

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QÚMICA**

**DESIDRATAÇÃO DE LODOS DIGERIDOS DA INDÚSTRIA DE
GELATINA**

ARACELI SCALCON

**MARINGÁ
2018**

ARACELI SCALCON

**DESIDRATAÇÃO DE LODOS DIGERIDOS DA INDÚSTRIA DE
GELATINA**

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Química, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes
Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Melissa Gurgel
Adeodato Vieira

Maringá

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

S281d Scalcon, Araceli.
Desidratação de lodos digeridos da indústria de gelatina / Araceli
Scalcon. – Maringá, 2018.
185 f.

Orientador: Marcelino Luiz Gimenes.
Co-orientadora: Melissa Gurgel Adeodato Vieira.

Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de
Maringá.

1. Engenharia química. 2. Encolhimento (Química). 3. Gelatina - Indústria.
4. Secador convectivo. 5. Secador solar. I. Gimenes, Marcelino Luiz. II. Vieira,
Melissa Gurgel Adeodato. III. Universidade Estadual de Maringá. IV. Título.

CDU 664

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por Araceli Scalcon perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em Engenharia Química em 19 de janeiro de 2018.

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Marcelino Luiz Gimenes
Orientador / Presidente



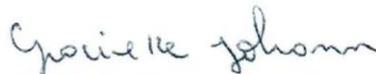
Prof.ª Dr.ª Melissa Gurgel Adeodato Vieira
Coorientadora



Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira
Membro



Prof. Dr. Fabiano Bisinella Scheufele
Membro



Prof.ª Dr.ª Gracielle Johann
Membro



Prof.ª Dr.ª Leila Denise Fiorentin Ferrari
Membro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo presente da vida e recheá-la de oportunidade e pessoas maravilhosas;

Aos meus pais, Noeli e Luiz, que sempre me amaram incondicionalmente, me apoiaram e me incentivaram a percorrer meus caminhos;

Ao Rômulo, no início do doutorado, meu namorado, e agora marido, cujo amor, compreensão e principalmente parceria me ajudaram a chegar até aqui;

Ao Pedro, o melhor presente de Deus, que me mostrou o real propósito da vida;

À minha irmã, Carol, pela cumplicidade, por me entender com olhares, e pelas piadas internas;

A todo o time que me ajudou a resolver a equação doutorado + maternidade: dinda Carol, dindo Luiz Henrique, vovós Noeli e Márcia, vovôs Luiz e Álvaro, titia Jamila, titia Lúcia, bisas Zélia e Hermíni, e também às profes do Berçário B e C que o Pedro tanto adorava. Vocês acalmavam meu coração quando eu precisava me ausentar;

Aos amigos, tanto da jornada acadêmica quanto aos demais; aos que me ajudaram no projeto, e aos que me ajudaram a esquecer um pouco dele de vez em quando;

Às irmãs que fiz em Maringá, Simone e Joelma, o equilíbrio perfeito de *roomates* para esta jornada;

Ao Guerra, Luizinho, Elenice, por toda ajuda na montagem do equipamento e no projeto;

À Gelita, ao Ricardo e ao Danilo, por me fornecerem o material com muita gentileza;

Ao FEQ por fornecer o secador;

Ao Capes e à Fundação Araucárias pelo apoio financeiro;

E finalmente aos meus mestres nessa caminhada, professor Marcelino e professora Melissa, obrigada pela dedicação, paciência confiança e por compartilharem comigo o seu bem mais precioso, o conhecimento!

RESUMO

SCALCON, Araceli. Desidratação de lodos digeridos da indústria de gelatina. 2018. 185p. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2018.

A geração de resíduos é uma consequência inevitável de qualquer atividade realizada pelo homem. Do processo de fabricação da gelatina resultam grandes quantidades efluentes, cujo tratamento gera os resíduos sólidos (lodos). Devido à sua composição, rica em matéria orgânica e com quantidade expressiva de macro e micronutrientes, a utilização agrícola do lodo é uma interessante opção de destinação final, que propicia o reaproveitamento da biomassa. Entretanto, estes resíduos possuem elevado teor de umidade (99,18 % b.u.) e podem apresentar poluentes inorgânicos e microrganismos patogênicos. Por esta razão, devem passar por tratamentos adequados para atender às especificações exigidas pela legislação vigente, garantindo uma utilização segura. A secagem constitui uma importante etapa de tratamento do lodo, pois reduz com eficiência o seu teor de umidade e volume, reduzindo também custos com armazenamento e transporte. Além disso, proporciona uma redução na concentração de organismos patogênicos, evitando possíveis contaminações em decorrência dos mesmos. O estudo da secagem de resíduos sólidos é considerado um desafio, pois além de ser uma operação tipicamente complexa, apresenta outras dificuldades adicionais como heterogeneidade do material e fenômenos como encolhimento, rachaduras e endurecimento da camada superficial, que ocorrem durante o processo e influenciam no comportamento do lodo. O presente trabalho teve como motivação o estudo e avaliação da secagem de lodo proveniente de uma indústria de gelatina. O lodo utilizado foi fornecido pela estação de tratamento de efluentes (ETE) da Gelita, cidade de Maringá. Análises de caracterização foram realizadas para o lodo coletado, que mostraram a necessidade de etapas de redução do teor de umidade e concentração de microrganismos patogênicos. Foram realizados experimentos de secagem em um secador convectivo, secagem em estufa e em um secador solar. No secador convectivo foram determinadas curvas de secagem, em função de diferentes condições de temperatura e vazão mássica do ar de secagem. As análises físico-químicas e microbiológicas mostraram que todas as especificações de teor de umidade, patógenos e metais pesados foram atendidas, qualificando o lodo como um bio-sólido Classe A, de acordo com a norma nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que pode ser aplicado no solo sem restrições. O lodo apresentou quatro períodos distintos de taxa de secagem: período de aquecimento do material, período de taxas constantes, e dois períodos de taxa de secagem decrescente. Dessa maneira, foi possível

