meus avós Nelson Francisco da Silva e Josefa Gomes de Almeida e Silva pelo incentivo, compreensão e amor.

As minhas irmãs Pollyanna Silva Almeida e Cassandra Regina Silva Almeida por suas palavras de forças que me fizeram chegar até aqui.

À minha esposa Gêssica da Silva Porto por todo seu apoio e compreensão neste período de dedicação.

Aos amigos Diego Leal, Vinícius Dantas, Danúbio Leonardo e em especial Antônio Rafael pelas palavras de apoio e por suas contribuições neste trabalho.

Ao meu professor e orientador Valderi Duarte Leite, o qual, cumpri o papel de orientador com excelência, sabedoria e humildade, transmitindo competências para além da vida acadêmica. Meu muito obrigado, e o desejo que as bênçãos do Senhor estejam sobre a sua vida e os seus caminhos.

À minha turma da Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental 2016.1. Em especial a discente Ketyla que deu grandes contribuições neste trabalho.

Ao professor Fábio Correia Sampaio e a equipe do LABIAL (laboratório de biologia bulcal) pelo apoio dado desde que assumi minha função como técnico de laboratório na UFPB.

Aos professores examinadores deste trabalho, prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira e ao prof. Dr. Aldre Jorge Morais Barros, meus singelos agradecimentos por terem aceitado fazer parte desta banca e pelas suas contribuições que foram de inteira importância neste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba e ao secretário Josemberg Nascimento Moura por sempre se dispor e ajudar.

O meu “muito obrigado” a todos vocês.

## RESUMO

O lodo de esgoto sanitário é composto de uma mistura complexa de sólidos inorgânicos e orgânicos. Seu tratamento visa reduzir o teor de material orgânico biodegradável e umidade, a fim de obter um material estável com maior concentração de sólidos. É um desafio encontrar tratamentos economicamente viáveis e ecologicamente seguros. Dentre vários tratamentos, a secagem térmica tem sido apontada como a mais capaz de aperfeiçoar rotinas e minimizar custos operacionais. Neste trabalho foi realizada uma pesquisa experimental nas dependências da Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários da Universidade Estadual da Paraíba, em Campina Grande-PB, cujo objetivo foi analisar o comportamento da secagem convectiva do lodo de esgoto sanitário nas seguintes temperaturas: 60, 70, 80 e 90, com variação de  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ , bem como selecionar entre os modelos matemáticos apresentados na literatura qual melhor representa o comportamento da secagem deste resíduo. O lodo estudado foi coletado em um reator UASB; sua secagem realizada em estufa convectiva e os ensaios realizados com massa inicial de 500g de lodo de esgoto sanitário. Foi observado que o lodo apresentou um teor de umidade inicial de 92,51%, se classificando como lodo fluido ou diluído, reforçando a necessidade do processo de secagem. Dentre os modelos matemáticos estudados, os modelos de Midilli e o de Page apresentaram melhores ajustes estatísticos e representaram mais fidedignamente o processo de secagem do lodo dentre as temperaturas estudadas. Sugere-se  $90^{\circ}\text{C}$  como a temperatura que propicia melhor relação custo/benefício para o processo de secagem.

**Palavras chave:** Lodo de esgoto sanitário; secagem térmica; modelos matemáticos.

## ABSTRACT

Sanitary sewage sludge is composed of a complex mixture of inorganic and organic solids. Its treatment aims to reduce the content of biodegradable organic material and moisture, in order to obtain a stable material with higher concentration of solids. It is a challenge to find economically viable and ecologically safe treatments. Among several treatments, thermal drying has been pointed out as the most capable of perfecting routines and minimizing operating costs. In this work an experimental research was conducted at the Experimental Station of Biological Treatment of Sanitary Sewers of the State University of Paraíba, Campina Grande-PB, Brazil. The objective was to analyze the convective drying behavior of sewage sludge at the following temperatures: 60, 70, 80 and 90, and variation of 2,5 ° C, as well as to select among the mathematical models presented in the literature which best represents the drying behavior of this residue. The sludge studied was collected in a UASB reactor; and the tests carried out with an initial mass of 500g of sanitary sewage sludge. It was observed that the sludge presented an initial moisture content of 92.51%, being classified as fluid or diluted sludge, reinforcing the necessity of the drying process. Among the mathematical models studied, the models of Midilli and Page presented better statistical adjustments and represented more accurately the sludge drying process among the temperatures studied. It is suggested 90°C the temperature with better relation cost / benefit for the drying process.

**Keywords:** Sanitary sewage sludge; thermal drying; mathematical models.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Secadores Rotativos.....	27
Figura 2 – Secador transportador de esteira (túnel).....	28
Figura 3: Esquema geral de uma planta de secagem solar.....	29
Figura 4 – Taxas de secagem do lodo.....	30
Figura 5 – Curvas de secagem para o lodo de esgoto sanitário nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C±2,5°C .....	38
Figura 6 – Fissuras na torta de lodo apresentadas no decorrer do processo de secagem. ....	39
Figura 7 – Curvas de taxa de secagem para o lodo de esgoto sanitário nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C±2,5°C . ....	40
Figura 8 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page e exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 60°C.....	44
Figura 9 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis, logaritmo e exponencial de dois termos aos dados de secagem na temperatura de 60°C.....	44
Figura 10 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page e exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 70°C.....	45
Figura 11 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis, logaritmo e exponencial de dois termos aos dados de secagem na temperatura de 70°C.....	45
Figura 12 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page, exponencial de dois termos e exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 80°C.....	46
Figura 13 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis e logaritmo aos dados de secagem na temperatura de 80°C.....	46
Figura 14 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page, exponencial simples e Wang e Singh aos dados de secagem na temperatura de 90°C. ....	47
Figura 15 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis, logaritmo e exponencial de dois termos aos dados de secagem na temperatura de 90°C.....	47
Figura 16 – Ajuste do modelo exponencial de dois termos para a temperatura de 60±2,5°C. ....	64
Figura 17– Ajuste do modelo de Midilli para a temperatura de 60±2,5°C. ....	64
Figura 18 – Ajuste do modelo exponencial simples para a temperatura de 60±2,5°C. ....	65
Figura 19 – Ajuste do modelo de Henderson e Pabis para a temperatura de 60±2,5°C. ....	65
Figura 20 – Ajuste do modelo logarítimo para a temperatura de 60±2,5°C. ....	66
Figura 21 – Ajuste do modelo page para a temperatura de 60±2,5°C.....	66
Figura 22 – Ajuste do modelo exponencial de dois termos para a temperatura de 70±2,5°C. ....	67
Figura 23 – Ajuste do modelo de Midilli para a temperatura de 70±2,5°C. ....	67
Figura 24 – Ajuste do modelo exponencial simples para a temperatura de 70±2,5°C. ....	68

<b>Figura 25 – Ajuste do modelo de Henderson e Pabis para a temperatura de <math>70\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>68</b>
<b>Figura 26 – Ajuste do modelo logaritmo para a temperatura de <math>70\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>69</b>
<b>Figura 27 – Ajuste do modelo Page para a temperatura de <math>70\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>69</b>
<b>Figura 28 – Ajuste do modelo exponencial de dois termos para a temperatura de <math>80\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>70</b>
<b>Figura 29 – Ajuste do modelo de Midilli para a temperatura de <math>80\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>70</b>
<b>Figura 30 – Ajuste do modelo exponencial simples para a temperatura de <math>80\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>71</b>
<b>Figura 31 – Ajuste do modelo de Henderson e Pabis para a temperatura de <math>80\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>71</b>
<b>Figura 32 – Ajuste do modelo logaritmo para a temperatura de <math>80\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>72</b>
<b>Figura 33 – Ajuste do modelo Page para a temperatura de <math>80\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>72</b>
<b>Figura 34 – Ajuste do modelo exponencial de dois termos para a temperatura de <math>90\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>73</b>
<b>Figura 35 – Ajuste do modelo de Midilli para a temperatura de <math>90\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>73</b>
<b>Figura 36 – Ajuste do modelo exponencial simples para a temperatura de <math>90\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>74</b>
<b>Figura 37 – Ajuste do modelo de Henderson e Pabis para a temperatura de <math>90\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>74</b>
<b>Figura 38 – Ajuste do modelo logaritmo para a temperatura de <math>90\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>75</b>
<b>Figura 39 – Ajuste do modelo Page para a temperatura de <math>90\pm 2,5^{\circ}\text{C}</math>.</b> .....	<b>75</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do lodo de esgoto primário bruto (LPB) e digerido (LPD) .....	20
Tabela 2 – Modelos matemáticos para avaliação da cinética de secagem do lodo de esgoto sanitário. ....	36
Tabela 3 – Estimativa do custo de secagem do lodo de esgoto sanitário para as temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C.....	41
Tabela 4 – Dados médios da caracterização química do lodo de esgoto sanitário “in natura” e após secagem.....	42
Tabela 5 – Teste de Tukey para os dados de COT nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C .....	42
Tabela 6 – Teste de Tukey para os dados de NTK nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C .....	43
Tabela 7 – Teste de Tukey para os dados de Fósforo total nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C .....	43
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	49
Tabela 9 – Análise de variância para os modelos de Page (1949) e Midilli et al. (2002).....	51
Tabela 10 – Dados experimentais para construção das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário e para ajustes dos modelos matemáticos na temperatura de 60°C. ....	60
Tabela 11 – Dados experimentais para construção das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário e para ajustes dos modelos matemáticos na temperatura de 70°C. ....	61
Tabela 12 – Dados experimentais para construção das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário e para ajustes dos modelos matemáticos na temperatura de 80°C. ....	62
Tabela 13 – Dados experimentais para construção das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário e para ajustes dos modelos matemáticos na temperatura de 90°C. ....	63

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 - Microrganismos patogênicos frequentes em lodos de esgotos. ....</b>	<b>20</b>
<b>Quadro 2: Métodos utilizados para caracterização química do lodo de esgoto sanitário proveniente de reator UASB.....</b>	<b>35</b>

## LISTA DE SIGLAS

ANOVA	Análise de variância
b.s.	Base seca
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
COT	Carbono Orgânico Total
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EXTRABES	Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgotos Sanitários
LPB	Lodo Primário Bruto
LPD	Lodo Primário Digerido
NTK	Nitrogênio Total Kjeldhal
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
RM	Raiz do erro Médio
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
SV	Sólidos Voláteis
u	Unidade adimensional
UASB	<i>Upflow anaerobic sludge blanket</i> ou Reator de fluxo ascendente de manta de lodo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1. Objetivo geral</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2. Objetivos específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1. Lodo de esgoto sanitário</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2. Classificação do lodo de esgoto</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3. Composição do lodo de esgoto sanitário</b> .....	<b>18</b>
<b>3.4. Tipos de tratamento empregados a lodo de esgoto</b> .....	<b>21</b>
<b>3.5. Secagem térmica</b> .....	<b>23</b>
3.5.1. Consumo de energia térmica .....	25
3.5.2. Classificação dos secadores térmicos .....	25
3.5.3. Tecnologias de secagem térmica .....	26
3.5.3.1. Secadores rotativos .....	26
3.5.3.1.1 Secadores rotativos diretos .....	27
3.5.3.1.2. Secadores rotativos indiretos .....	27
3.5.3.2. Secadores tipo esteira (Túnel).....	28
3.5.3.3. Secadores de soleiras múltiplas .....	28
3.5.3.4. Planta de secagem solar.....	29
<b>3.6. Fundamentos da secagem de lodo de esgoto</b> .....	<b>30</b>
<b>3.7. Modelagem matemática do processo de secagem térmica</b> .....	<b>31</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1. Local da pesquisa</b> .....	<b>33</b>
<b>4.2. Coleta da amostra de lodo de esgoto</b> .....	<b>33</b>
<b>4.3. Determinação das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário</b> ...	<b>33</b>
<b>4.4. Caracterização química do lodo de esgoto sanitário</b> .....	<b>34</b>
<b>4.5. Cinética de secagem do lodo de esgoto sanitário</b> .....	<b>35</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>38</b>
<b>5.1. Curvas de secagem do lodo de esgoto sanitário</b> .....	<b>38</b>
<b>5.2. Caracterização química do lodo anaeróbio de esgoto sanitário <i>in natura</i> e após secagem.</b> .....	<b>41</b>
<b>5.3. Ajuste dos modelos matemáticos ao processo de secagem do lodo de esgoto sanitário</b> .....	<b>43</b>
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	<b>52</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

<b>APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS DA UMIDADE ADMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM NAS TEMPERATURAS DE 60, 70, 80 e 90°C .....</b>	<b>60</b>
<b>APÊNDICE B – APRESENTAÇÃO DOS AJUSTES DOS MODELOS MATEMÁTICOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS NAS TEMPERATURAS DE 60, 70, 80 e 90°C.....</b>	<b>64</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das maiores dificuldades enfrentadas no setor de saneamento nos dias de hoje refere-se à estabilização e a disposição final do lodo de esgoto, haja vista ser um produto consequente do tratamento de águas residuárias e sua disposição, de forma inadequada, é um problema em todo o mundo (ESCUDEY *et al.*, 2011).

No geral, os processos de tratamento de lodo de esgoto sanitário visam reduzir o teor de material orgânico biodegradável, a concentração de organismos patogênicos e o teor de umidade, a fim de se obter um material com maior concentração de sólidos e estável, que não constitua risco à saúde e que possa ser manipulado e transportado com facilidade e baixo custo. Existem várias alternativas para o tratamento e a destinação final do lodo de esgoto sanitário. Os mais comuns envolvem o tratamento biológico por meio da digestão aeróbia ou anaeróbia, que pode ser seguida pela destinação final em aterros sanitários, landfarming, lagoas de armazenagem, incineração ou reciclagem agrícola (WAGNER *et al.*, 2009).

A natureza do lodo de esgoto sanitário depende do processo empregado no tratamento do esgoto e da fonte geradora. É, geralmente, formado por uma mistura complexa de sólidos de origem inorgânica e orgânica, que foram alterados por processos químicos, físicos ou biológicos. Sua qualidade é muito variável, pois o uso indiscriminado de diversos produtos químicos, incluindo-se aqueles empregados na higiene humana, modificam as características do lodo. Então, o lodo de esgoto pode conter significativas quantidades de substâncias tóxicas tais como metais pesados, substâncias orgânicas e microrganismos patogênicos (JINDAROM *et al.*, 2007).

Diante da necessidade de preservação ambiental ao se destinar corretamente os resíduos resultantes do tratamento de esgoto, surge o desafio de encontrar formas economicamente viáveis e ecologicamente seguras para tratamento de lodo. Neste sentido, vários estudos vêm sendo realizados com este tipo de resíduo afim de minimizar impactos negativos ao meio ambiente, dentre eles destaca-se a secagem térmica.

A secagem térmica tem sido apontada como a técnica capaz de otimizar rotinas e minimizar custos operacionais inerentes ao gerenciamento de lodo. Isso porque promove simultaneamente a redução do volume e a higienização do material, dispensando o uso de produtos químicos (POSSETTI *et al.*, 2012).

No estudo sobre a secagem térmica é importante ter conhecimento sobre a curva de secagem do material a ser processado termicamente e conhecer algumas propriedades térmicas intrínsecas ao material que se pretende processar (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).



A secagem de um material sólido qualquer, envolve simultaneamente a transferência de calor e de massa (MWITHIGA e OLWAL, 2005; CORRÊA *et al.* 2006), e seu comportamento é caracterizado pela análise das mudanças de umidade em função do tempo. Por meio da secagem, é possível ser determinada a cinética de secagem, a qual procura determinar o comportamento do material sólido que é seco, sendo representada pelas curvas de secagem e de taxa de secagem (MENEZES *et al.*, 2013).

O comportamento da curva de secagem de um sólido 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 (MENEZES *et al.*, 2013). A cinética de secagem de vários produtos também pode ser descrita por modelos matemáticos semiempíricos ou puramente empíricos (MADAMBA, 2003). Os modelos semiempíricos se baseiam na analogia com a Lei de Newton para o resfriamento, aplicada à transferência de massa, enquanto que, 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 (ZANOELO *et al.*, 2007).

A operação de secagem favorece a remoção da água ou umidade do lodo de esgoto e é uma operação fundamental para redução do volume do mesmo, gerando um resíduo de fácil manejo, viabilizando e reduzindo o custo com o transporte, bem como a disposição final.

Neste trabalho pretende-se analisar o comportamento da secagem convectiva do lodo de esgoto sanitário em quatro diferentes temperaturas, bem como selecionar entre os modelos matemáticos apresentados na literatura qual melhor representa o comportamento da secagem deste resíduo.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

- Avaliar o processo de secagem térmica do lodo de esgoto sanitário proveniente de reator UASB.

### 2.2. Objetivos específicos

- Estabelecer curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário quando submetido a diferentes temperaturas;
- Realizar a caracterização química do lodo de esgoto sanitário “*in natura*” e após secagem.
- Avaliar entre os modelos empíricos apresentados na literatura, qual representa melhor o processo de secagem térmica do lodo de esgoto sanitário.
- Avaliar o comportamento cinético do processo de secagem do lodo de esgoto sanitário.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Lodo de esgoto sanitário

De acordo com von Sperling (2014), o termo “lodo” tem sido usado para qualificar os subprodutos do tratamento de esgoto. Nos processos biológicos de tratamento, o lodo secundário, formado principalmente de sólidos biológicos, também é chamado de biossólido.

O lodo gerado ao longo dos processos de tratamento é basicamente constituído de materiais orgânicos (sólidos voláteis), inorgânicos (sólidos fixos) e água. Suas características são bastante variáveis e dependem de fatores como o tipo de esgoto que é proveniente e as peculiaridades dos processos de tratamento utilizados. Essa variedade em suas características é o que muitas vezes dificulta o seu manejo e sua disposição final, criando a necessidade de submetê-lo a diversas etapas unitárias de tratamento (JORDÃO e PESSÔA, 2014).

Comumente, o lodo bruto contém de 5% a 9% de sólidos totais, o que lhe confere alto teor de umidade e volume elevado (LEITE, INGUNZA e ANDREOLI, 2006), impondo a secagem, antecedendo ao tratamento (ARLABOSSE, CHAVEZ e PREVOT, 2005; CHEN *et al.*, 2004). Para von Sperling (2014), a umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo (no manuseio e na disposição final).

Dos sólidos contidos, 70 a 80% são matéria orgânica incluindo óleos e graxas. Podem ser encontradas quantidades apreciáveis de contaminantes, refletindo as características do esgoto bruto do qual ele foi derivado (SEWAGE, 1989).

Em virtude da presença de contaminante que possam causar problemas de saúde pública torna-se necessária a busca por formas de tratamento e disposição final do lodo. A disposição e tratamento devem ser geridos para minimizar problemas ambientais como odor e lançamento no ambiente de contaminantes e patógenos (HALLEY e MILLER, 1991).

Entre as principais opções de disposição de lodo no ambiente, encontram-se: 1) disposição no solo (uso agrícola, florestas, áreas de recuperação); 2) disposição em aterro; 3) disposição no mar; 4) incineração (MATTHEWS, 1992).

Uma das mais promissoras alternativas de utilização de lodo de esgoto sanitário é na agricultura. Korentajer (1991) comenta que, do ponto de vista econômico essa opção parece ser a mais vantajosa. O lodo é considerado valioso adubo orgânico proporcionando diversos benefícios, entre eles o fornecimento de nutrientes para as plantas (N e P), o aumento do teor de alguns micronutrientes essenciais (especialmente, Zn, Cu, Mn e Mo), o aumento da

capacidade de retenção de água e uma melhor estruturação do solo pela presença de matéria orgânica (ANGLIAN, 1991).

### **3.2. Classificação do lodo de esgoto**

Segundo Metcalf e Eddy (2016), Rodriguez (2011), Von Sperling (2014), El-Hadj (2006), Santos (2003), os lodos são classificados em:

- Lodo primário: gerado após o tratamento primário, geralmente processo físico ou químico que retém as partículas em suspensão, grandes e ou densas (sólidos, gorduras e espuma). Esta etapa do tratamento remove 50-70 % de sólidos em suspensão com um baixo nível de teor de SV (de 55 a 60 %). O lodo primário pode ser facilmente digerido em condições de operação adequadas.

- Lodo secundário/lodo biológico: é gerado a partir do tratamento biológico das águas residuais, ele contém uma mistura de microrganismos vivos, principalmente bactérias, que decompõe o material orgânico e contaminantes que permanecem após o tratamento primário;

- Lodo misto é uma combinação dos lodos primários e secundários que podem ser misturados antes do tratamento do lodo;

- Lodo digerido é lodo secundário ou misto, que passou por um processo de estabilização biológica, chamado digestão. Esta digestão pode ser feita sob diferentes temperaturas (mesófila ou termófila) e em condições aeróbias ou anaeróbias. Lodo digerido apresenta odor, massa e quantidade de patógenos reduzidos e é mais facilmente desidratado;

- Lodo químico: contém em sua composição produtos químicos provenientes de sistemas de tratamento que incorporam uma etapa físico-química para melhorar o desempenho do decantador primário ou para dar um polimento ao efluente secundário. Quantidades significativas de gases podem ser desprendidas do lodo que resulta no aumento de sua massa específica caso o lodo fique armazenado por períodos prolongados.

### **3.3. Composição do lodo de esgoto sanitário**

A composição do lodo de esgoto é bastante variável e heterogênea. Este tipo de resíduo apresenta características químicas, físicas e biológicas modificadas em função do tipo de sistema de tratamento de esgotos adotado e depende de sua operação e manutenção, do

tempo e da temperatura (SILVA, VON SPERLING e OLIVEIRA FILHO, 2007; METCALF e EDDY, 2003; IMHOFF e IMHOFF, 2002).

Basicamente, o lodo de esgoto é constituído de água e material sólido, nestes estão presentes os constituintes orgânicos e inorgânicos: nutrientes, matéria orgânica, metais pesados e microrganismos (ANDREOLI, 2006; AGUSTINI e ONOFRE, 2007). Além da água, do material orgânico de origem fecal e inorgânico, como areia, pode conter surfactantes em menor quantidade (LEITE, INGUNZA e ANDREOLI, 2006).

Segundo Souza (2012), a água presente no lodo pode ser classificada em quatro categorias que são: água livre, intersticial ou capilar, adsorvida, vicinal e água de hidratação. O autor relata algumas definições referentes aos tipos de águas presentes no lodo de esgoto que são:

- Água Livre – Fração da água não associada às partículas sólidas do lodo e pode ser removida facilmente por sedimentação gravitacional;
- Água Intersticial ou Capilar – Fração de água ligada aos flocos do lodo, presente nos interstícios dos mesmos, podendo ser liberada pela quebra dos flocos mediante aplicação de forças mecânicas ou evaporação;
- Água Adsorvida – Camada de água formada na superfície das partículas sólidas do lodo, a qual é fortemente ligada por adsorção e adesão através das pontes de hidrogênio;
- Água de Hidratação – Fração da água quimicamente ligada à superfície das partículas sólidas.

A alta fração de material orgânico biodegradável contida no lodo confere-lhe a característica de instabilidade biológica (AGUSTINI e ONOFRE, 2007; VAN HAANDEL e ALÉM SOBRINHO, 2006; AISSE *et al.*, 1999). Andreoli et al. (2001), relatam que essa instabilidade biológica é devido ao lodo constituir-se de material biodegradável e quando essa fração é muito alta o lodo torna-se putrescível e com baixa qualidade higiênica, pois é um material com uma grande quantidade de microrganismos patogênicos. Contudo, é um material que possui grande quantidade de nutriente que favorecem sua aplicação na agricultura. Dentre estes nutrientes destacam-se o nitrogênio, fósforo e potássio (KITAMURA *et al.*, 2008; AGUSTINI e ONOFRE, 2007; BARBOSA e TAVARES FILHO, 2006).

Para Gomes, Nascimento e Biondi (2007) e Deschamps e Favoretto (1999), o potássio é encontrado em baixas concentrações nos lodos de esgotos, diferente do nitrogênio e do

fósforo. A maior parte do potássio dos lodos encontra-se na forma mineral, estando disponível às plantas. Deschamps e Favoretto (1999), sugerem a suplementação de potássio com fertilizantes minerais, quando da utilização de biossólidos na agricultura, devido às baixas concentrações deste macronutriente.

Na Tabela 1 são apresentados os dados das concentrações dos constituintes presentes em lodo primário bruto e lodo primário digerido.

**Tabela 1 - Composição do lodo de esgoto primário bruto (LPB) e digerido (LPD)**

Constituintes	LPB	LPD
Sólidos totais - ST (%)	5,0 – 9,0	2,0 -5,0
Sólidos voláteis - STV (%ST)	60,0-80,0	30,0-60,0
pH	5,0-8,0	6,5-7,5
Nitrogênio - N (%ST)	1,5-4,0	1,6-3,0
Fósforo - P (%ST)	0,8-2,8	1,5- 4,0
Potássio - K (%ST)	0,0 – 1,0	0,0-3,0

Fonte: Metcalf e Eddy (2003).

Inúmeras pesquisas foram realizadas com o lodo de esgoto com a finalidade de aplicação na agricultura, porém, poucas delas descrevem a composição microbiológica deste tipo de resíduo. No Quadro 1 são apresentados os microrganismos patogênicos frequentemente encontrados no lodo de esgoto sanitário.

**Quadro 1 - Microrganismos patogênicos frequentes em lodos de esgotos.**

Bactérias	Protozoários	Nematoda	Platyhelminthes
Campylobacter jejuni	Balantidium coli	Ascaris lumbricoides	Hymenolepis diminuta (Cs)
Escherichia coli	Cryptosporidium	Ascaris. suun	Hymenolepis nana (Cs)
Salmonella paratyphi	Entamoeba histolytica	Ancylostoma duodenale	Taenia solium (Cs)
Salmonella typhi	Giardia lamblia	Necator americanus	Taenia saginata (Cs)
Salmonella sp.	Toxoplasma gondii	Strongyloides stercoralis	Schistosoma mansoni (Tr)
Shigella sp.		Toxocara canis	Schistosoma haematogium (Tr)
Vibrio cholerae		Trichostrongylus axei	Schistosoma japonicum (Tr)
Yersinia sp.		Trichuris trichiura	

Cs- Cestóides Tr- Trematóides

FONTE: Metcalf e Eddy (2003); USEPA (2003); Carrington (2001); Storer *et al.* (1989); Feachem *et al.*(1983)

### 3.4. Tipos de tratamento empregados a lodo de esgoto

O tratamento do lodo de esgoto sanitário vem ganhando cada vez mais expressão no Brasil, em razão do aumento do número de ETEs instaladas e da necessidade de se atender às exigências ambientais. Nesse sentido, o desenvolvimento de novas tecnologias é o resultado dessa crescente demanda pela disposição segura e com menor impacto ambiental negativo desse lodo gerado, garantindo maior segurança e bem-estar para as populações envolvidas.

Os lodos podem exibir características indesejáveis, como instabilidade biológica, possibilidade de transmissão de patógenos e grandes volumes. O principal objetivo do tratamento do lodo de esgoto é gerar um produto mais estável e com menor volume para facilitar seu manuseio e, conseqüentemente, reduzir os custos nos processos subsequentes (PEDROZA *et al.*, 2010). Esse tratamento se dá através de processos físicos, químicos e biológicos. Usualmente, o tratamento do lodo, após a sua geração, inclui uma ou mais das seguintes etapas (CASSINI, 2003):

- Adensamento: redução de umidade (redução de volume);
- Estabilização: redução de matéria orgânica (redução de sólidos totais);
- Condicionamento: preparação para a desidratação;
- Desidratação: redução adicional de umidade;
- Disposição final: destinação final dos subprodutos.

O adensamento tem por objetivo aumentar a concentração de sólidos no lodo. Desta forma, consegue-se reduzir a capacidade volumétrica das unidades subsequentes de tratamento, como volume dos digestores e tamanho de bombas. Dentre outros benefícios, podem-se citar a redução de consumo de produtos químicos no desaguamento e menor consumo de energia no aquecimento de digestores (MIKI *et al.*, 2006). Os tipos de adensamento mais comuns são: por gravidade, flotação com ar dissolvido, centrífuga, adensador de esteira e tambor rotativo. O processo de adensamento pode aumentar a concentração de sólidos no lodo primário para aproximadamente 12% (BITTON, 2001). Os adensadores por gravidade são usados para aumentar a concentração de lodo pelo processo de sedimentação da matéria em suspensão, utilizando-se apenas de mecanismos físicos.

A estabilização de lodos consiste em estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica, reduzindo assim, os riscos de degradação desse material e a quantidade de microrganismos patogênicos (VON SPERLING, 2014). Segundo Andreoli *et al.* (2001), são três os tipos de estabilização de lodo: biológica, química e térmica. A primeira consiste na

utilização de microrganismos específicos tendo como objetivo realizar a estabilização da fração orgânica em material estável, além disso, promove a destruição de microrganismos patogênicos presentes nesse material.

A estabilização química segundo Jordão e Pessoa (2014), é aquela utilizada através da adição de produtos químicos alcalinos que são capazes de elevar o pH do lodo a 12, por pelo menos 2 horas, impedindo ou retardando a ação dos microrganismos presentes no lodo que iriam consumir a matéria orgânica presente no material e que poderiam causar maus odores. A utilização desse método de estabilização possui a desvantagem de aumentar os custos operacionais da ETE devido ao aumento do volume de lodo a ser transportado para seu destino final, uma vez que passa a incluir na sua parcela a massa de produto químico utilizado.

Por fim, a estabilização térmica é obtida pela introdução de calor proveniente de fontes diversas sobre a fração volátil em ambientes fechados. A principal vantagem na utilização da estabilização térmica é a obtenção de um produto final com alto teor de sólidos totais, livre de microrganismos patogênicos, o que favorece a sua utilização na agricultura (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Os processos de desidratação podem ser divididos em: processos de desidratação natural e desidratação mecânica (DAVID, 2002). Os métodos de desidratação natural mais comuns são os leitos de secagem e as lagoas de lodos. Dentre os processos mecânicos citam-se: filtros prensa de esteira, centrífugas, filtros prensa de placas e prensa parafuso. O processo de filtração do lodo leva a uma maior concentração de sólidos do que o processo de adensamento. Nos processos onde são utilizados condicionantes químicos, as filtrações do lodo aumentam a concentração de sólidos de 20 a 40 % dependendo do tipo de lodo e da forma de filtração.

A principal diferença entre os processos de desidratação é que em meios naturais a remoção é feita pela evaporação da água, ocorrendo assim de forma mais lenta necessitando um longo tempo de exposição do material as condições de desidratação. Sendo assim os processos em meio natural necessitam de maiores requisitos de área e de condições climáticas favoráveis ao seu processo (VON SPERLING, 2014).

Entre os processos naturais os mais utilizados são os leitos de secagem que em geral são constituídos em formato de tanques retangulares, projetados para receber o lodo de digestores aeróbios ou anaeróbios. Nesse local ocorre a redução da umidade com a drenagem e evaporação da água que é liberada no período de secagem. Entretanto, esses processos são



recomendados apenas em estações de pequeno porte devido à necessidade de grandes áreas para sua instalação (JORDÃO e PESSÔA, 2014).

Os processos mecânicos são baseados na compactação ou de centrifugação desse material ocorrendo assim de forma acelerada. Esse processo é mais indicado quando os requisitos de áreas são mais limitados ou as condições climáticas não são favoráveis. Em geral, em estações de tratamento de médio ou grande porte, adotam-se processos mecanizados no tratamento de lodo (JORDÃO e PESSÔA, 2014).

David (2002) relatou que os processos térmicos de secagem ou condicionamento são uma etapa posterior a etapa de desidratação. A finalidade destes processos é de remover a água residual presente no mesmo após etapas preliminares como o adensamento e a desidratação mecânica. Esta etapa é a última etapa de tratamento antes deste resíduo poder ser considerado um biossólido. Dentre esses processos destaca-se a secagem térmica.

### 3.5. Secagem térmica

O processo de secagem térmica pode ser definido como: “O processo de remoção de substâncias voláteis (umidade) 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).

Andreoli et al., (2006) argumentam que no processo de secagem térmica ocorre a redução da umidade do lodo através da perda de água por evaporação e da destruição de microrganismos. Nesse processo é removida apenas a quantidade de água do material e a maior parte dos sólidos totais permanece inalterada.

Sanin *et al.* (2010) explicam que o processo de secagem ocorre devido a transferência de massa e calor entre o lodo e o ar, através de movimentos da umidade da área mais concentrada para a área de menor concentração, sendo a difusão a força motriz deste movimento. Contudo, esta transferência de umidade não é constante até o final da secagem, a taxa de secagem pode variar de acordo com o tipo de lodo e de secador.

Durante o processo de secagem térmica devem ocorrer dois processos simultâneos. O primeiro é o que consiste na evaporação da umidade da parte superficial do lodo, que ocorre através da transferência de energia. O segundo é a transferência da umidade do lodo para sua superfície e sua consequente evaporação pelo primeiro processo (MUJUMDAR, 2006).

O processo de secagem térmica segue dois caminhos distintos. O mais comum, que utiliza energia não renovável, que agrega maior custo a esse sistema, e que tem uma alta

capacidade e velocidade de produzir resíduos com teores de sólidos acima de 90%. O outro sistema utiliza energia do sol, próximo aos leitos de secagem, apresentando baixo custo operacional e não necessitando de mão de obra especializada. Entretanto esse sistema é mais lento e de difícil obtenção de teores acima de 90%, embora ocorram citações que atingiram percentuais mais elevados em climas quentes (AKSOY; KURT; SANIN, 2015).

De acordo com Andreoli, Sperling e Fernandes (2001), o processo de secagem térmica pode atender diversos tipos de lodo, sendo uma das técnicas mais eficientes e flexíveis de remoção de umidade da torta. É recomendável o desaguamento dos lodos entre 15 a 30% de teor de sólidos antes de se aplicar esse processo. Os autores ainda citam que a fonte de calor para a secagem térmica deve ter origem externa, como biogás, gás natural, óleo combustível, entre outras fontes energéticas. Através desta técnica é possível se obter tortas com teores de sólidos de 90-95%.

De acordo com Aksoy; Kurt; Sanin (2015), a vantagem do uso da secagem térmica é que permite a redução de custos com transporte e destinação do resíduo, viabilizado a disposição de resíduos com alta carga orgânica na agricultura, pois o processo elimina organismos patogênicos, e produz matéria seca em menor volume agregando valor ao produto.

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

Entre os principais benefícios da utilização da secagem térmica destacam-se: redução significativa do peso e volume do lodo, com consequente redução dos custos de transporte e disposição final desse material; e a destruição de organismos patogênicos presente no lodo (FRANÇA JUNIOR, 2008).

Outra vantagem da aplicação de processos de secagem térmica é a possibilidade de reduzir etapas no tratamento de lodo, pois, os processos térmicos também promovem a estabilização e higienização desse material (BUX *et al*, 2001).

A principal desvantagem da secagem térmica são seus elevados custos de investimento e operacionais. Sua utilização é viável em casos onde a viabilidade econômica seja obtida pela redução do volume a ser disposto, o que reduz os custos de transporte e disposição final ou quando é necessária a produção de um lodo livre de patógenos para sua utilização, como fertilizante agrícola ou condicionador de solo (JORDÃO e PESSÔA, 2014).

Outra desvantagem inerente ao processo de secagem térmica é o uso de energia para realizar esse processo agregando custos operacionais. Com a utilização de fontes alternativas é possível a redução do consumo de energia, e com isto a diminuição do custo operacional (ANDREOLI; FERNANDES; SPERLING, 2001).

Há três formas de secagem térmica segundo Pinheiro (2012), descritas a seguir:

- Por convecção: quando há o contato direto do lodo com os mecanismos de transferência de calor, como gases aquecidos, podendo ser chamado também como secagem direta;
- Por condução: o lodo não entra em contato direto com o fluido aquecido, podendo ocorrer através de placas de troca térmica, e conhecido também como secagem indireta;
- Por radiação: utiliza energia radiante como fonte de calor.

### 3.5.1. Consumo de energia térmica

Para avaliar um sistema de secagem térmica o principal parâmetro a ser considerado, é a energia necessária para evaporação da água presente no lodo. Segundo Andreoli *et al.* (2001), em condições ideais são necessários 2.744 kJ (0,76 kWh) de energia para evaporar 1 kg de água presente no lodo.

Segundo David e Tsutiya (2002), de um modo geral, os equipamentos de secagem térmica necessitam para evaporar a água contida no lodo de 800 a 1.000 kcal/kg de água evaporada. A demanda de energia necessária também irá depender da eficiência dos equipamentos utilizados no processo de secagem, bem como as características do lodo processado.

### 3.5.2. Classificação dos secadores térmicos

Os métodos de transferência de calor também podem ser classificados como: métodos indiretos, diretos, radiantes ou mistos. Nos secadores diretos o ar quente entra em contato direto com o lodo e a transferência de calor se dá por convecção. Nos indiretos, a transferência de calor ocorre por condução através do contato do lodo com superfícies aquecidas por: ar quente, vapor ou óleo térmico. Nos secadores radiantes ou infravermelhos, a troca de calor se dá por radiação (DAVID, 2002).

Em relação ao modo de operação, os secadores térmicos podem ser classificados em contínuo ou em batelada, o sistema de secagem de lodo deve ser escolhido conforme a quantidade de material a ser processado. Park et al(2007) indica a operação em batelada para uma taxa de geração de material a ser seco entre 20 a 50 kg/h. Na faixa de 50 a 1.000 kg/h podem ser adotados os dois modos de operação, enquanto a taxa for superior a 1.000 kg/h, deve-se optar por secadores contínuos.

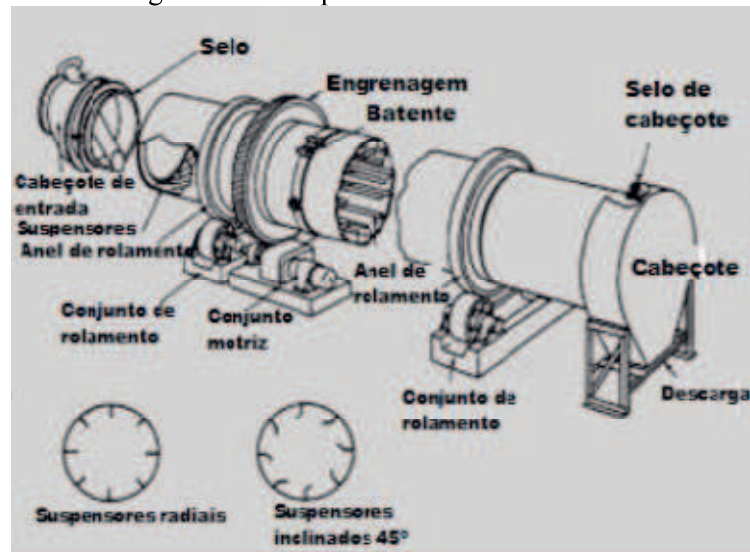
### 3.5.3. Tecnologias de secagem térmica

Entre as tecnologias de secagem térmica de lodo, destacam-se as tecnologias de secadores rotativos (diretos e indiretos), de esteira (túnel), de múltiplas bandejas e plantas de secagem solar (DAVID, 2002; METCALF e EDDY 2003; ANDREOLI *et al.* 2006; LOBATO 2011).

#### 3.5.3.1. Secadores rotativos

O processo de secagem neste tipo de secador ocorre em cilindros horizontais, levemente inclinados, nos quais o material a ser secado é introduzido na parte superior e progride até a outra extremidade, seja pela ação da gravidade ou por pás direcionadoras que são dispostas ao longo das paredes interna do cilindro rotativo (Figura 1). Os secadores rotativos podem ser divididos em diretos e indiretos, essa classificação é feita baseada na forma como ocorre à transferência de calor. É considerado direto quando o calor é trocado diretamente entre o gás e os sólidos e indiretos quando o chamado meio de aquecimento é separado do contato do material por meio de outro cilindro, assim o calor é transmitido através da superfície do cilindro e não através do contato direto.

Figura 1 – Exemplo de Secadores Rotativos



Fonte: Andreoli *et al*, 2006

### 3.5.3.1.1 Secadores rotativos diretos

Esse processo ocorre com a introdução do ar de secagem a temperaturas próximas à 500°C, o que permite a evaporação da umidade do lodo. Segundo Lobato (2011), o lodo que foi desaguado mecanicamente até chegar a teores de sólidos entre 25 e 40% é misturado com o lodo resultante do processo de secagem com o intuito de aumentar o teor de sólidos do lodo afluente ao secador para 40 a 50%. O lodo afluente percorre então pelo secador até sua extremidade de descarga, sendo auxiliado pelas aletas axiais que são instaladas ao longo das paredes internas do cilindro rotativo. Essas aletas são responsáveis por realizar o revolvimento do material, criando assim uma fina camada de partículas de lodo que irão secar rapidamente quando entrarem em contato com o gás quente presente no sistema rotativo (DAVID, 2002).

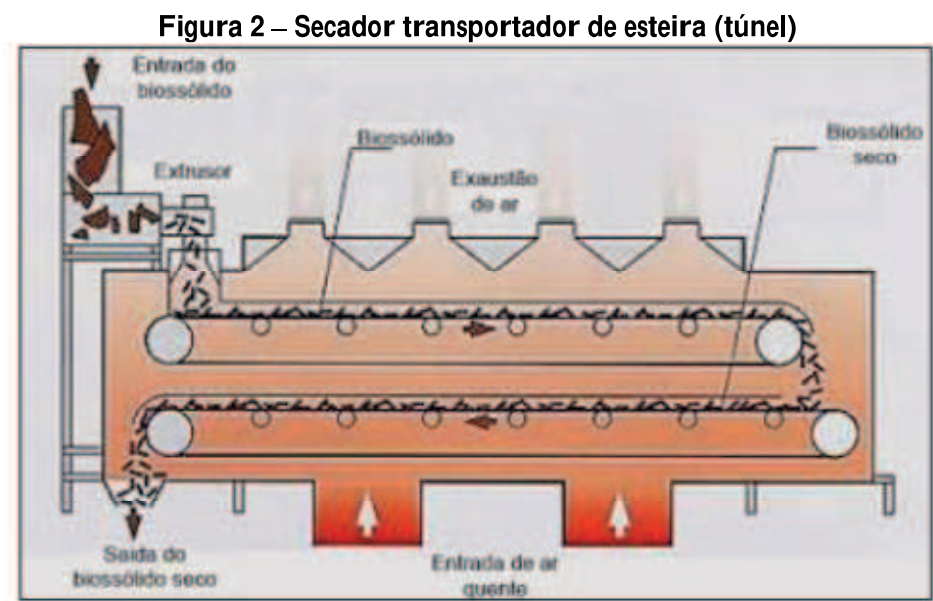
### 3.5.3.1.2. Secadores rotativos indiretos

Nesse processo o cilindro principal, onde está presente o lodo, é protegido por outro cilindro. Entre os cilindros circula o chamado meio de secagem, o qual transmite o calor para o lodo através da superfície do cilindro. Esse meio de secagem em geral é composto por vapor ou óleo térmico à temperatura em torno de 250°C (ANDREOLI *et al*, 2006). Nos secadores indiretos horizontais a carcaça contém no seu interior um agitador rotativo composto de uma série de elementos (discos, aletas ou pás) montados em um eixo rotativo (rotor). O eixo e os agitadores, geralmente ocultos, permitem que o meio de secagem circule através de seu núcleo, o

que possibilita o aquecimento das paredes que estão em contato com o lodo. Dessa forma, os agitadores não só transportam o lodo através do secador, mas também proporcionam uma superfície de transferência de calor que entra em contato com o lodo (DAVID, 2002).