determinar o teor de umidade crítico do material ($4,13 \pm 0,07 < X_c < 5,45 \pm 0,64$ b.s.) e o teor de umidade que divide o primeiro e segundo períodos de taxa decrescente ($1,41 \pm 0,07 < X^* < 2,78 \pm 0,05$ b.s.). A temperatura e vazão mássica do ar influenciaram na secagem do lodo, diminuindo o tempo de operação. Entretanto, para a condições mais severa de secagem testada (140 °C), devido ao endurecimento da camada superficial, a perda de umidade foi inibida, diminuindo a velocidade de secagem e reduzindo, portanto, a influência destas variáveis no processo de secagem. Na secagem em estufa avaliou-se a influência da temperatura no encolhimento e nas propriedades físicas do lodo e resultados semelhantes foram obtidos. Observou-se que para temperaturas de 80 e 110 °C, o encolhimento aumenta com o aumento da temperatura. Entretanto, quando aumenta-se a temperatura para 140 °C, devido à formação da crosta na superfície, o encolhimento é diminuído. No secador solar avaliou-se a eficiência de remoção de umidade testando um processo simultâneo de filtração e secagem solar. A operação se mostrou eficiente para o propósito testado, entretanto, após a secagem solar, o lodo ainda apresentava teores de umidade entre 8 e 12 %, acima dos níveis máximos permitidos para utilização agrícola. Foi realizado um estudo da eficiência de secagem para o secador convectivo e secador solar. No primeiro, a eficiência energética foi maior para os ensaios à temperatura de 80 °C e vazão mássica de $0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$. No secador solar, obteve-se uma eficiência maior para os dois primeiros dias de secagem, depois a eficiência caiu consideravelmente, devido à diminuição do fluxo mássico de secagem. De modo geral, o secador convectivo se mostrou eficaz no tratamento do lodo testado, resultando em um produto final apto a ser aplicado no solo com segurança. Conclui-se que o biossólido obtido pode ser utilizado como biofertilizante, pois atendeu às características especificadas. Buscando uma maneira de aumentar a eficiência da secagem, que conhecidamente é uma operação com altos custos energéticos, a combinação da secagem solar com a secagem convectiva se torna uma interessante opção de tratamento que permite reduzir o teor de umidade, inativar os microrganismos patogênicos e diminuir custos de operação.

Palavras-chave: Lodo digerido. Secador convectivo. Secador solar. Encolhimento.

ABSTRACT

SCALCON, Araceli. Digested sludge dehydration from the gelatin industry. 2018. 185pf. PhD Thesis. Chemical Engineering Graduate Program, State University of Maringá, Maringá, 2018.