### 3.5.3.2. Secadores tipo esteira (Túnel)

Os secadores do tipo esteira são aqueles onde o material passa por um sucessivo processo de secagem através da circulação constante de ar quente. Nesse processo o lodo úmido introduzido é transportado lentamente sobre a superfície da esteira transportadora, que se desloca dentro da câmara de secagem (ANDREOLI *et al* , 2006). O calor é diretamente aplicado através de uma série de ventiladores que insuflam o ar quente à temperatura de aproximadamente 150°C sobre o lodo que está sendo processado, o qual é conduzido de forma lenta por meio do túnel de aquecimento (Figura 2).



Fonte: Andreoli *et al.*, 2006

### 3.5.3.3. Secadores de soleiras múltiplas

Os secadores do tipo múltiplas bandejas são aqueles constituídos por uma câmara cilíndrica na posição vertical, que contém em seu interior uma série de soleiras estacionárias, dispostas horizontalmente. O processo de transferência de calor nesse tipo de secador é realizado de forma indireta, sendo transferido para as soleiras que em contato com o lodo

promovem o seu aquecimento. Após a secagem, o material é descarregado na sua parte inferior do secador em uma tremonha e transportado para silos de armazenamento (ANDREOLI *et al.*, 2002).

#### 3.5.3.4. Planta de secagem solar

A tecnologia que utiliza a radiação solar e o potencial do ar ambiente é a planta de secagem solar. Esse tipo de tecnologia não utiliza obrigatoriamente outra forma de energia para a realização da secagem do lodo (Figura 3). Entre as vantagens da utilização da planta de secagem solar, destaca-se: reduzido consumo de energia elétrica, quando comparado com os processos tradicionais de secagem; reduzido custo operacional associado e a obtenção de um produto final com alto teor de sólidos, que pode ser aplicado para fins diversos. Outra vantagem é que existe a possibilidade de associar planta de secagem solar com outras fontes de calor, como exemplo, a utilização do calor residual originado de processos de cogeração de energia elétrica e térmica. Dessa forma, é possível reduzir o tamanho das plantas de secagem solar, quando comparada com as que não utilizam outras fontes de calor (BUX *et al.*, 2001). Entretanto, esse processo de secagem possui algumas desvantagens entre elas destacam-se: a necessidade de grandes áreas para instalação das plantas de secagem e as variações climáticas que influenciam no desempenho de secagem ao longo do ano especialmente em regiões mais frias (BUX *et al.*, 2001).

**Figura 3: Esquema geral de uma planta de secagem solar**



Fonte: Catalogo HUBER, (2015).

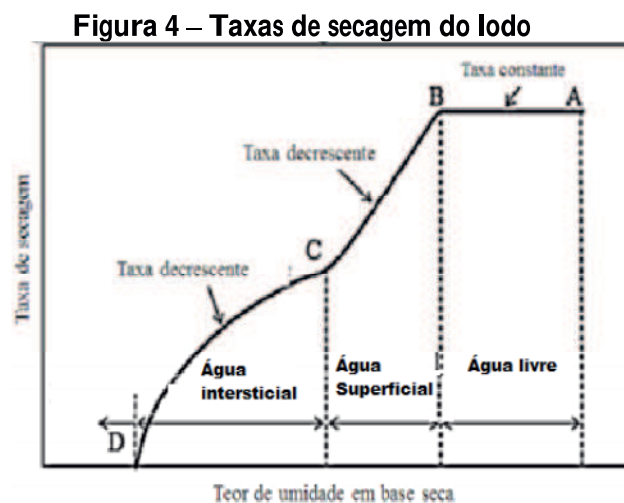
### 3.6. Fundamentos da secagem de lodo de esgoto

Para Foust *et al.* (1982), a secagem refere-se ao processo de transferência da umidade presente num sólido para uma fase gasosa não saturada. Deng et al. (2009) e Vaxelaire e Cézac (2004), relatam em seus trabalhos que o comportamento geral do lodo durante o processo de secagem, sob condições operacionais constantes, é dividido em quatro partes principais.

O comportamento é típico para maioria dos processos de secagem e é ilustrado na Figura 4. O primeiro momento da secagem é muito curto em virtude da adaptação do lodo as condições operacionais e, por essa razão, não é mostrado na Figura 4.

Após a estabilização das condições operacionais, a taxa de secagem é constante, como mostrado no período AB. A secagem ocorre sem influência direta do sólido na taxa de secagem como se fosse a evaporação de uma massa de líquido. A temperatura da superfície atinge a temperatura de bulbo úmido (McCABE *et al.*, 1993). Quando o sólido atinge a umidade crítica ( $X_C$ ), se inicia o primeiro período de secagem a taxa decrescente, período BC. A superfície fica gradativamente mais pobre em líquido, pois a velocidade do movimento do líquido para a superfície é menor que a velocidade com que a massa é transferida da superfície (McCABE *et al.*, 1993).

O próximo período, CD, também apresenta uma taxa de secagem decrescente. O último período de curva é um curto intervalo de tempo, em que a água ligada é removida e a umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ) é atingida (McCABE *et al.*, 1993).



Fonte: BENNAMOUN (2012).



### 3.7. Modelagem matemática do processo de secagem térmica

Vários modelos matemáticos são descritos na literatura com base 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 classificados em três principais categorias que são: teórica, semi-empírica e empírica. Segundo Afzal e Abe (2000), as aproximações teóricas relacionam a equação de difusão ou as equações simultâneas de transferência de calor e massa; as equações semi-empíricas relacionam as equações teóricas aproximadas; e as equações empíricas representam as operações de secagem dependendo apenas dos dados experimentais.

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

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

Page (1949) propôs uma pequena modificação no modelo proposto por Lewis (1921), que envolveu a adição de um termo exponencial na variável tempo, gerando um novo modelo exponencial e 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 & 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.

$$u = C \exp -K_0t + D \exp -K_1t \quad (6)$$

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 & Pabis (1961), logarítmico, entre outros. Os modelos foram ajustados à 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.

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

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1. Local da pesquisa**

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, em Campina Grande-PB (latitude: 7° 13' 50"; longitude: 35° 52' 52", a 551 m acima do nível do mar).

### **4.2. Coleta da amostra de lodo de esgoto**

O Lodo de Esgoto Sanitário estudado neste trabalho foi coletado de um reator UASB, o qual encontra-se instalado e monitorado nas dependências físicas da EXTRABES. Foram coletados 10,0L de lodo de esgoto sanitário proveniente deste reator, o qual foi acondicionado em recipiente plástico e preservado para realização de todas as etapas experimentais.

### **4.3. Determinação das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário**

A secagem do lodo de esgoto sanitário foi realizada em estufa convectiva (QUIMIS Modelo Q-314M222) nas seguintes temperaturas: 60, 70, 80 e 90 ± 2,5°C. Todos os ensaios de secagem foram realizados em triplicata com massa inicial de 500g de lodo de esgoto sanitário. Nos primeiros 60 min, pesava-se a bandeja em balança digital semianalítica (MARTE Modelo BL3200H – precisão: 0,01 g) num intervalo de 5 min, em seguida, até 2h o intervalo de pesagem passou a ser de 10 min e de 2h a 3h de 15 min, depois o intervalo passou a ser de 30 min até o final da secagem, isto é, até massa constante. O teor de umidade inicial em base seca (b.s.) da amostra de lodo foi determinado em paralelo ao acompanhamento da secagem citado anteriormente e foi determinado pelo método do peso constante em estufa a 105°C ± 2 °C.

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. Para estimar a umidade adimensional, inicialmente, determina-se a umidade em base seca em cada instante, a qual foi obtida a partir da Equação 8.

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

Onde:

$$M_{seca} = \frac{M_{úmida}}{X_{b.s \text{ inicial}} + 1}$$

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 do lodo “*in natura*” antes de ser submetido a secagem na estufa (g) e  $M_{seca}$  é a massa seca obtida em função da  $M_{úmida}$  e da umidade inicial da amostra em base seca ( $X_{b.s \text{ inicial}}$ ) a qual é obtida após a secagem em estufa a 105°C até peso constante.

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

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

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 adimensional do produto ( $u$ ) foi estimado 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:  $X_{i-1}$  é o conteúdo de umidade em b.s. (g/g) da medida anterior;  $X_i$ , conteúdo de umidade em b.s. (g/g) atual;  $t_i$ , tempo atual (min); e,  $t_{i-1}$ , tempo da medida anterior (min).

#### 4.4. Caracterização química do lodo de esgoto sanitário

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 no Quadro 2.

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

<b>Parâmetros</b>	<b>Métodos Utilizados</b>
Umidade (%)	Gravimétrico
Sólidos totais	Gravimétrico
Sólidos totais voláteis-STV	Gravimétrico
Carbono Orgânico Total -COT	Kiehl (1998)
Nitrogênio total - NTK	Método semi-micro Kjeldhal com digestão
Fósforo total -P	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 realizado a comparação das médias dos parâmetros por meio do teste de Tukey.

#### **4.5. Cinética de secagem do lodo de esgoto sanitário**

A cinética de secagem convectiva também pode ser caracterizada a partir dos dados do adimensional de umidade ( $u$ ) em função do tempo do processo. Os modelos descritos na Tabela 2 foram utilizados no ajuste aos dados experimentais. Os mesmos foram escolhidos por serem difusivos, e pelo fato de a maioria destes serem propostos para a modelagem matemática da secagem de produtos orgânicos, especialmente grãos como milho, arroz e soja. Foi averiguado se os modelos matemáticos conseguem com fidedignidade realizar a predição processo de secagem do lodo de esgoto sanitário.

**Tabela 2 – Modelos matemáticos para avaliação da cinética de secagem do lodo de esgoto sanitário.**

<b>MODELO</b>	<b>EQUAÇÃO</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>
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)

em que,

u – Umidade adimensional;

t - tempo de secagem, min;

k, ko, k1 - 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 ( $R^2$ ), da análise de variância (Teste F), e no menor valor da raiz do erro médio (RM) (SOUSA, 2003; ERTEKIN e YALDIZ, 2004; DOYMAZ, 2007).

As Equações 11 e 12 apresentam como foram calculados os valores do RM e do Teste F.

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

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

Onde:

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

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

Em que:  $X_{exp,i}$  é a umidade obtida experimentalmente,  $X_{pred,i}$ , a umidade predita pelo modelo,  $X_{exp,i}$  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.

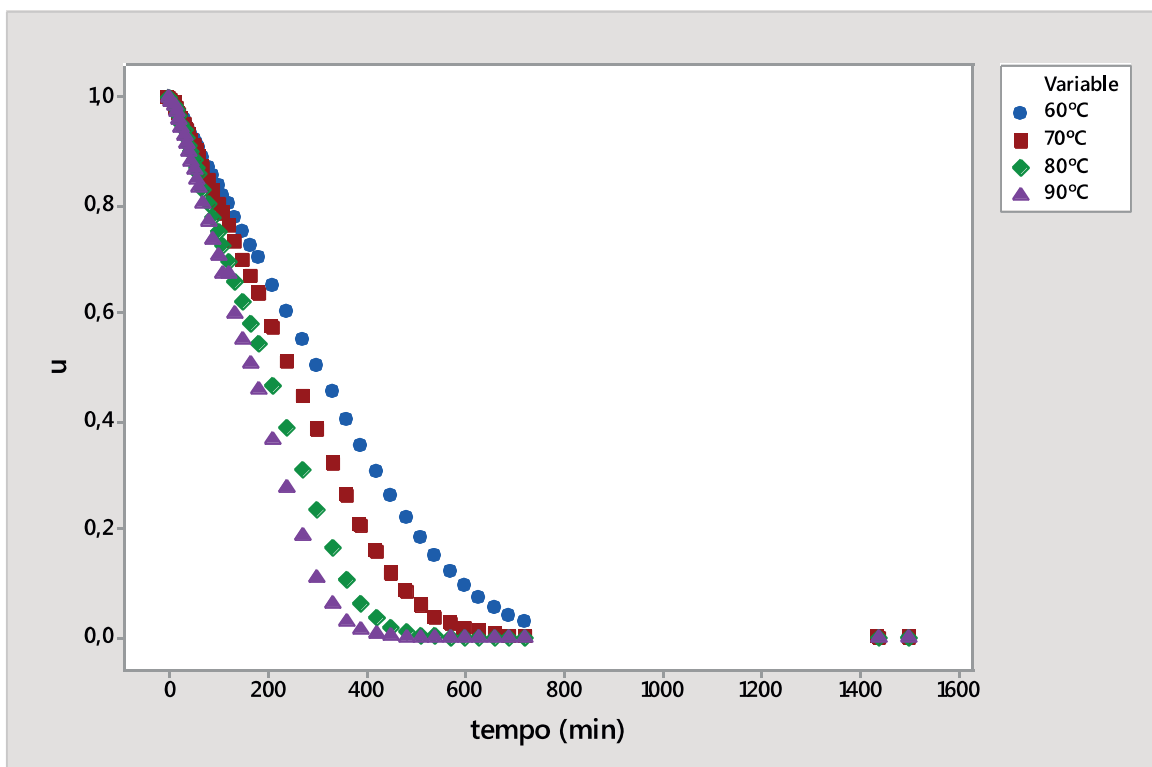
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Curvas de secagem do lodo de esgoto sanitário

A umidade inicial, em base seca, do lodo de esgoto sanitário foi obtida em estufa a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  por 24h. A média de umidade inicial em base seca do lodo de esgoto sanitário foi de  $12,15\text{gH}_2\text{O/g}$  sólidos secos. A umidade do resíduo, em base úmida, representa 92,51% de sua massa total.

Na Figura 5 estão sendo apresentadas as curvas de secagem obtidas experimentalmente nas temperaturas de 60, 70, 80 e  $90^\circ\text{C}$ . As curvas foram plotadas pelos dados da umidade adimensional em função do tempo de secagem. Todos os dados utilizados para construção das curvas de secagem e taxa de secagem encontram-se apresentados no Apêndice A. 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  $90^\circ\text{C}$  obtém-se a condição de equilíbrio de umidade em menor tempo de secagem. Observa-se que o aumento de  $30^\circ\text{C}$  na temperatura de secagem reduz o tempo médio de secagem para obtenção da umidade de equilíbrio em cerca de 300 minutos.

**Figura 5 – Curvas de secagem para o lodo de esgoto sanitário nas temperaturas de 60, 70, 80 e  $90^\circ\text{C} \pm 2,5^\circ\text{C}$ .**





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.

Foi observado que durante o processo de secagem do lodo de esgoto sanitário ocorreu a quebra ou fissuras da torta (Figura 6), isso aumenta a transferência de calor e massa no processo de secagem. Tal processo também foi relatado e visualizado no trabalho de Serenotti (2009).

**Figura 6 – Fissuras na torta de lodo apresentadas no decorrer do processo de secagem.**



Fonte: Autor

Na Figura 7 estão sendo apresentadas as curvas de taxa de secagem ( $R$ ) para a avaliação da influência da temperatura no processo de secagem, obtidas a partir da derivação ponto a ponto dos dados de umidade adimensional em relação ao tempo em função da variação ponto a ponto da umidade em base seca.

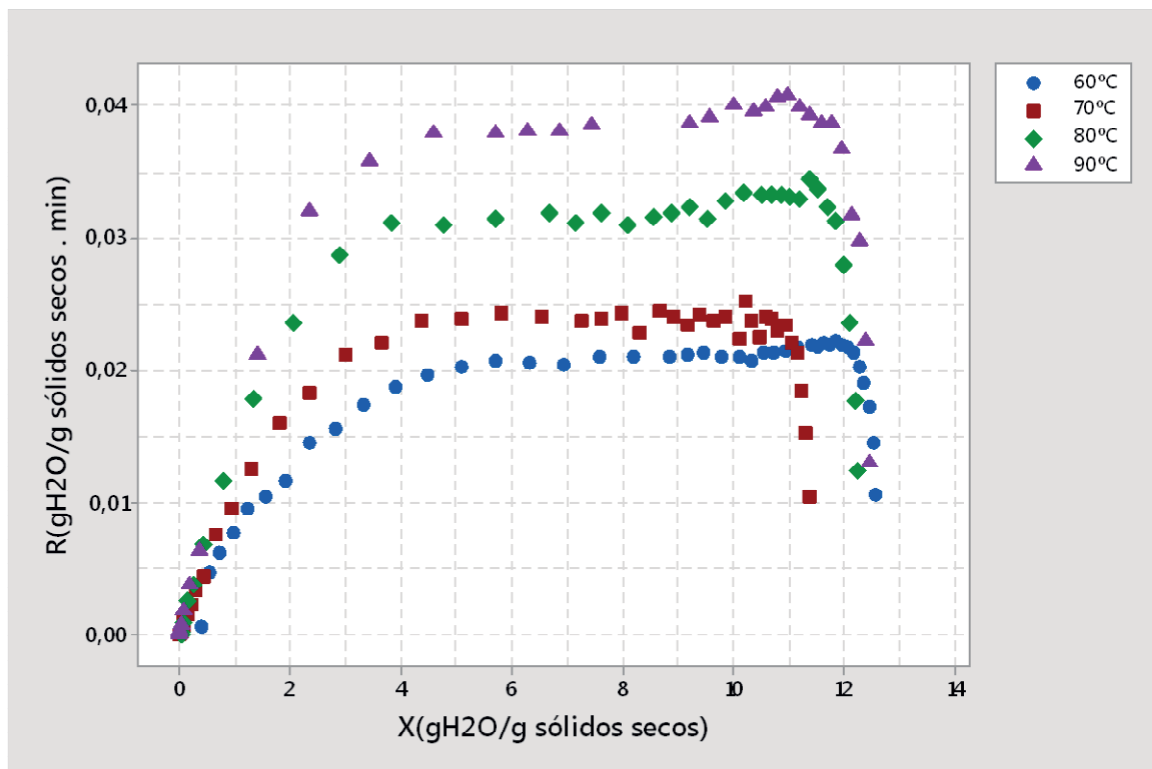
Observa-se a partir da Figura 7 que as curvas de taxa de secagem apresentaram três períodos bem definidos do processo de secagem. O período inicial refere-se ao processo de acondicionamento do material ao processo de secagem. Após o período de acondicionamento e estabilização do lodo as condições de 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. Por

fim, a taxa de secagem tem a tendência a zero até atingir a umidade de equilíbrio do lodo de esgoto sanitário.

Nota-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).

A partir dos dados plotados na Figura 8 constata-se nitidamente que o aumento na temperatura gera um aumento na taxa de secagem deste material.

**Figura 7 – Curvas de taxa de secagem para o lodo de esgoto sanitário nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C ± 2,5°C .**



A partir dos tempos médios de secagem em cada temperatura estudada (60, 70, 80 e 90°C) foi estimado o custo médio de secagem deste material utilizando-se de estimativas de consumo médio em kwh da estufa utilizada. Na Tabela 3 estão sendo apresentados os custos estimados da secagem do lodo de esgoto sanitário em cada temperatura estudada.

**Tabela 3 – Estimativa do custo de secagem do lodo de esgoto sanitário para as temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C**

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

A partir dos dados apresentados na Tabela 3 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-se o custo efetivo da secagem em R\$0,23.

## **5.2. Caracterização química do lodo anaeróbio de esgoto sanitário *in natura* e após secagem.**

Na Tabela 4 estão sendo apresentados os dados da caracterização química do lodo de esgoto sanitário “*in natura*” e após secagem.

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.

As análises demonstradas nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C foram obtidas 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 médios da caracterização química do lodo de esgoto sanitário “in natura” e após secagem.**

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

Observa-se a partir dos dados que estão sendo apresentados na Tabela 4 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 na concentração dos seguintes nutrientes: COT, NTK e fósforo total.

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

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

**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 Fósforo total nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C**

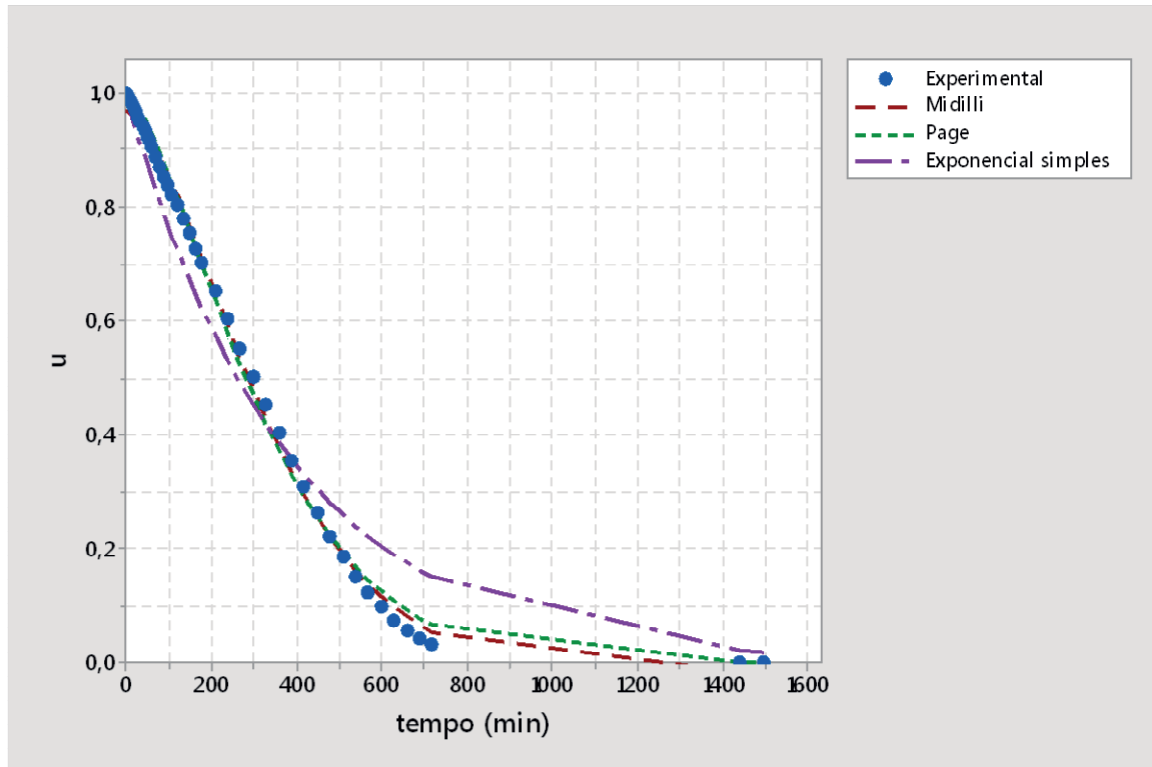
Temperatura (°C)	N	Média	Grupo
60	3	0,399	A
70	3	0,502	A
80	3	0,346	A
90	3	0,469	A

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 as diferentes temperaturas estudadas. Constatou-se que não houveram variações significativas nos valores médios dos nutrientes presentes no lodo de esgoto sanitário após ser submetido ao processo de secagem térmica.

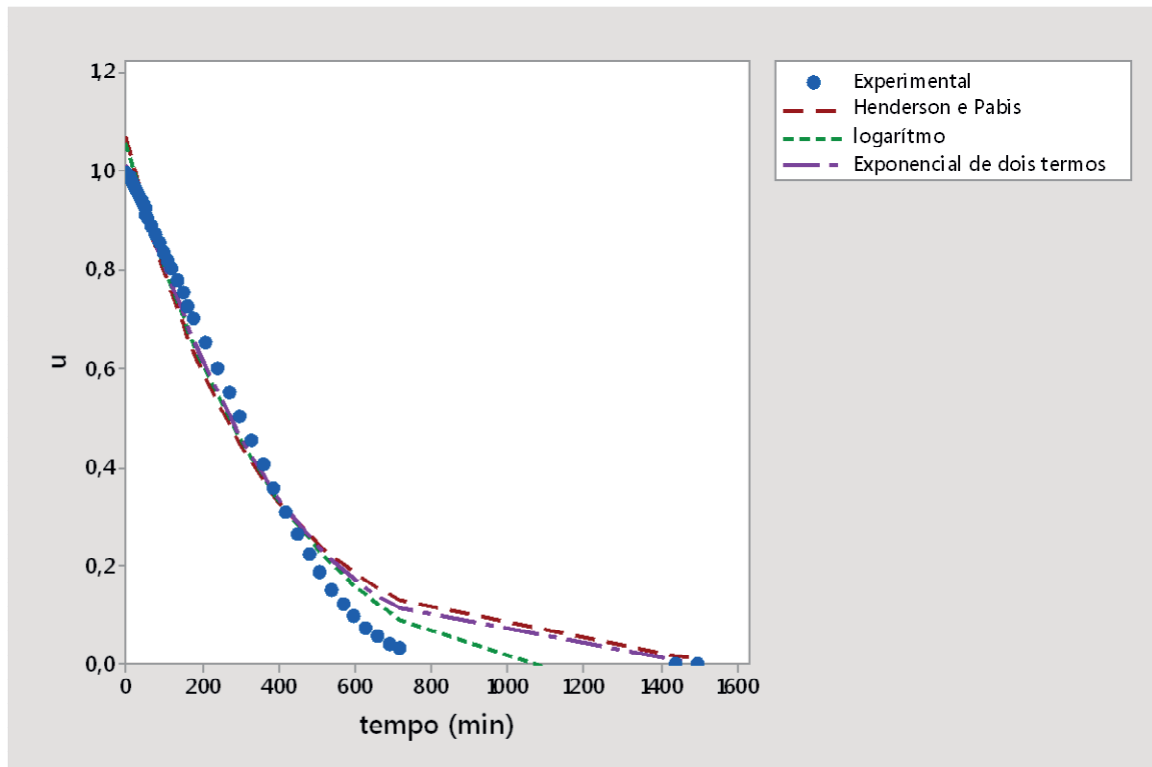
### **5.3. Ajuste dos modelos matemáticos ao processo de secagem do lodo de esgoto sanitário**

Nas Figuras 8 a 15 estão sendo 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. Os dados são apresentados nessas Figuras de forma agrupada, entretanto, para facilitar a visualização dos ajustes dos modelos aos dados experimentais são apresentados de forma individualizada no Apêndice B todos os modelos matemáticos estudados.

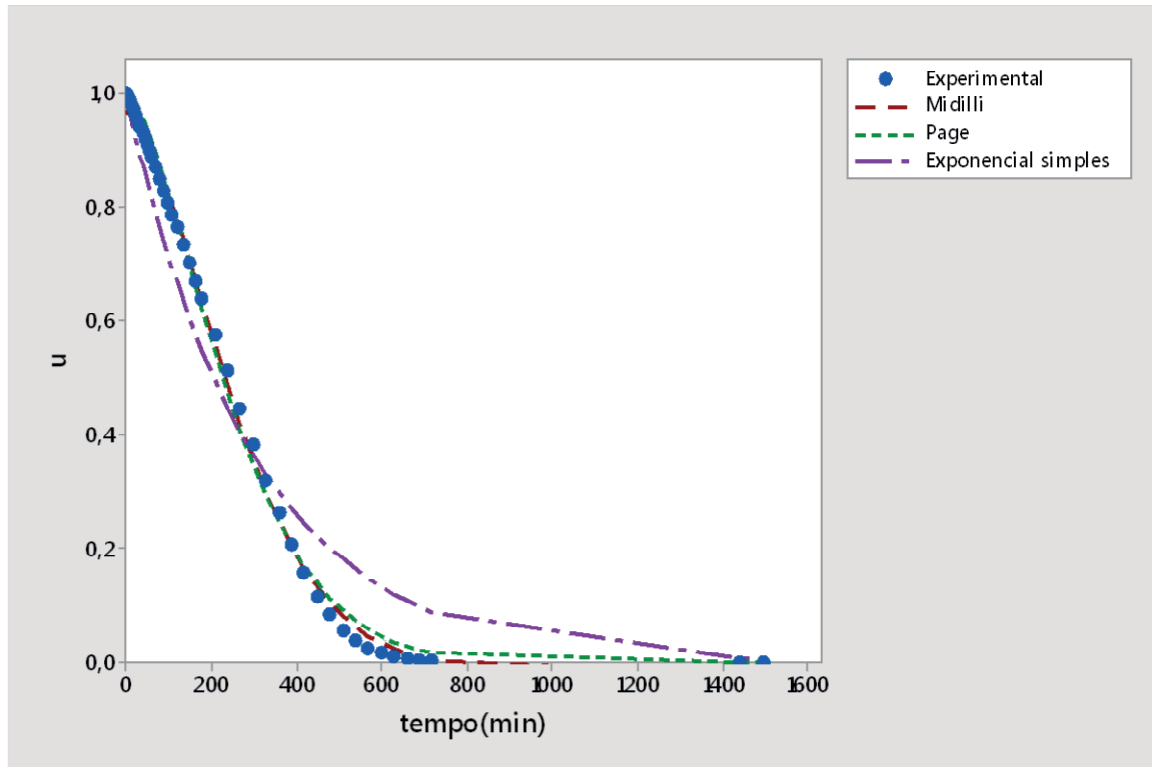
**Figura 8 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page e exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 60°C.**



**Figura 9 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis, logaritmo e exponencial de dois termos aos dados de secagem na temperatura de 60°C.**



**Figura 10 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page e exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 70°C.**



**Figura 11 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis, logaritmo e exponencial de dois termos aos dados de secagem na temperatura de 70°C.**

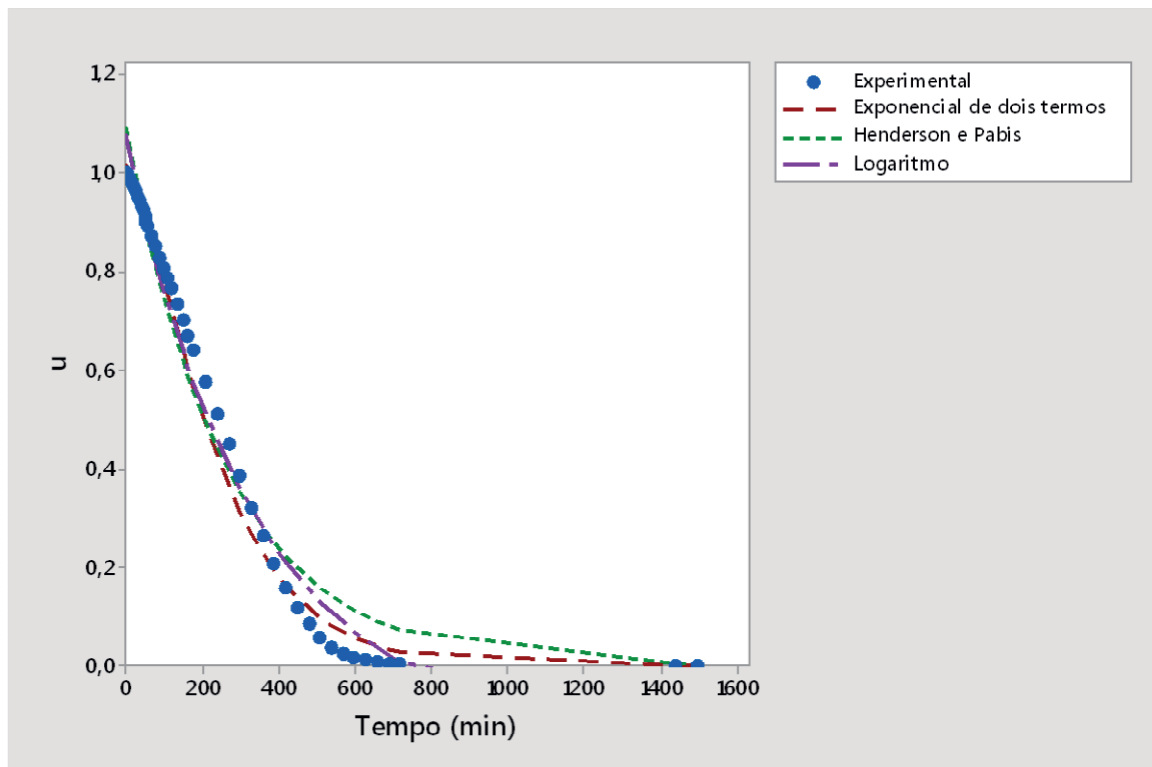


Figura 12 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page, exponencial de dois termos e exponencial simples aos dados de secagem na temperatura de 80°C.

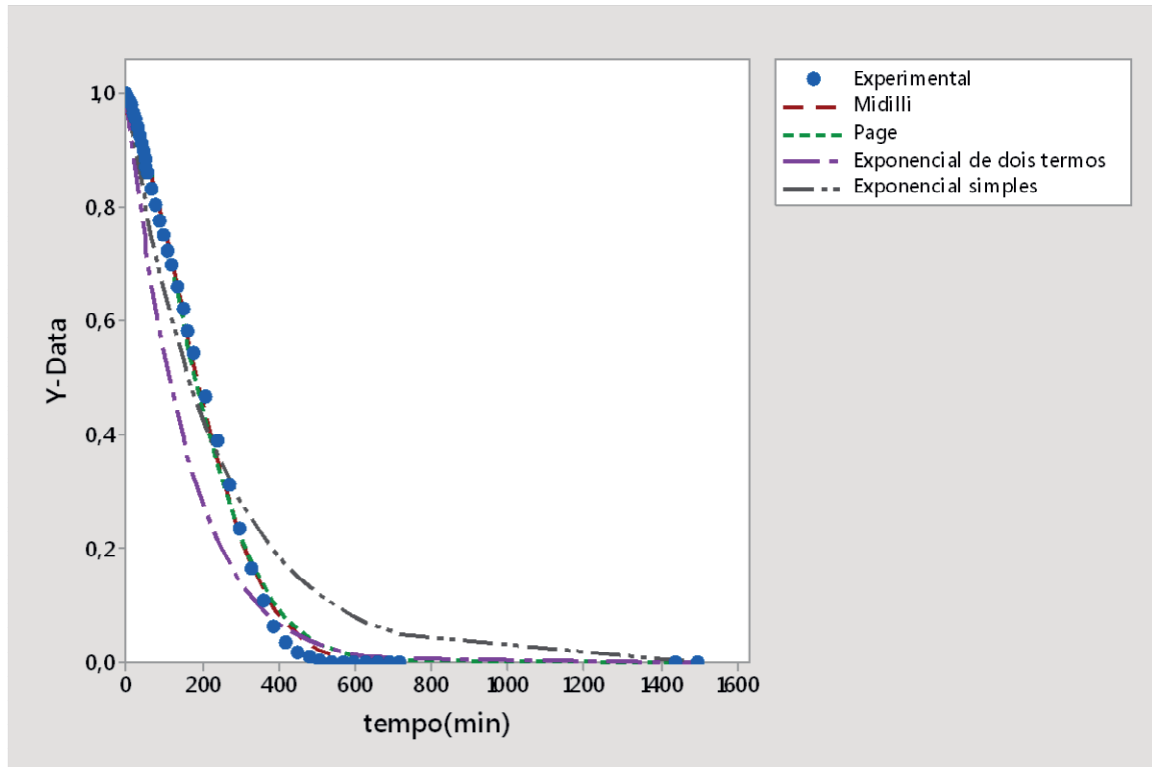
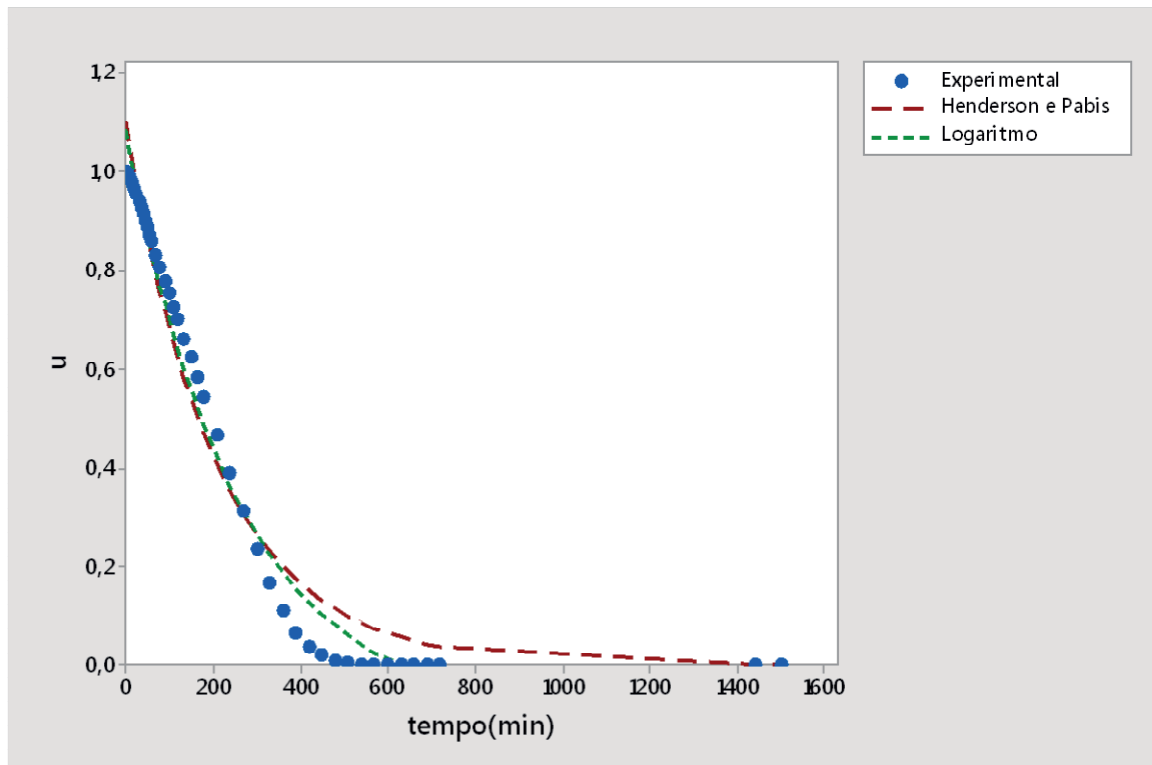
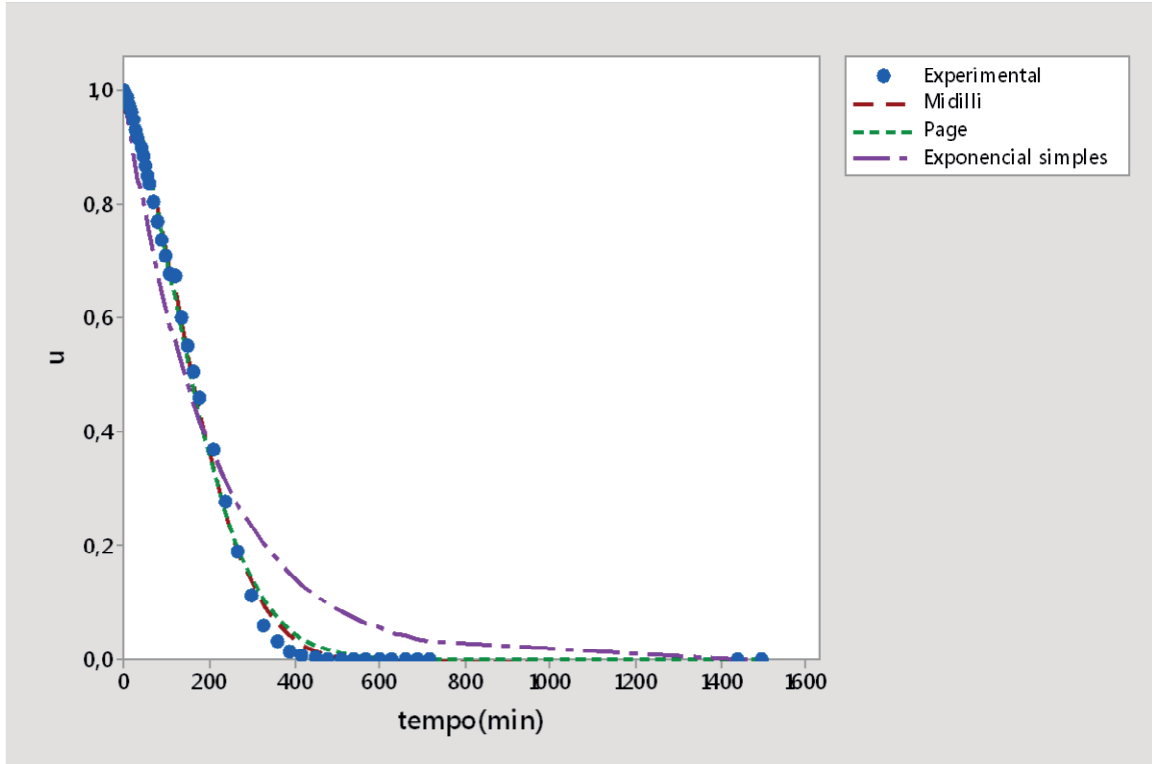


Figura 13 – Ajustes de modelos matemáticos de Henderson e Pabis e logaritmo aos dados de secagem na temperatura de 80°C.