Wastewater generation is an inevitable consequence of any activity carried out by man. The gelatine manufacturing process results in large amounts of liquid waste, which treatment generates solid waste (sludge). Due its composition, rich in organic matter and with a significant amount of macro and micronutrients, the land application of the sludge is an interesting option of final disposal that provides the reuse of biomass. However, this sludge usually presents high moisture contents (99.18 % w.b.) and may combin inorganic pollutants and pathogenic microorganisms. For this reason, this waste must undergo treatments to meet federal standards for beneficial use. Drying is an important step in the treatment of sludge because it effectively reduces its moisture content and volume and also reduces storage and transport costs. In addition, it provides a reduction in the concentration of pathogenic organisms, avoiding possible contaminations. The study of the solid wastes drying is considered a challenge because, besides being a typical complex operation, it presents other additional difficulties such as heterogeneity of the material and phenomena such as shrinkage, cracking and case hardening, that occur during the process and influence the behavior of the sludge. The present work aimed the study and evaluation of the sludge drying from a gelatin industry. The used sludge came from the wastewater treatment plant at Gelita, Maringá. The characteristics of the sludge showed the need to reduce the moisture content and concentration of pathogenic microorganisms. Drying experiments were carried out in a convective dryer, in a oven-drying and in a solar dryer. In the convective dryer drying curves were analyzed as a function of different conditions of temperature and mass flow rate of the drying air. The physicochemical and microbiological analyzes showed that all requirements of moisture content, pathogens and heavy metals were met, classifying the sludge as a Class A biosolid, in accordance with Conselho Nacional do Meio Ambiente (National Environmental Council) standard 375, which can be applied to the soil which can be applied to the soil without restrictions. The sludge presented four different periods of drying rate: period of heating of the material, period of constant rate, and two distinguished falling rate periods. In this way, it was possible to determine the critical moisture content of the material ($4.13 \pm 0.07 < X_C < 5.45 \pm 0.64$ d.b.) and the moisture content delimiting the first and second periods of falling rates ($1.41 \pm 0.07 < X^* < 2.78 \pm 0.05$ d.b.). The

temperature and mass flow of the air influenced the drying of the sludge, reducing the operation time. However, for more drastic conditions of drying (140 °C), due to the case hardening, the loss of moisture was inhibited, thus reducing the drying rates and consequently reducing the influence of these variables on the drying process. In the oven-drying experiments, the influence of temperature on shrinkage and on the physical properties of sludge were evaluated and similar results were achieved. It has been observed that for temperatures of 80 and 110 °C, the shrinkage increases with increasing temperature. However, for 140 °C, due to the formation of the crust on the outer face, the shrinkage is decreased. In the solar dryer the efficiency of moisture removal was evaluated by testing a simultaneous filtration and solar drying process. The operation was efficient for the purpose tested, however, after sludge drying, it still presented moisture contents between 8 and 12%, above the maximum levels allowed for agricultural use. An drying efficiency study was performed for the convective dryer and solar dryer. In the first, the energy efficiency was higher for the tests under temperature of 80 °C and mass flow of 0.5 kg.min⁻¹. In the solar dryer, a higher efficiency was obtained for the first two days of drying, then the efficiency decreased considerably, due to the decrease of the mass drying flow. In general, the convective drying was effective in the treatment of the tested sludge, resulting in a final product able to be safely applied to the soil. It can be concluded that the obtained biosolid can be used as biofertilizer because it meets the specified characteristics. The combination of solar drying and convective drying becomes an interesting treatment option that allows to reduce the moisture content, inactivate the pathogenic microorganisms and decrease costs.

Keywords: Digested sludge. Convective dryer. Solar dryer. Shrinkage.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS	4
2.2	LODO DE INDÚSTRIA DE GELATINA.....	6
2.3	PROCESSOS RECOMENDADOS PARA O TRATAMENTO DO LODO	11
2.4	PROCESSO DE SECAGEM	13
2.4.1	Isotermas de equilíbrio	15
2.4.2	Cinética de secagem	19
2.4.3	Modelos matemáticos de cinética de secagem	22
2.5	SECAGEM DO LODO	25
2.6	ENCOLHIMENTO DO LODO DURANTE A SECAGEM	30
2.7	SECAGEM SOLAR DO LODO	32
2.8	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	33
2.8.1	Secagem Convectiva.....	34
2.8.2	Secagem Solar	36
2.9	APLICAÇÃO DO LODO COMO FERTILIZANTE	37
2.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1	MATERIAL	42
3.2	COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA	43
3.3	SISTEMA EXPERIMENTAL DE SECAGEM.....	44
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO LODO.....	48

3.4.1	Sólidos	49
3.4.2	pH	50
3.4.3	Poluentes inorgânicos	50
3.4.4	Microrganismos patogênicos	51
3.4.5	Densidade aparente	51
3.4.6	Densidade real	52
3.4.7	Porosidade.....	52
3.4.8	Composição centesimal	53
3.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE SECAGEM.....	53
3.5.1	Planejamento experimental.....	53
3.5.2	Cinética de secagem	55
3.5.3	Modelagem matemática.....	56
3.5.4	Isotermas de dessorção	57
3.5.5	Eficiência energética da secagem convectiva.....	57
3.5.6	Secagem solar do lodo	59
3.5.7	Análise do encolhimento do lodo	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO	63
4.1.1	Umidade inicial e Sólidos Totais e Voláteis.....	63
4.1.1	Teor de umidade final	65
4.1.2	pH	65
4.1.3	Metais Pesados.....	65
4.1.4	Microrganismos patogênicos	67
4.1.5	Composição centesimal do lodo	69
4.2	ENSAIOS DE SECAGEM.....	70