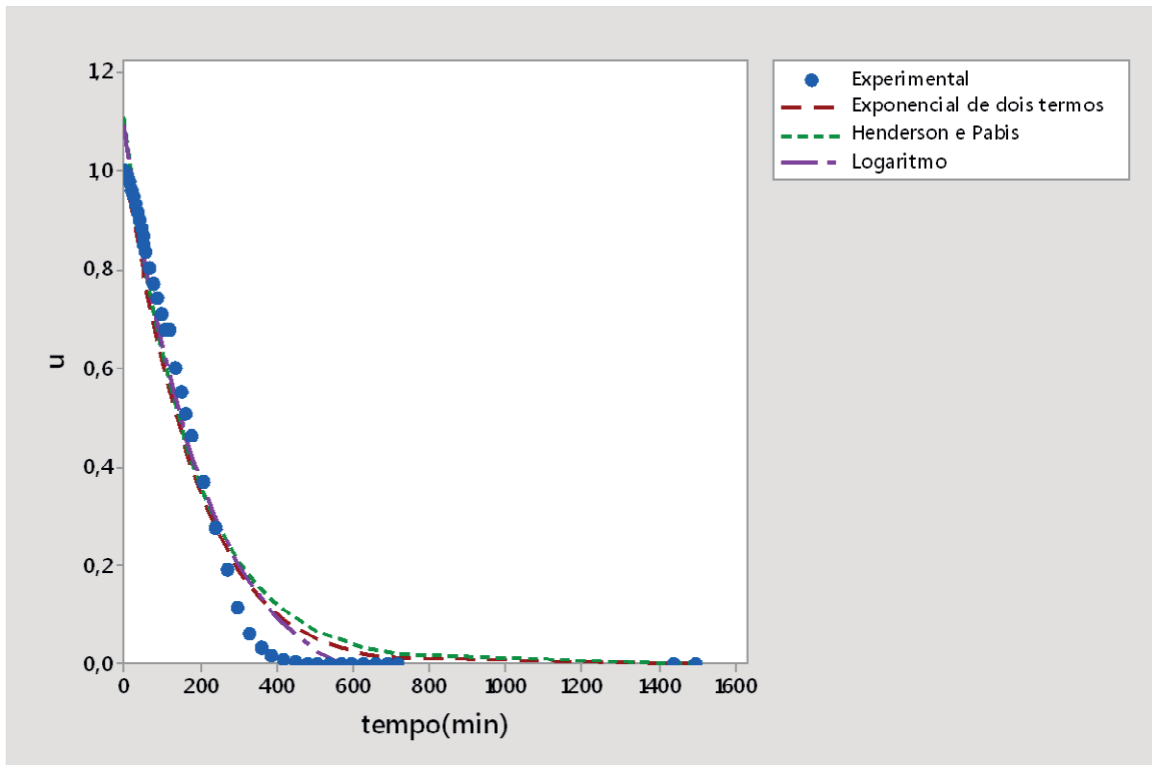




**Figura 14 – Ajustes de modelos matemáticos de Midilli, Page, exponencial simples e Wang e Singh aos dados de secagem na temperatura de 90°C.**



**Figura 15 – 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 8 a 15 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 em virtude que os valores preditos pelos modelos do teor de umidade inicial ( $X_0$ ), apresentaram valores maiores do que 1,0 (um).

Scalcon et al. (2015) avaliou 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 modelos foram considerados ineficazes na predição do processo de secagem do lodo anaeróbio de esgoto sanitário uma vez que estimam o valor da umidade adimensional inicial superior a 1,0 (um), desta forma não foram considerados aceitáveis para predição do processo de secagem estudado.

Analisando o comportamento dos modelos apresentados nas Figuras 8 a 15 pode-se inferir que o modelo exponencial simples também não se ajusta bem aos dados experimentais propostos, porém de toda forma foi feita o estudo estatístico para avaliar se o mesmo é estatisticamente aceitável para predizer o processo de secagem.

Na Tabela 8 estão sendo apresentados os parâmetros obtidos para os modelos matemáticos ajustados ao processo de secagem nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C e os dados da análise estatística ( $R^2$ , teste F e raiz do erro médio) para cada modelo estudado.

**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 <sup>2</sup>	Teste F	RM
Henderson e Pabis	60	A		K	0,977	246,47	0,054	
	70	1,07214	0,00292349					
	80	1,09233	0,00377869					
	90	1,10177	0,00475988					
Exponencial Simples	60	K				0,965	222,58	0,066
	70	0,00264212						
	80	0,00335364						
	90	0,00418895						
Page	60	K		v	0,996	1816,67	0,021	
	70	0,000187051	1,4561					
	80	0,000155459	1,5467					
	90	0,000202841	1,56198					
Exponencial dois termos	60	C	D	K0	K1	0,988	262,96	0,039
	70	7,73206	-6,71842	0,0043341	0,00469551			
	80	6,22019	-5,20484	0,00686888	0,00794839			
	90	4,16634	-3,17078	0,00836413	0,00925594			
Logaritmo	60	B		K	c	0,984	294,55	0,044
	70	1,19239	0,00232866	-0,13474				
	80	1,20457	0,002997	-0,130128				
	90	1,18666	0,00389867	-0,10369				
Midilli	60	A	B	K	n	0,998	1669,59	0,016
	70	0,970356	-0,000012942	0,0000902679	1,56897			
	80	0,967346	-0,000013932	0,0000724688	1,66891			
	90	0,965722	-0,000010995	0,0000928283	1,69365			
	60	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 variável 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  $F_{\text{tabelado}}$ . Este critério também foi utilizado por Scalcon et al. (2015) onde ele considerou todos os modelos analisados como preditivos para o processo de secagem solar do lodo proveniente de biodigestão anaeróbia. Avaliando-se desta 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 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.

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). Isto era esperado uma vez que com o aumento da temperatura reduz-se o tempo necessário para atingir a umidade de equilíbrio.

Os modelos de Midilli *et al.* (2002) e Page (1949) apresentaram valores médios de teste F de 1.686,46 e 1.919,39, respectivamente, para as temperaturas estudadas. Os valores de  $R^2$  médio para ambos modelos foi de 0,998 e 0,997, respectivamente. Esses modelos foram os que representaram com maior fidedignidade o processo de secagem do lodo de esgoto sanitário.

Serenotti (2009) avaliou modelos matemáticos que fizessem a modelagem do processo de secagem de lodo primário oriundo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) – Tatu, da empresa Águas de Limeira S.A., responsável pelo esgotamento sanitário da cidade de Limeira – SP. O modelo de Midilli *et al.* (2002) apresentou ajustes satisfatórios ao processo de secagem deste lodo primário.

Zhou e Jin (2016) avaliaram alguns modelos matemáticos para predição do processo de secagem por infravermelho 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.

Na Tabela 9 são 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	Fcalculado	Ftabelado	Teste F	R <sup>2</sup>
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 que estão sendo apresentados na Tabela 9 que os modelos apresentam valores de Teste F e R<sup>2</sup> 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. Como também foram os modelos que apresentaram menores valor de média quadrática residual, o que confirma que são modelos preditivos.

## 6. CONCLUSÃO

O lodo de esgoto sanitário apresentou um teor de umidade inicial alto de 92,51%, se enquadrando 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.

Neste trabalho foram analisados os diferentes modelos matemáticos apresentados na literatura para predição do processo de secagem térmica. Dentre os modelos matemáticos apresentados 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. Os modelos de Midilli et al. (2002) e Page (1949) apresentaram valores médios de teste F de 1.686,46 e 1.919,39, respectivamente, para as temperaturas estudadas. Os valores de  $R^2$  médio para ambos modelos, nas temperaturas de secagem utilizadas, foi de 0,998 e 0,997, respectivamente.

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 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.

## 7. REFERÊNCIAS

- ABE, T.; AFZAL, T. M. **Thin-layer in infrared radiation drying of rough rice**. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 67, p. 289-297, 1997.
- AGUSTINI, D.; ONOFRE, S. B. **Caracterização físico-química e microbiológica do lodo de esgoto produzido pela estação de tratamento de esgoto (ETE) de Pato Branco-PR**. Revista de Biologia e Saúde da UNISEP; Biology & Health Journal. v.1; n. 1 e 2, Paraná-PR, p. 82-95, 2007.
- AISSE, M. M. VAN HAANDEL A. C.; VON SPERLING, M.; CAMPOS, J. R.; CORAUCCI FILHO, B.; ALÉM SOBRINHO, P. **Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbio**. In CAMPOS, J. R. (Org). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro-RJ: ABES, 1999, 435 p. (Projeto PROSAB).
- 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.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, F. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG. 2001.
- ANDREOLI, C. V., TAMANIN, C. R., HOLSBACH, 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.
- ANGLIAN WATER. **Manual of good practice for utilisation of sewage sludge in agriculture**.Cambridgeshire, p.53, 1991.
- APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for examination of water and wastewater**. 22nd ed. Washington: American Public Health Association; 2012, 1360 p.
- ARLABOSSE, P.; CHAVEZ, S.; PREVOT, C. **Drying of municipal sewage sludge; from a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer**. Brazilian Journal of Chemical Engineering. v. 22, n. 2. São Paulo, p. 227-232, apr/june, 2005.
- BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J.. **Uso agrícola do lodo de esgoto: influências nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas**. SEMINA: Ciências Agrárias. v. 27, n. 4, Londrina-PA, p. 565-580, out/dez, 2006.
- BARROS NETO, B., SCARMÍNIO, I.S., BRUNS, R.E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995.

BENAMOUN L. **Solar drying of wastewater sludge: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, p.1061– 1073, 2012.

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. New York: Ed. Wiley, 2001.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n°. 375 de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 30 ago. 2006.

BUX, M.; BBAUMANN, R.; PHILIPP, W; CONRAD, T.; MUHLBAUER, W. **Class-A by solar drying recent experiences in Europe**. Proceedings of the WEFTEC (Water Environment Federation) Congress , Atlanta, 2001.

CARRINGTON, E.G. **Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction**. Final Report. Luxembourg: European Communities. september, 2001. 44 p.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 4ª ed., Editora AMGH, p. 902. 2012.

CHEN, J. B.; PENG, X. F.; TAO, T.; LEE, D.J. **Thermal drying of wastewater sludge with crack formation**. Water Science and Technology. v. 50, n. 9, IWA Publishing, p. 177-182, 2004.

CORRÊA, P.C., RIBEIRO, D.M., RESENDE, O., BOTELHO, F.M. **Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.3, p.665-670, 2006.

DANDAMRONGRAK, R., YOUNG, G., MASON, R. **Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models**. Journal of Food Engineering, v.55, p.139-146, 2002.

DAVID, A. C. **Secagem Térmica de Lodo de Esgoto, Determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2002. 1312 p.

DAVID, A. C.; TSUTIYA, M. T. **Secagem térmica de biossólidos na região metropolitana de São Paulo**. In: 21º. Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental, João Pessoa. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002.

DENG W. Y.; YAN J. H.; LI, X. D.; WANG F.; LU S. Y.; CHI Y., CEN, K. **Measurement and simulation of the contact drying of sewage sludge in a Nara-type paddle dryer**. Chemical Engineering Science, v. 64 p. 5117–5124, 2009.



DESCHAMPS, C.; FAVARETTO, N. **Aspectos agronômicos**. In ANDREOLI, C.V.; LARA, A.I.; FERNANDES, F. (ORGS). *Reciclagem de biossólidos; transformando problemas em soluções*. Curitiba-PR: SANEPAR, FINEP, 1999. p.181-192.

DOYMAZ, I. **Air-drying characteristics of tomatoes**. *Journal of Food Engineering*, v.78, p.1291-1297, 2007.

EL-HADJ, T. **Biodegradation of organic micropollutants in thermophilic and mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge**. Thesis. Universitat Barcelona. 215. 2006.

ERTEKIN, C., YALDIZ, O. **Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model**. *Journal of Food Engineering*, v.63, p.349-359, 2004.

ESCUDEY, M.; MORAGA, N.; ZAMBRA, C. & ANTILÉN, M. (2011). **Sewage sludge disposal and applications: self-heating and spontaneous combustion of compost piles - trace metals leaching in volcanic soils after sewage sludge disposal**. *Waste Water - Evaluation and Management*, 399-430. <http://dx.doi.org/10.5772/15580>.

FEACHEM, R. G; BRADLEY, D. J.; GARELICK, H.; MARA D. **Sanitation and disease health aspects of excreta and wastewater management**. Washington/USA: The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 1983. 501p.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W. **Principles of Unit Operations**, 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc., 1980.

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) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2008.

GOMES, S. B.V.; NASCIMENTO, C. W.A.; BIONDI, C. M. **Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.11, n.05, Campina Grande-PB, p. 459-465, set-out, 2007.

HALLEY, E.; MILLER, G. **A "backward" approach to sludge management**. *Water Engineering & Management*, v.9, p.36-39, 1991.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. **Grain drying theory. I. Temperature effects on drying coefficient**. *J. Agric. Eng. Res.*, v.6, p. 169-74, 1961.

HOGDES, C. R. **Laboratory drying study and applications for paper machine drying**. Hemisphere, p. 99-105, 1982.

HUBER. [www.huber-technology.com.br](http://www.huber-technology.com.br). **Secagem Solar e Regenerativa HUBER SRT**, 2015. Disponível em: <<http://www.hubertechnology.com.br/br/produtos/tratamento-de-lodo/secagem/secagem-solar-e-regenerativa-huber-srt.html>>. Acesso em: Abril 2017.

IMHOFF, K. I.; IMHOFF, K. R. **Manual de tratamento de águas residuárias**. São Paulo/SP: Edgard Blucher Ltda, 2002, 301 p. (3ª reimpressão).

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.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014. 1087 p.

KARATHANOS, V.T.; BELESSIOTIS, V.G. **Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits**. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 74, p. 355-36, 1999.

KITAMURA, A. E.; ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; GONZALEZ, A. P. **Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo. V. 32, n. 1, Viçosa-MG, p. 405-416, jan/fev, 2008.

KORENTAJER, L. **A review of the agricultural use of sewage sludge: benefits and potential hazards**. *Water S.A.*, v.17, n.3, jul, p.189-196, 1991.

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.

LEWIS, W. K. **The drying of solid materials**. J. Ind. Eng., v. 5, p. 427-33, 1921

LOBATO, Livia Cristina de Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MADAMBA, P.S. **Thin layer drying models for osmotically pré-dried Young coconut**. Drying Technology, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.

MATTHEWS, P. J. **Sewage sludge disposal in the UK: A new challenge for the next twenty years**. Journal of the Institution of Water Environmental Management, v. 6, p. 551-559, 1992.

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.

METCALF E EDDY. **Wastewater engineer treatment disposal, reuse**. 4<sup>a</sup>ed. New York: McGraw- Hill Book, 2003, 1729 p.

METCALF & EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5<sup>a</sup>. Ed. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. Porto Alegre: AMGH, 2016, 1980 p.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. **A new model for single-layer drying**. *Drying Technology*, 20(7), 2002, pp. 1503–1513.

MIKI, M. K.; ALEM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A. C. **Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo**. In: **Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MOTTA LIMA, O.C., PEREIRA, N.C., MENDES, E.S. **Curvas generalizadas na análise da cinética de secagem de papel artesanal com ar ambiente em convecção forçada**, 30<sup>o</sup> ENEMP, UFSCAR, 2002.

MUJUMDAR, A.S.; YUE, P.L.; CHEN, G. **Dewatering and drying of wastewater treatment sludge**. *Handbook of Industrial Drying*. 3<sup>a</sup> ed., CRC Press. 1312 p., 2006.

MWITHIGA, G., OLWAL, J.O. **The drying kinetics of kale (brassica oleracea) in a convective hot air dryer**. *Journal of Food Engineering*, v.71, p.373378, 2005.

OZDEMIR, 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. **Conceitos de Processo e Equipamentos de secagem**. Campinas: 2007. 127 p. Disponível em < <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html> > acesso em 13 de abril de 2017.

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.

PINHEIRO, A. V. **Alternativas para destinação final do lodo gerado no tratamento de esgoto sanitário**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012.

POSSETTI, G. R. C., JASINSKI, V. P., ANDREOLI, C. V., BITTENCOURT, S., CARNEIRO, C. **Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte**. XV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2012.

RODRIGUEZ, L. **Methane potential of sewage sludge to increase biogás production**. Degree Project at Master Level. Royal Institute of Techonology (KTH), Stockholm, Sweden. 2011.

SANIN, F. D.; CLARKSON, W. W.; VESILIND, P. A. **Sludge Engineering: The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges**. 1. ed. United States of America, 2010.

SANTOS, A.D. **Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo**. Dissertação mestrado USP, São Paulo., 2003.

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 anaerobia**. 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.

SILVA, A. V. A.; VON SPERLING, M.; OLIVEIRA FILHO, J. M. **Avaliação das unidades de tratamento do lodo em uma ETE de lodos ativados convencional submetida a distintas estratégias operacionais**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 12, n.2, Rio de Janeiro-RJ: ABES, p. 127-133, 2007.

SOUSA, L.H.C.D. **Estudo da Secagem de Materiais Têxteis**, Maringá, 2003, Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Maringá.

SOUZA, W. G. de: **Pós-secagem natural de lodos de estações de tratamento de água e esgoto** s/ W.G, de Souza. – São Paulo, 2012 132p.

STORER, T. I.; USINGER, R. L.; STEBBINS, R. C.; NYBAKKEN, J. W. **Zoologia Geral**. 6ªed. São Paulo-SP: Companhia Editora Nacional, 1989. 816p.

TOFFOLI, C.M. **Análise da influência das variáveis do processo de secagem no coeficiente de contato térmico entre o papel e cilindro**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR, 2005.

USEPA. - United State Environmental Protection Agency. EPA/625/R-92/013; **Environmental regulations and technology; control of pathogens and vector attraction in sewage sludge Washington-US**.; Environmental Protection Agency, revised July, 2003, 119p.

VAN HAANDEL, A. C.; ALÉM SOBRINHO, P. **Produção, composição e constituição de lodo de esgoto**. In ANDREOLI, C. V. (Coord). Alternativas de uso de resíduos do saneamento; Biossólidos. Rio de Janeiro-RJ: ABES, 2006; 417p. (Projeto PROSAB).

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4 ed. Belo Horizonte. Editora UFMG. 2014.

VAXELAIRE J, CÉZAC P. **Moisture distribution in activated sludges: a review**. Water Research, v. 38 p. 2215–230, 2004.

WAGNER, A.O.; MALIN, C.; GSTRANTHALER, G.; ILLMER, P. (2009) **Survival of selected pathogens in diluted sludge of a thermophilic waste treatment plant and in NaCl-solution under aerobic and anaerobic conditions.** Waste Management, v. 29, n. 1, p. 425-429.

WANG, C.Y., SINGH, R.P. **Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying.** ASAE Paper No. 78-6505, ASAE, St. Joseph, MI, 1978.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN, H.I. **Mathematical modeling of thin-layer solar drying of sultana grapes.** Energy, v. 26, p. 457-465, 2001.

ZANOELO, E. F.; CELSO, G. M. D.; KASKANTZIS. **Drying kinetics of mate leaves in a packed bed dryer.** Byosystems Engineering, v.96, n.4, p.487- 494, 2007.

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.

## APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS DA UMIDADE ADMENSIONAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM NAS TEMPERATURAS DE 60, 70, 80 e 90°C

**Tabela 10 – Dados experimentais para construção das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário e para ajustes dos modelos matemáticos na temperatura de 60°C.**

Tempo (minutos)	Massa úmida(g)	UBS (Umidade em base seca)	u (Umidade adimensional)
0	500,0467	12,55987	1
5	498,1033	12,50726	0,995791
10	495,4333	12,43492	0,990009
15	492,2467	12,34855	0,983108
20	488,7467	12,25362	0,975528
25	485,0067	12,15223	0,967429
30	481,0633	12,04537	0,958889
35	477,0467	11,93649	0,950191
40	473,0067	11,82689	0,941442
45	468,91	11,71574	0,932571
50	464,8733	11,60628	0,923829
55	460,8	11,49579	0,915008
60	456,79	11,38704	0,906324
70	448,71	11,16794	0,888826
80	440,6633	10,94982	0,8714
90	432,7267	10,73462	0,854213
100	424,88	10,52191	0,83722
110	417,02	10,30884	0,820199
120	409,3933	10,10205	0,803682
135	397,7533	9,786474	0,778475
150	386,1333	9,471491	0,753311
165	374,3833	9,152966	0,727865
180	362,69	8,836006	0,702542
210	339,4267	8,205174	0,652163
240	316,2567	7,576937	0,601987
270	293,1067	6,948821	0,551855
300	270,5533	6,337397	0,503014
330	247,82	5,721175	0,453783
360	224,9733	5,101667	0,404306
390	202,5967	4,494877	0,355848
420	180,8867	3,905977	0,308834
450	160,15	3,343378	0,263929
480	140,9433	2,822258	0,222336
510	123,73	2,355782	0,185059
540	107,75	1,922062	0,150454
570	94,83	1,572087	0,122474
600	83,29667	1,259083	0,097499
630	72,76667	0,972742	0,074698
660	64,23667	0,741437	0,056225
690	57,47667	0,557993	0,041587
720	52,37333	0,419538	0,030535
1440	38,29333	0,037977	4,33E-05
1500	38,27333	0,037441	0

**Tabela 11 – Dados experimentais para construção das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário e para ajustes dos modelos matemáticos na temperatura de 70°C.**

Tempo (minutos)	Massa úmida(g)	UBS (Umidade em base seca)	u (Umidade adimensional)
0	500,04	11,36206	1
5	497,9633	11,30971	0,995471
10	494,8867	11,23375	0,988748
15	491,17	11,14152	0,980631
20	486,89	11,03507	0,971286
25	482,45	10,92451	0,961592
30	477,77	10,80756	0,951377
35	473,1633	10,69268	0,941321
40	468,3933	10,57348	0,930909
45	463,5933	10,45366	0,920432
50	459,0333	10,3409	0,91047
55	454,2533	10,22213	0,900032
60	449,1433	10,09594	0,888867
70	440,1367	9,871833	0,869201
80	430,4367	9,631311	0,848015
90	420,89	9,394645	0,827164
100	411,13	9,152252	0,80585
110	401,7033	8,918359	0,785262
120	392,0133	8,678419	0,764096
135	377,25	8,311987	0,731854
150	363,3467	7,968895	0,701475
165	348,6167	7,604347	0,669298
180	334,14	7,24595	0,637675
210	305,3833	6,533416	0,574863
240	276,4033	5,814651	0,511569
270	246,9667	5,086096	0,447266
300	217,9367	4,369206	0,383838
330	189,19	3,657897	0,321041
360	162,5033	2,99472	0,262766
390	136,9333	2,359665	0,206926
420	114,7967	1,811893	0,158568
450	95,44	1,332589	0,116286
480	80,21	0,958012	0,082999
510	68,55	0,671279	0,057514
540	59,40667	0,446951	0,037526
570	54,02667	0,317586	0,025745
600	49,99	0,220004	0,016909
630	47,14667	0,151648	0,010683
660	45,27667	0,106911	0,006586
690	44,05	0,077593	0,003899
720	43,29667	0,059685	0,002248
1440	42,28	0,035191	2,19E-05
1500	42,27	0,034945	0

**Tabela 12 – Dados experimentais para construção das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário e para ajustes dos modelos matemáticos na temperatura de 80°C.**

Tempo (minutos)	Massa úmida(g)	UBS (Umidade em base seca)	u (Umidade adimensional)
0	500,0367	12,24916	1
5	497,7033	12,18735	0,994937
10	494,3567	12,09866	0,987677
15	489,9	11,98066	0,978007
20	484,62	11,84085	0,966552
25	478,7033	11,68415	0,953716
30	472,59	11,52222	0,940453
35	466,2167	11,35346	0,926627
40	459,6933	11,18081	0,912474
45	453,46	11,01571	0,898951
50	447,2167	10,85029	0,885407
55	440,9433	10,68408	0,871797
60	434,6667	10,51778	0,85818
70	422,0967	10,18469	0,830909
80	409,48	9,850401	0,803538
90	397,0667	9,521531	0,776607
100	385,2167	9,207466	0,750899
110	373,03	8,88459	0,72446
120	360,98	8,565265	0,698318
135	343,09	8,091202	0,659507
150	325,5367	7,626181	0,621425
165	307,48	7,147664	0,582252
180	289,82	6,67978	0,543939
210	253,7567	5,724184	0,4657
240	218,1133	4,779028	0,388373
270	183,04	3,85006	0,312281
300	147,8567	2,917784	0,235951
330	115,2967	2,055173	0,165312
360	88,64333	1,349136	0,107489
390	68,48	0,814758	0,063747
420	55,33	0,46621	0,035221
450	47,73667	0,264874	0,018749
480	43,42667	0,150623	0,0094
510	40,64667	0,076946	0,00337
540	39,68667	0,0515	0,001287
570	39,29667	0,041165	0,000441
600	39,12333	0,036585	6,51E-05
630	39,09333	0,035786	0
660	39,09333	0,035786	0
690	39,09333	0,035786	0
720	39,09333	0,035786	0
1440	39,09333	0,035786	0
1500	39,09333	0,035786	0



**Tabela 13 – Dados experimentais para construção das curvas de secagem e taxa de secagem do lodo de esgoto sanitário e para ajustes dos modelos matemáticos na temperatura de 90°C.**

Tempo (minutos)	Massa úmida(g)	UBS (Umidade em base seca)	u (Umidade adimensional)
0	500,0267	12,43647	1
5	497,5967	12,37128	0,994742
10	493,4633	12,26036	0,985801
15	487,94	12,1111	0,973849
20	481,9933	11,9523	0,960978
25	475,1567	11,76826	0,946184
30	467,9633	11,57473	0,930619
35	460,7633	11,38116	0,91504
40	453,4567	11,1845	0,899231
45	446,0267	10,98452	0,883156
50	438,4467	10,78043	0,866758
55	430,8833	10,57713	0,850397
60	423,46	10,37729	0,834341
70	408,71	9,981036	0,802433
80	393,8033	9,580046	0,770189
90	379,2233	9,18877	0,738654
100	364,8233	8,801783	0,707506
110	350,32	8,412106	0,676137
120	349,4467	8,380377	0,674071
135	314,4867	7,448924	0,598626
150	292,89	6,86941	0,551912
165	271,57	6,297061	0,505796
180	250,26	5,724479	0,459704
210	207,8633	4,585185	0,368001
240	165,55	3,448389	0,27647
270	125,4133	2,371931	0,189643
300	89,52	1,41026	0,111983
330	66,03667	0,777255	0,061202
360	51,88333	0,395581	0,030587
390	44,87333	0,205861	0,015427
420	40,76	0,09592	0,006522
450	38,88	0,044692	0,002452
480	38,12333	0,023874	0,000814
510	37,90333	0,01772	0,000339
540	37,77333	0,014089	5,77E-05
570	37,74667	0,01331	0
600	37,74667	0,01331	0
630	37,74667	0,01331	0
660	37,74667	0,01331	0
690	37,74667	0,01331	0
720	37,74667	0,01331	0
1440	37,74667	0,01331	0
1500	37,74667	0,01331	0

## APÊNDICE B – APRESENTAÇÃO DOS AJUSTES DOS MODELOS MATEMÁTICOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS NAS TEMPERATURAS DE 60, 70, 80 e 90°C

Figura 16 – Ajuste do modelo exponencial de dois termos para a temperatura de  $60\pm 2,5^\circ\text{C}$ .

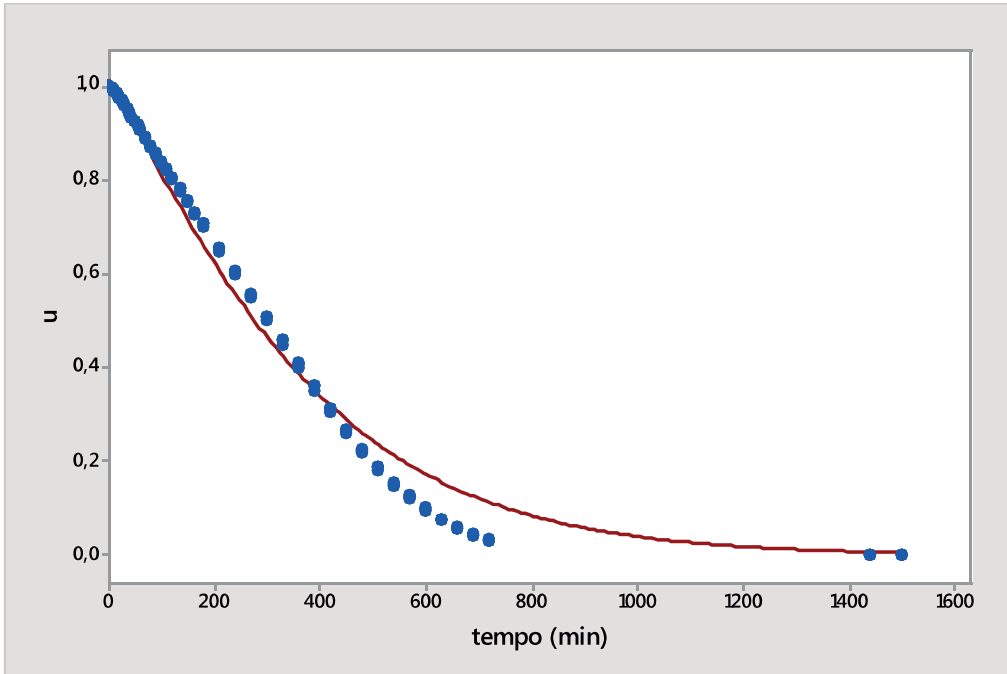
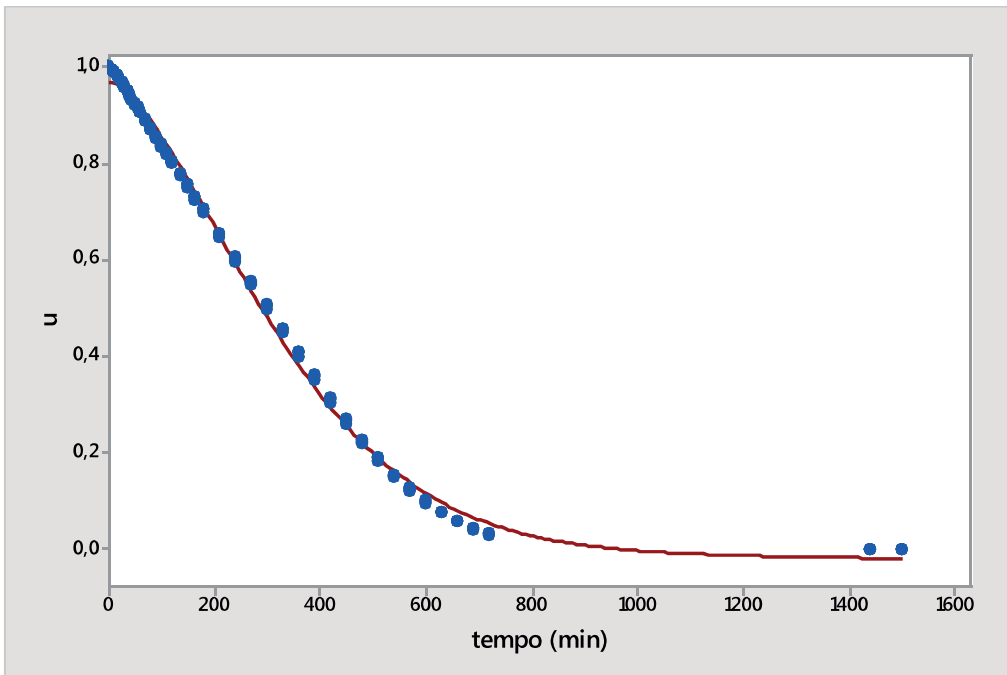
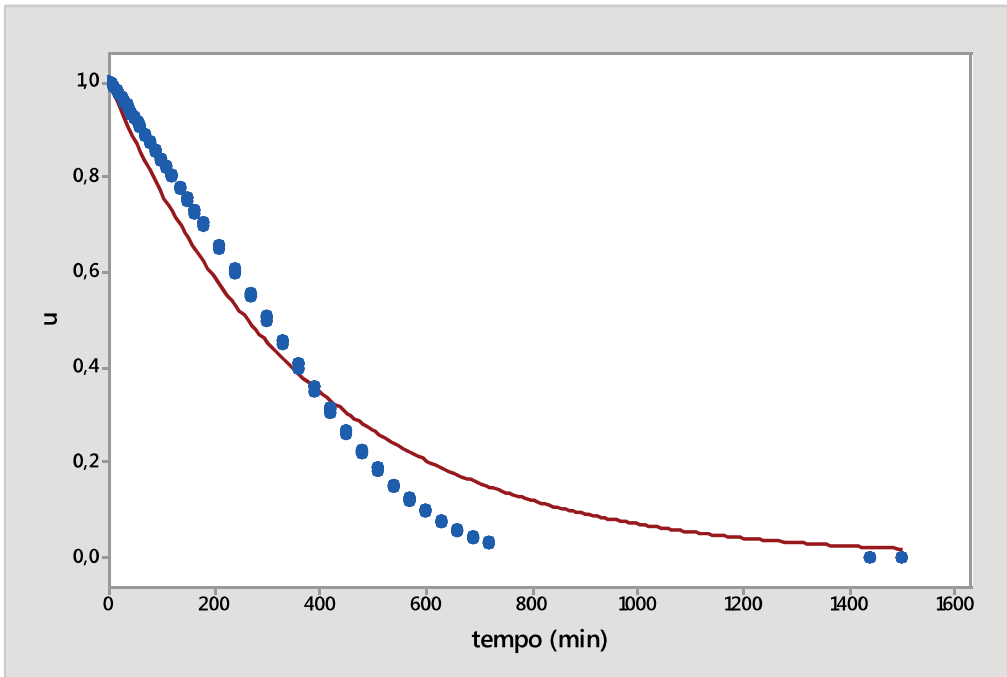


Figura 17– Ajuste do modelo de Midilli para a temperatura de  $60\pm 2,5^\circ\text{C}$ .



**Figura 18 – Ajuste do modelo exponencial simples para a temperatura de  $60\pm 2,5^\circ\text{C}$ .**



**Figura 19 – Ajuste do modelo de Henderson e Pabis para a temperatura de  $60\pm 2,5^\circ\text{C}$ .**

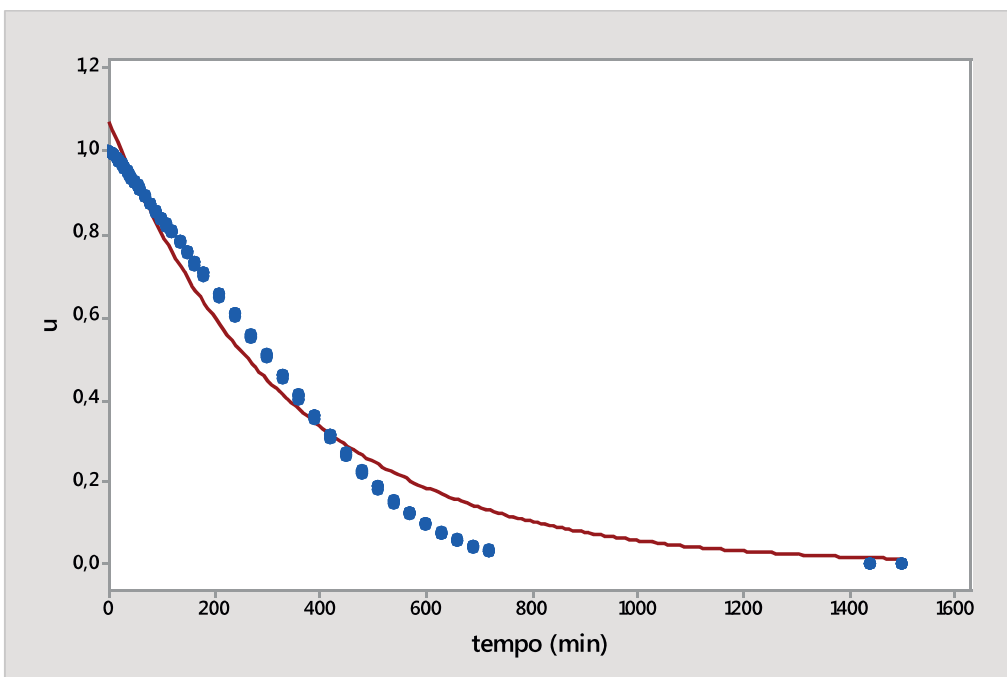


Figura 20 – Ajuste do modelo logarítmico para a temperatura de  $60 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

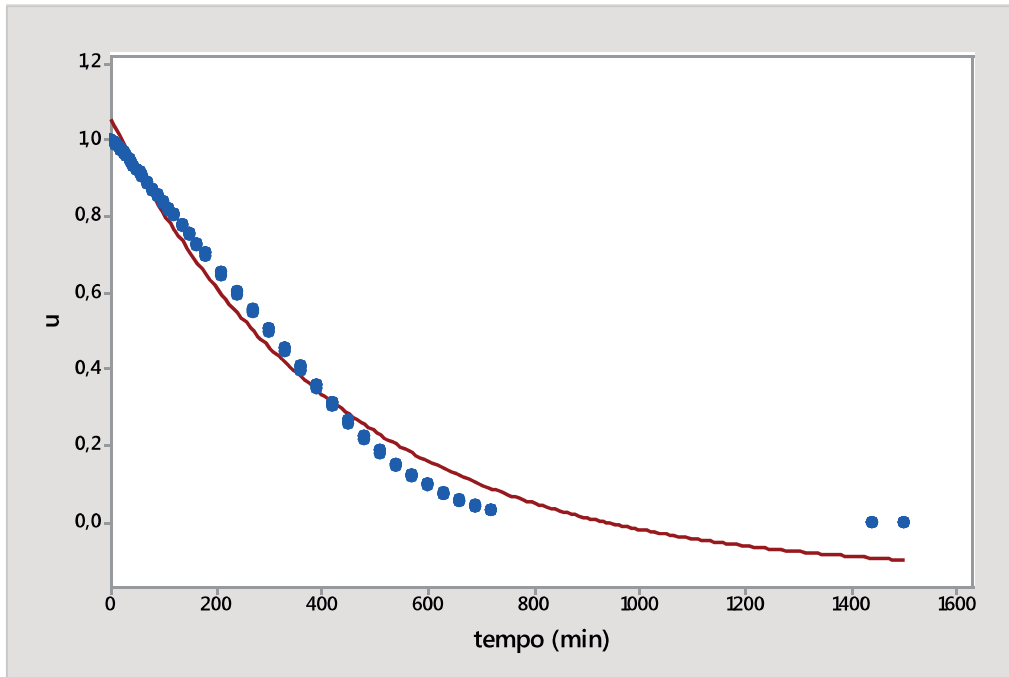


Figura 21 – Ajuste do modelo page para a temperatura de  $60 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

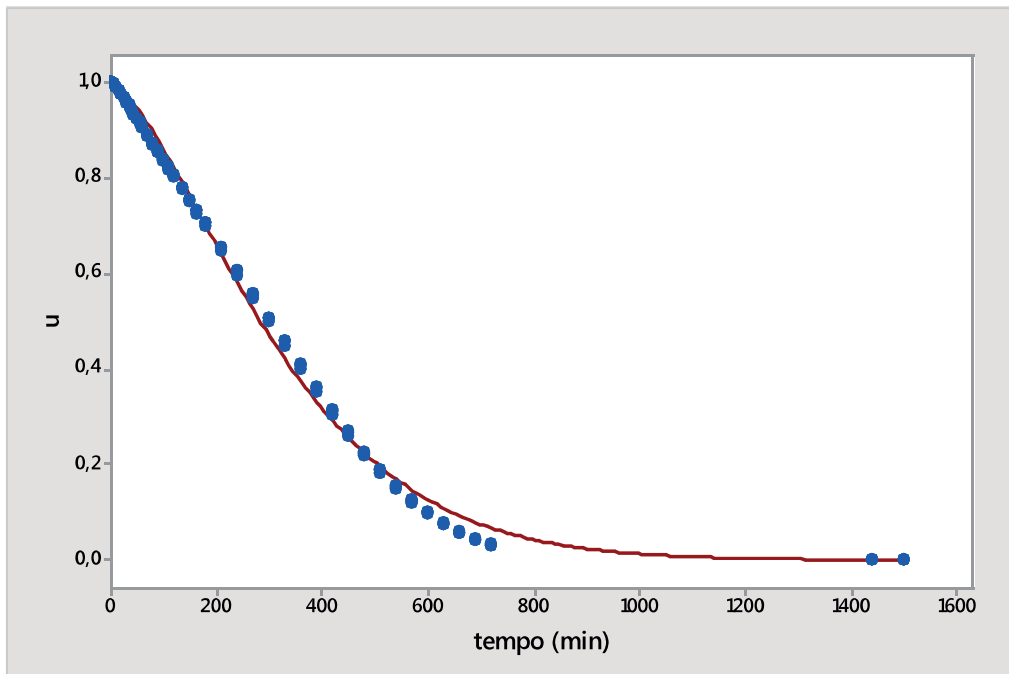


Figura 22 – Ajuste do modelo exponencial de dois termos para a temperatura de  $70 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

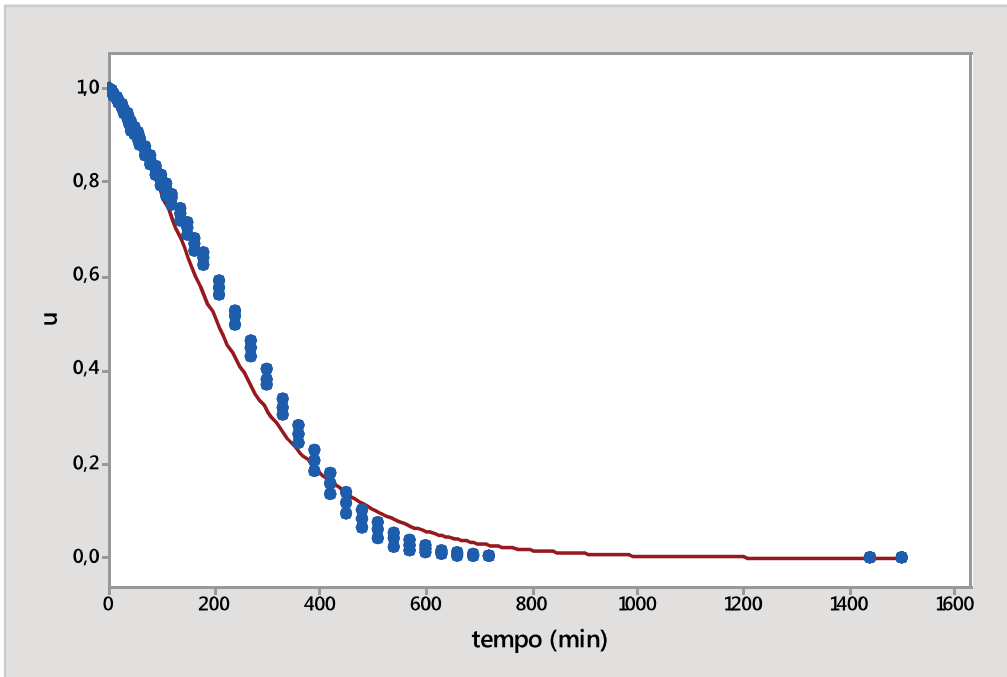


Figura 23 – Ajuste do modelo de Midilli para a temperatura de  $70 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

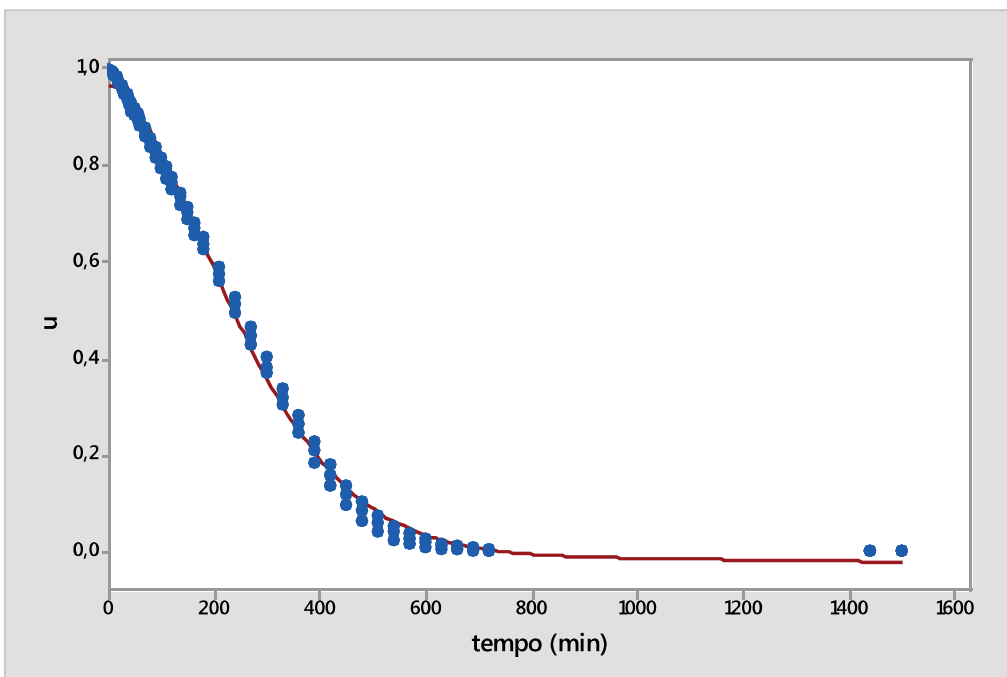


Figura 24 – Ajuste do modelo exponencial simples para a temperatura de  $70\pm 2,5^\circ\text{C}$ .

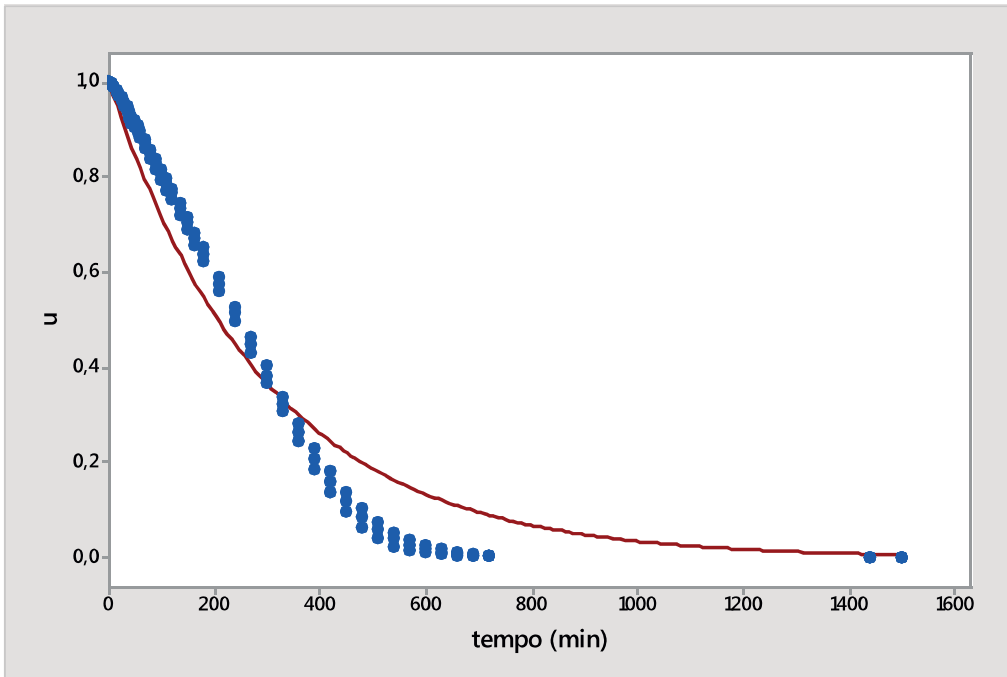


Figura 25 – Ajuste do modelo de Henderson e Pabis para a temperatura de  $70\pm 2,5^\circ\text{C}$ .

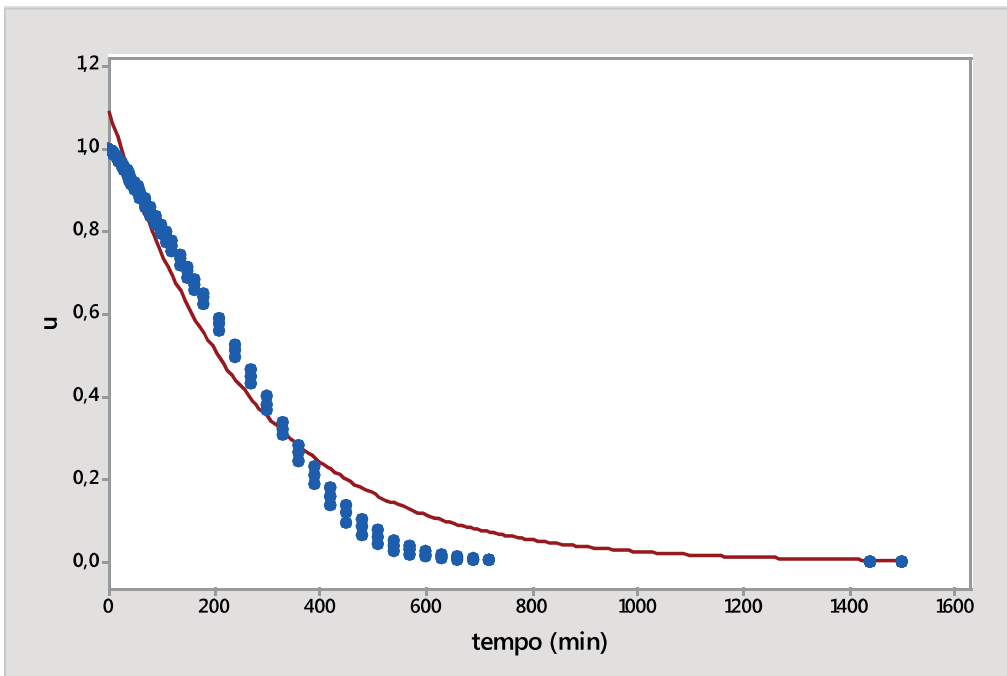


Figura 26 – Ajuste do modelo logarítmico para a temperatura de  $70 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

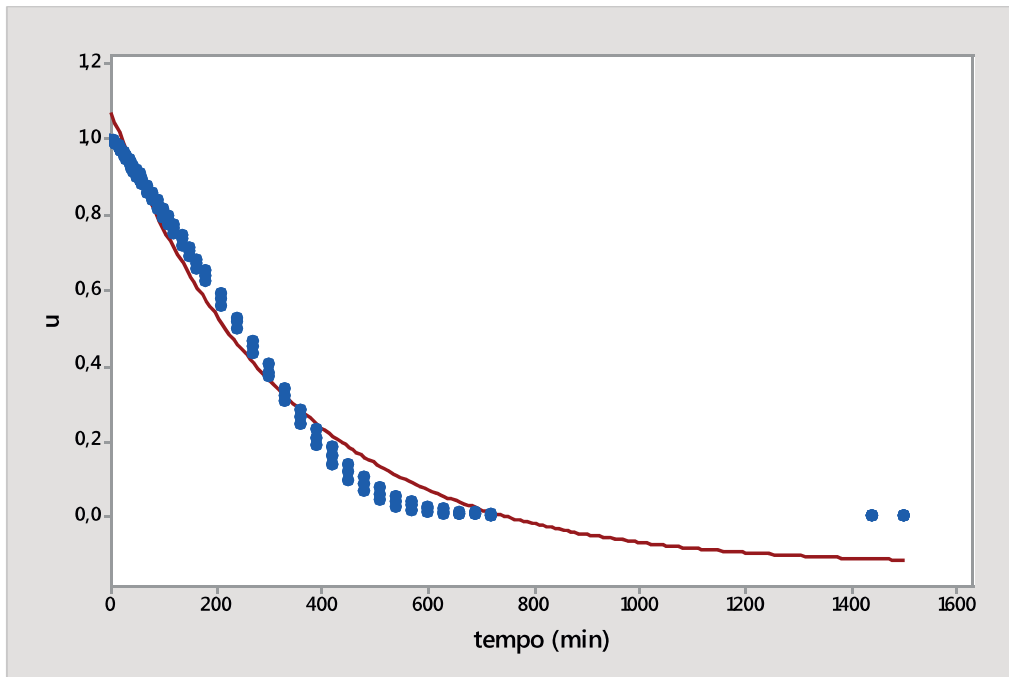


Figura 27 – Ajuste do modelo Page para a temperatura de  $70 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

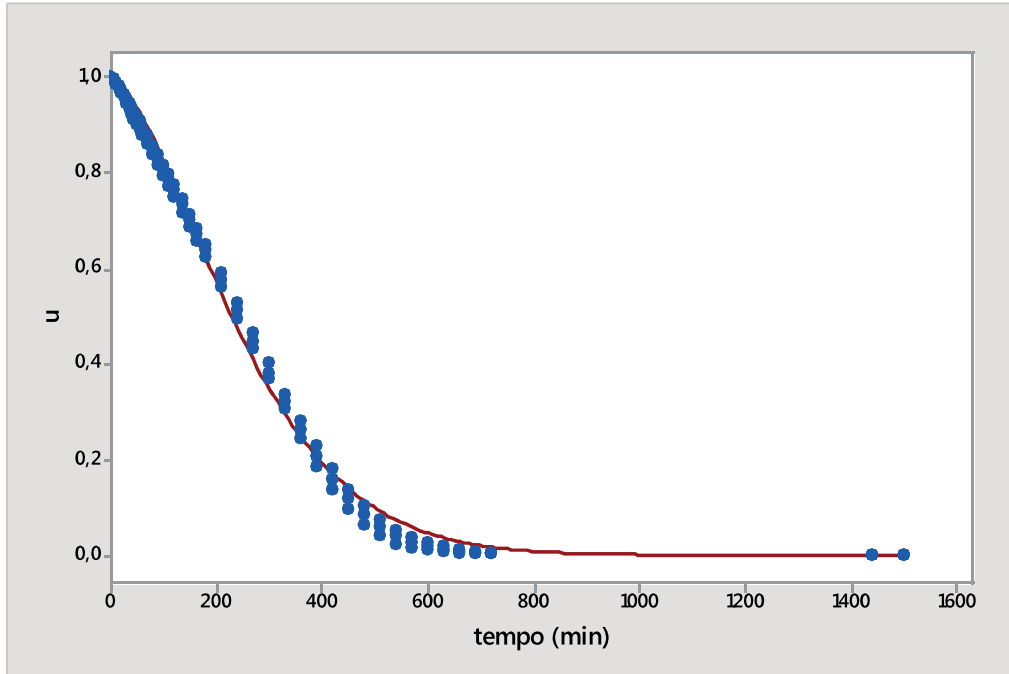


Figura 28 – Ajuste do modelo exponencial de dois termos para a temperatura de  $80 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

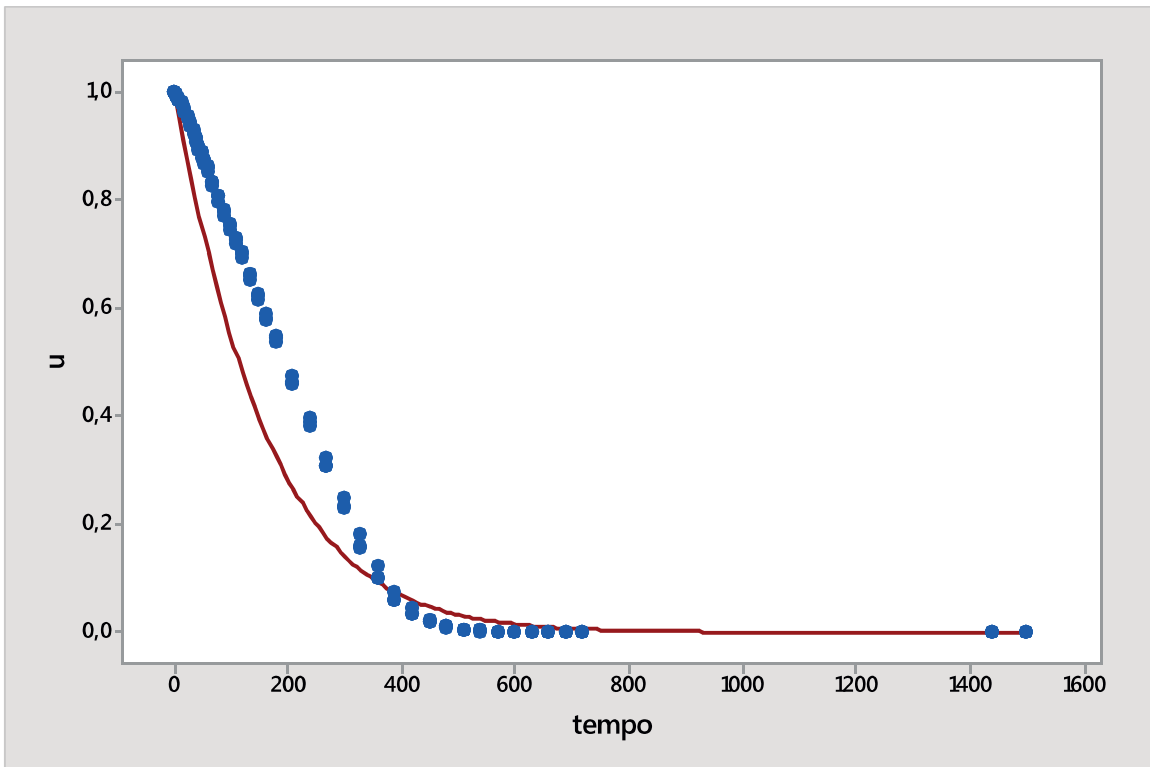


Figura 29 – Ajuste do modelo de Midilli para a temperatura de  $80 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

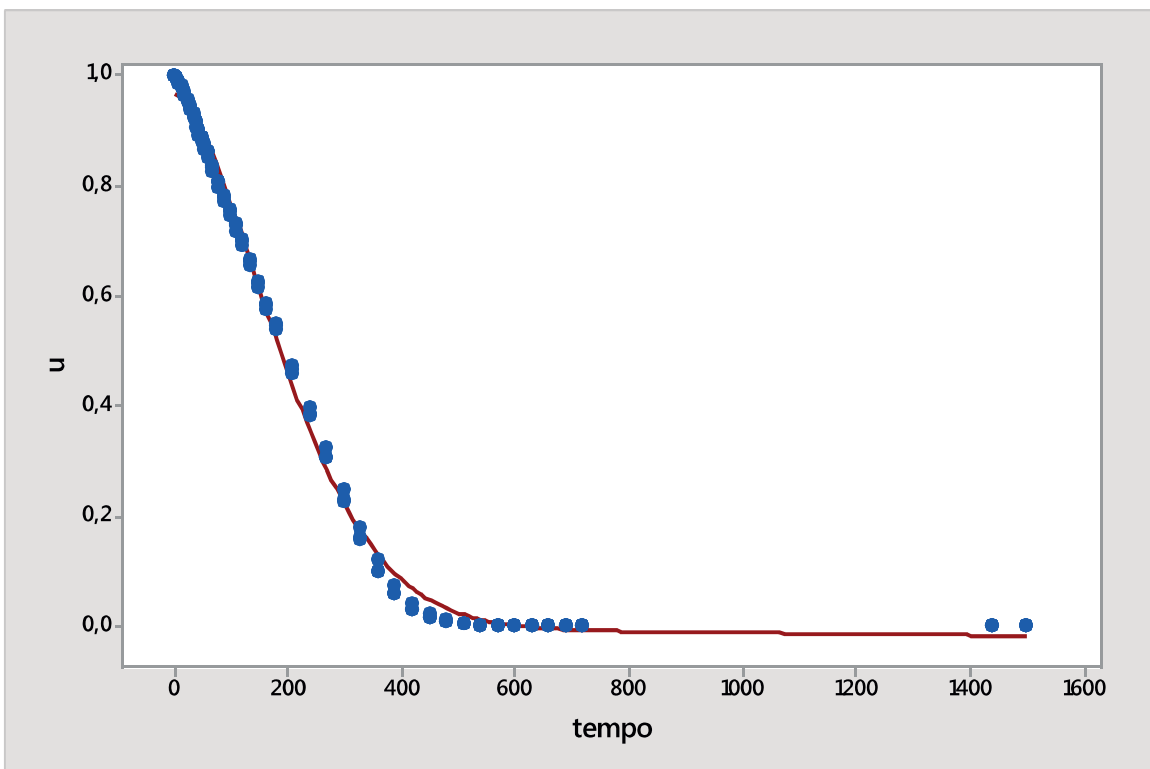




Figura 30 – Ajuste do modelo exponencial simples para a temperatura de  $80\pm 2,5^\circ\text{C}$ .

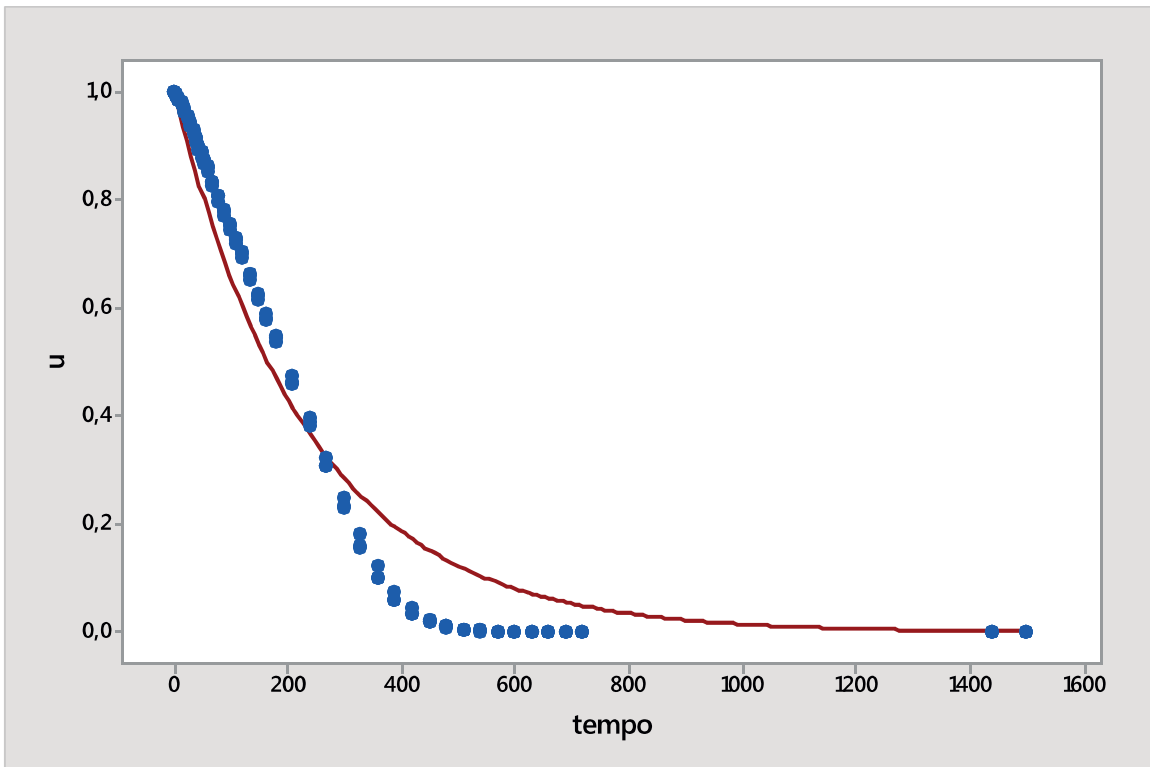


Figura 31 – Ajuste do modelo de Henderson e Pabis para a temperatura de  $80\pm 2,5^\circ\text{C}$ .

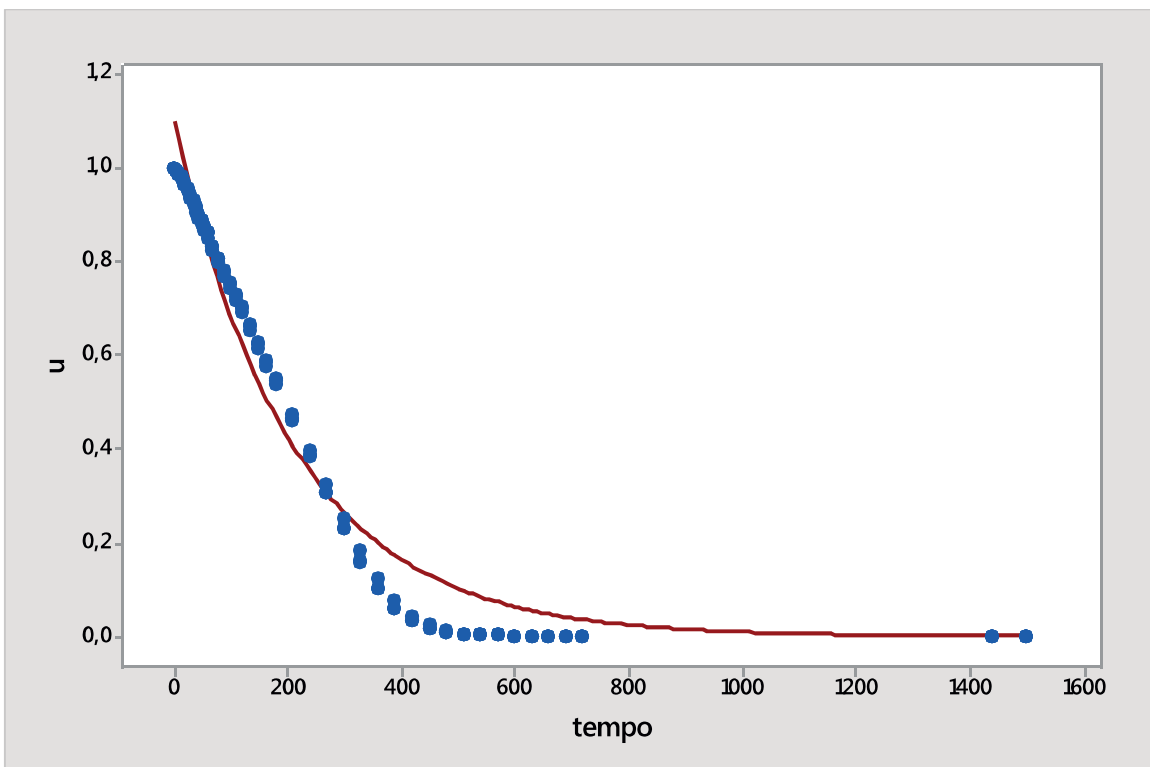


Figura 32 – Ajuste do modelo logarítmico para a temperatura de  $80 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

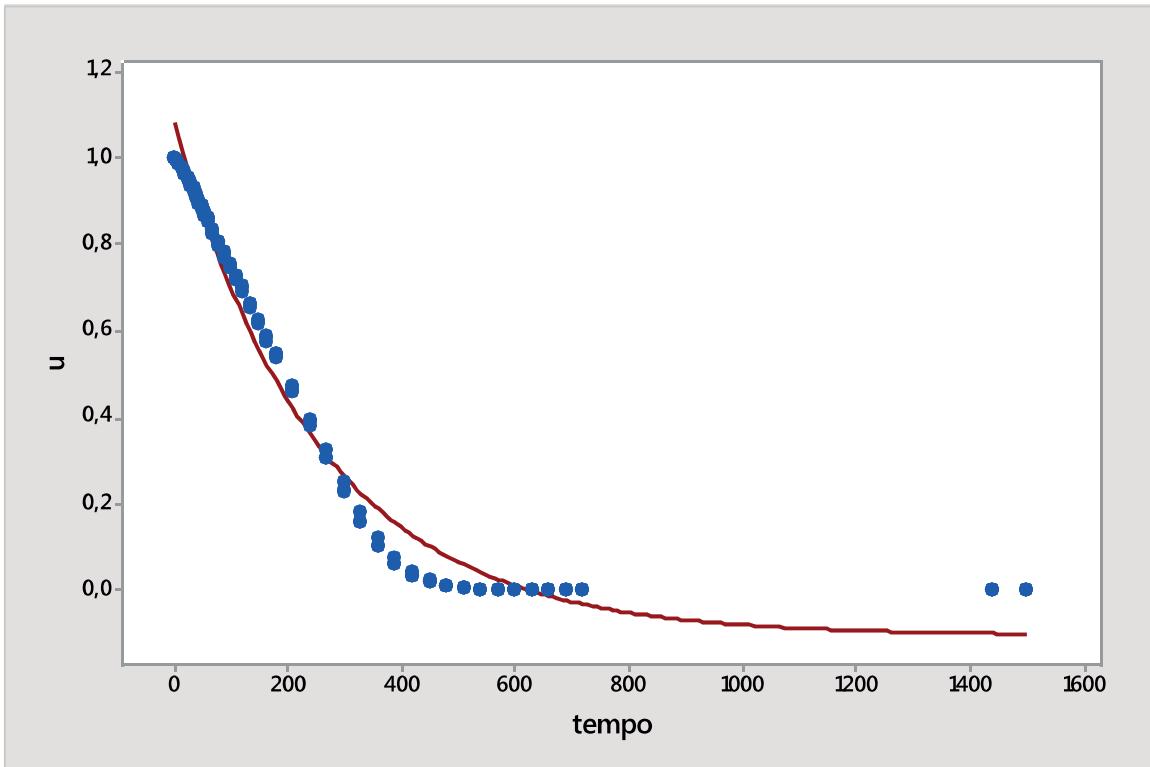


Figura 33 – Ajuste do modelo Page para a temperatura de  $80 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

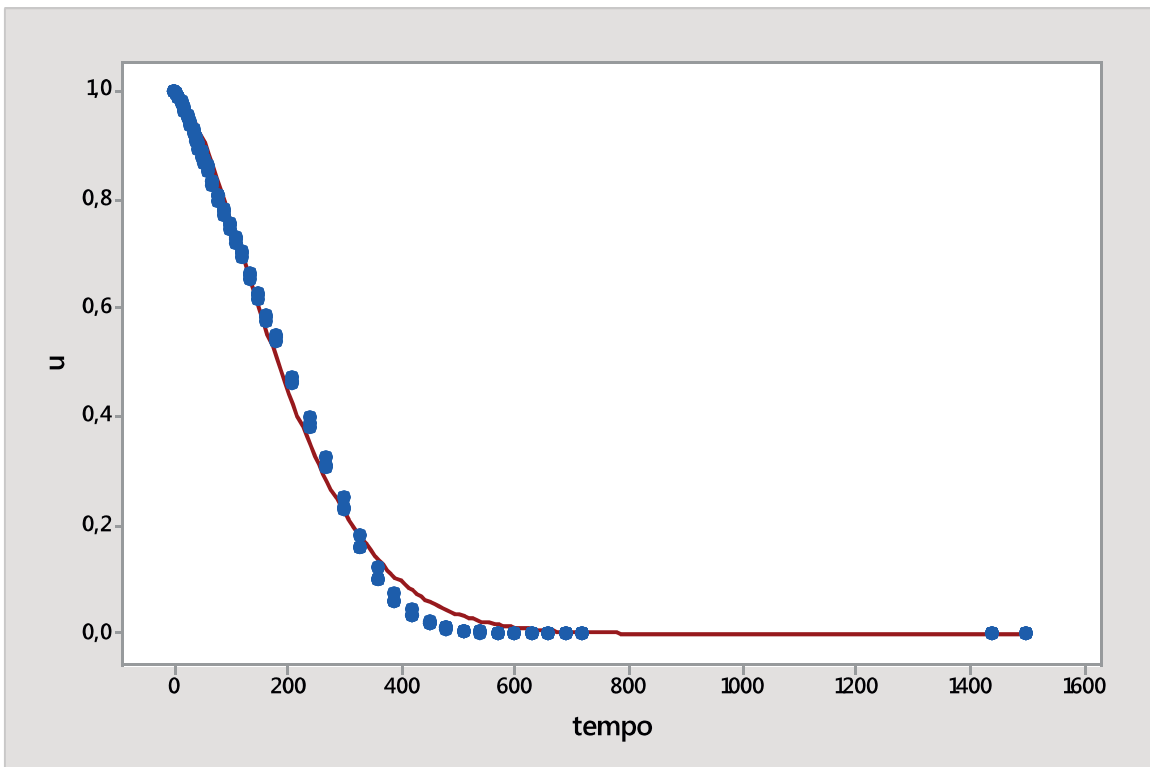


Figura 34 – Ajuste do modelo exponencial de dois termos para a temperatura de  $90 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

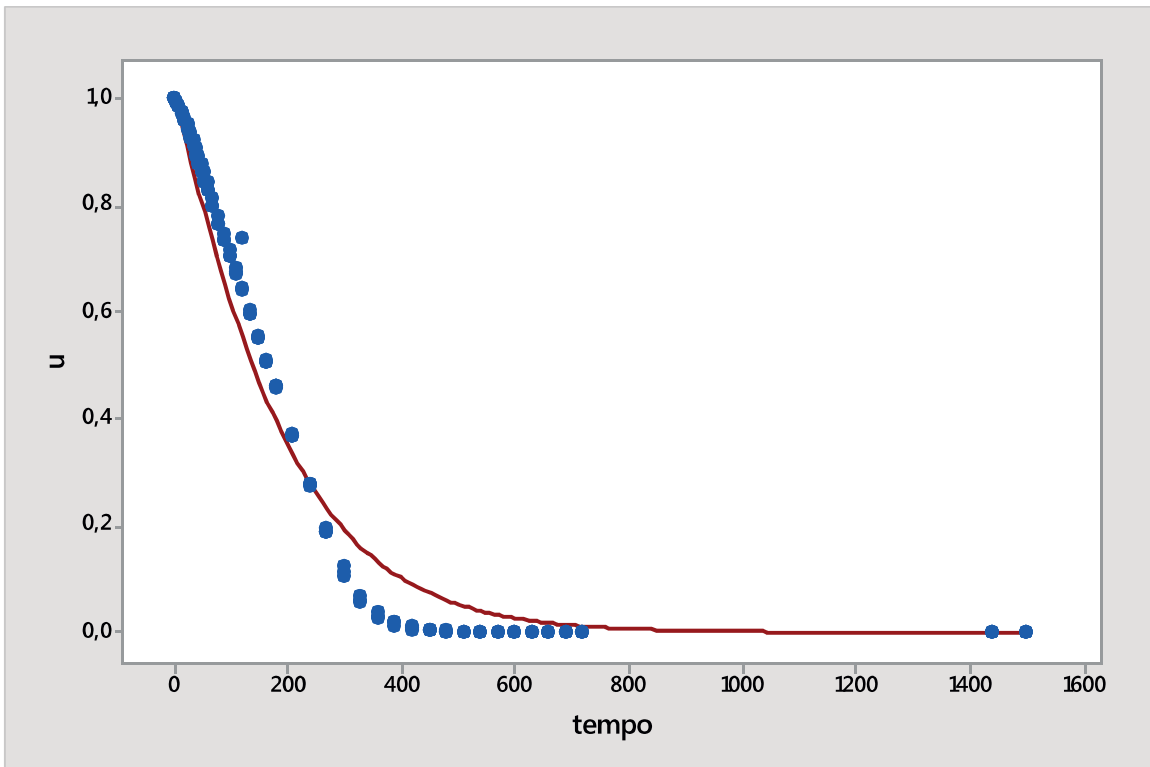


Figura 35 – Ajuste do modelo de Midilli para a temperatura de  $90 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

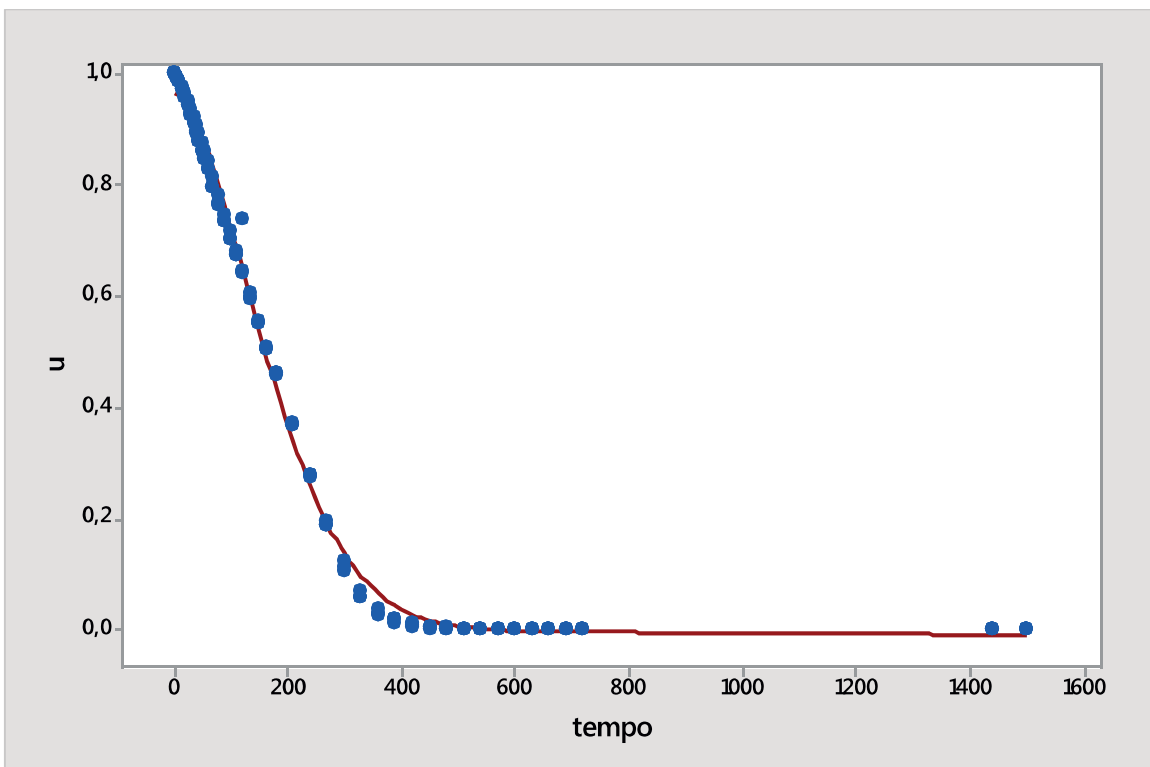


Figura 36 – Ajuste do modelo exponencial simples para a temperatura de  $90 \pm 2,5^\circ \text{C}$ .

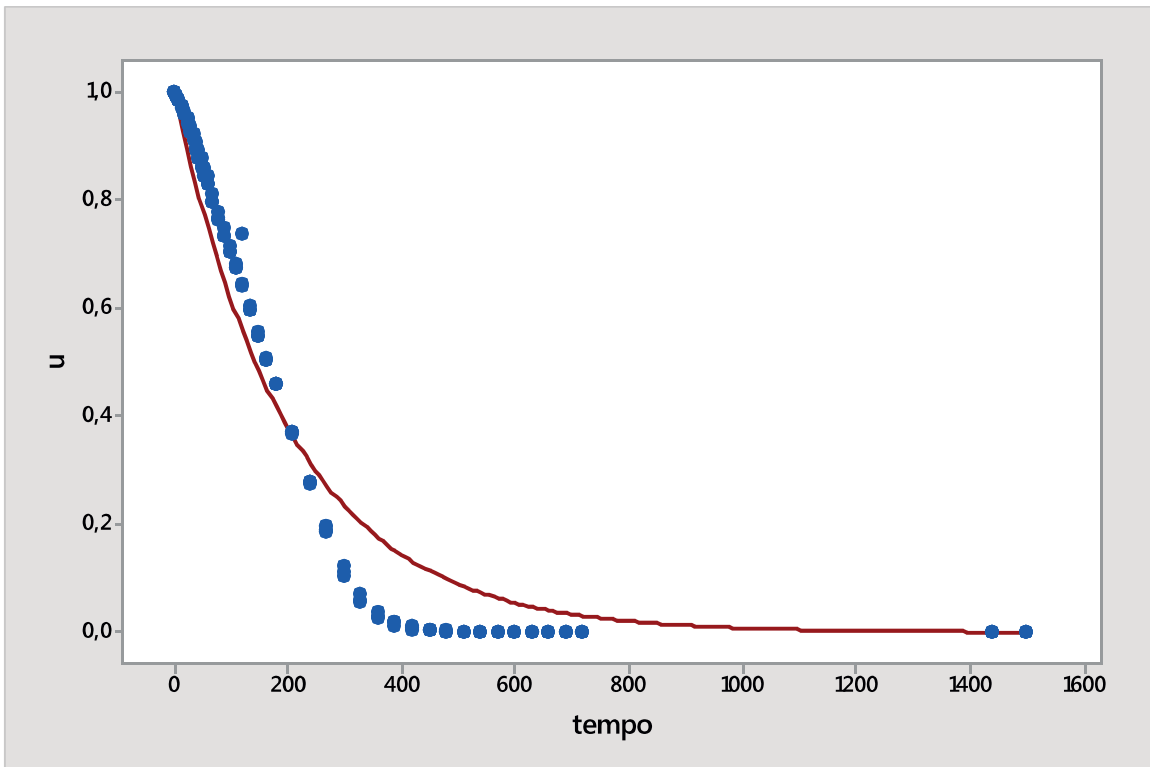


Figura 37 – Ajuste do modelo de Henderson e Pabis para a temperatura de  $90 \pm 2,5^\circ \text{C}$ .

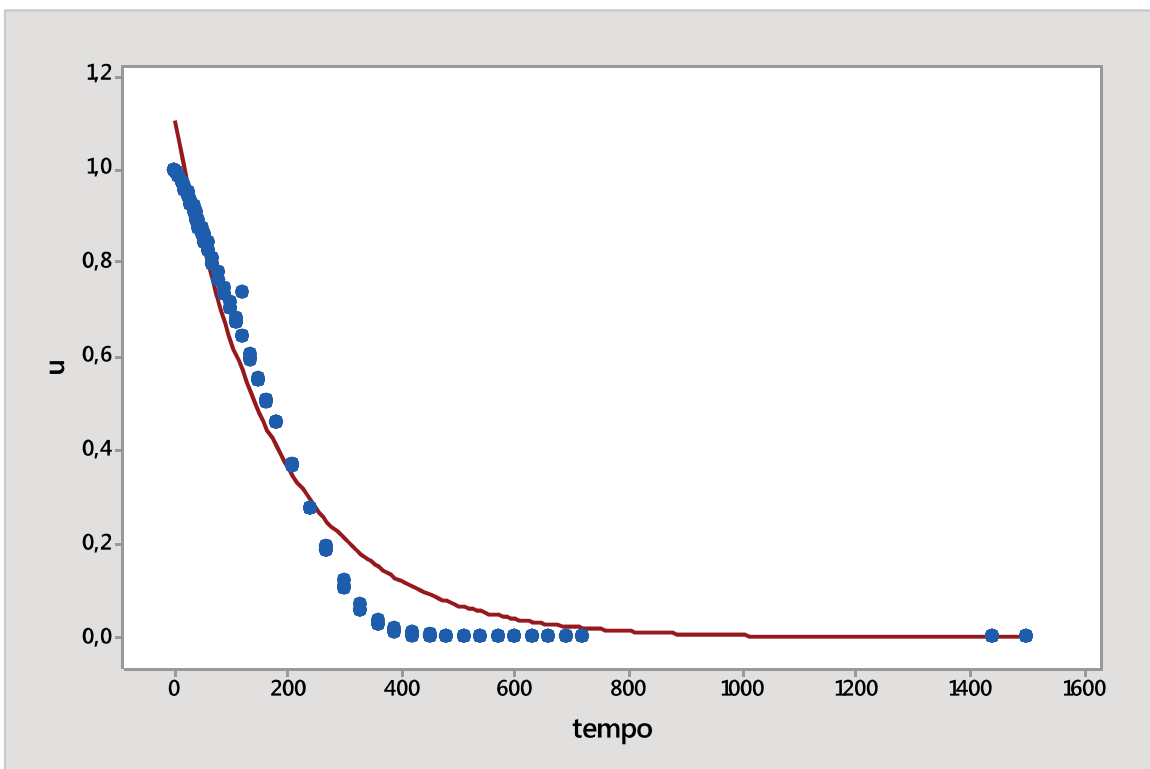


Figura 38 – Ajuste do modelo logarítmico para a temperatura de  $90 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

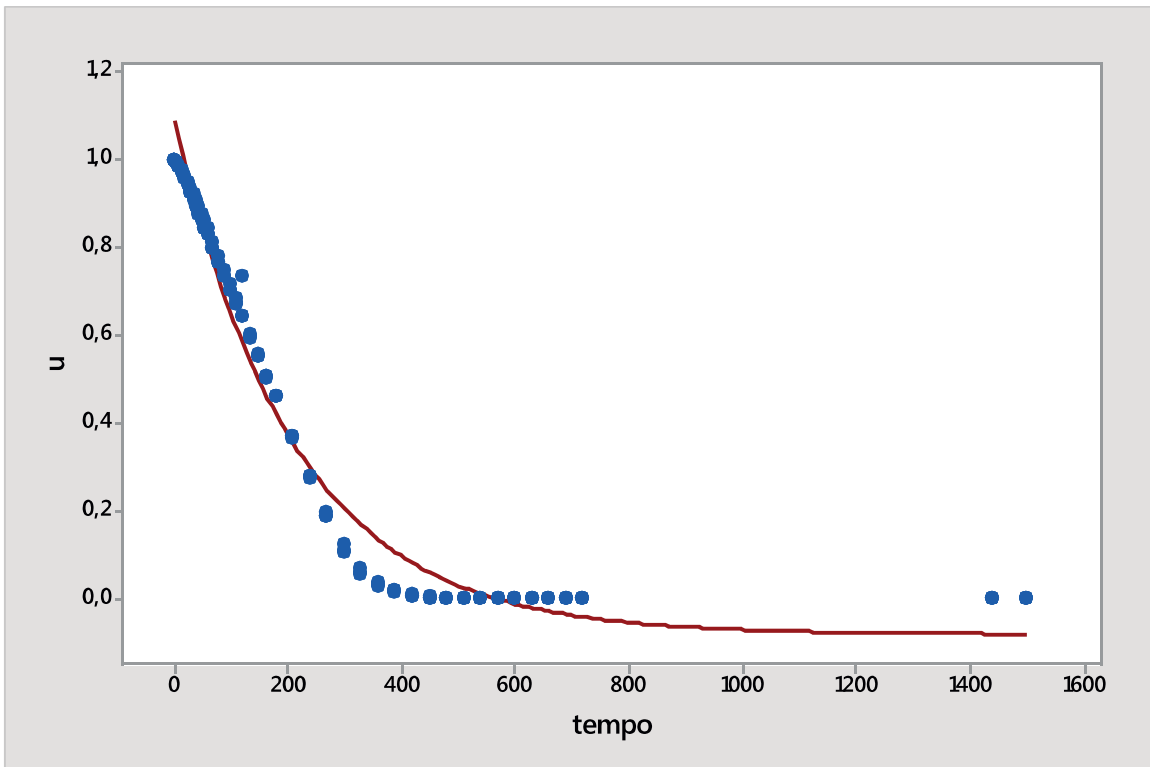


Figura 39 – Ajuste do modelo Page para a temperatura de  $90 \pm 2,5^\circ\text{C}$ .