4.2.1	Influência da temperatura e da vazão mássica do ar na cinética de secagem.....	78
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	81
4.4	MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE SECAGEM.....	85
4.5	ISOTERMAS DE DESSORÇÃO	92
4.6	ENCOLHIMENTO	99
4.6.1	Encolhimento volumétrico, superficial e de espessura.....	105
4.6.2	Avaliação das propriedades físicas durante o encolhimento	113
4.7	SECAGEM SOLAR DO LODO	118
4.8	EFICIÊNCIA DAS OPERAÇÕES.....	123
4.8.1	Eficiência energética da secagem convectiva.....	123
4.8.2	Eficiência de desidratação da secagem solar	126
4.9	AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES E DO PRODUTO OBTIDO	128
5	CONCLUSÕES	132
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	133
6	REFERÊNCIAS	134
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO.....	155
	APÊNDICE B – CINÉTICAS DE SECAGEM.....	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Estados da umidade não-ligada.	14
Figura 2.2. Isoterma de sorção. Fonte: Mujumdar e Menon,1995.	16
Figura 2.3. Classificação das curvas de sorção. Adaptado de Brunauer et al., 1938.	17
Figura 2.4. Curva de secagem.	20
Figura 2.5. Curva de secagem.	20
Figura 2.6. Curva de temperatura.	21
Figura 2.7. Representação de alguns tipos de secadores convectivos industriais de lodos: a) secador de correia, b) secador flash, c) secador de leito fluidizado e d) secador rotativo e e) <i>spray dryer</i> . Fonte: adaptado de Lowe (1995) e Labmaq (2003).	26
Figura 2.8. Representação de alguns tipos de secadores condutivos industriais de lodos: a) secador de disco, b) secador de pás e c) secadores de filme ou camada fina.	26
Figura 2.9. Representação de alguns tipos de secadores solar desenvolvidos: a) planta de secagem solar coberta b) secador de pás.	27
Figura 2.10. Curva típica de secagem do lodo.	28
Figura 3.1. Fluxograma das etapas realizadas no projeto.	42
Figura 3.2. Fluxograma da ETE – Gelita Maringá.	43
Figura 3.3. Fluxograma do preparo do lodo para a secagem.	44
Figura 3.4. Desenho esquemático do sistema de secagem	45
Figura 3.5. Distribuição dos termopares no corpo do secador	47
Figura 3.6. Vista geral do sistema de secagem convectiva.	48
Figura 3.7. Vista do a) sistema de registro de temperaturas; b) sistema de aquecimento; c) câmara de secagem; d) sistema de lavador de gases.	48
Figura 3.8. Balança hidrostática.	52
Figura 3.9. Foto do protótipo.	59
Figura 3.10. Vista frontal e lateral do protótipo.	60
Figura 4.1. Fluxograma do balanço de massa das operações de desidratação mecânica do lodo. As setas pontilhas representam perdas durante o processo. Fonte: Elaborado pelo autor.	63
Figura 4.2. Perfil de temperatura da média dos ensaios 1 e 2 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	69
Figura 4.3. Cinética de secagem relativa aos ensaios 1 e 2 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	71
Figura 4.4. Taxa de secagem relativa aos ensaios 1 e 2 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	71
Figura 4.5. Perfil de temperatura dos ensaios 9 e 10 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	73

Figura 4.6. Cinética de secagem relativa aos ensaios 9 e 10 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$)..	74
Figura 4.7. Taxa de secagem relativa aos ensaios 9 e 10 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).....	74
Figura 4.8. Perfil de temperatura dos ensaios ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).....	75
Figura 4.9. Cinética de secagem relativa aos ensaios ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).....	76
Figura 4.10. Taxa de secagem relativa aos ensaios ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).....	76
Figura 4.11. Curvas de secagem e taxas de secagem dos ensaios 1 e 2 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,3 \text{ kg min}^{-1}$), 7 e 8 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,3 \text{ kg min}^{-1}$) e 13 e 14 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,3 \text{ kg min}^{-1}$).....	79
Figura 4.12. Curvas de secagem e taxas de secagem dos ensaios 5 e 6 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,5 \text{ kg min}^{-1}$), 11 e 12 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,5 \text{ kg min}^{-1}$) e 17 e 18 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,5 \text{ kg min}^{-1}$).....	79
Figura 4.13. Curvas de secagem e taxas de secagem dos ensaios 1 e 2 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,3 \text{ kg min}^{-1}$), 3 e 4 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,4 \text{ kg min}^{-1}$) e 5 e 6 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,5 \text{ kg min}^{-1}$).....	80
Figura 4.14. Curvas de secagem e taxas de secagem dos ensaios 13 e 14 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,3 \text{ kg min}^{-1}$), 15 e 16 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,4 \text{ kg min}^{-1}$) e 17 e 18 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,5 \text{ kg min}^{-1}$)...	81
Figura 4.15. Diagrama de Pareto para os ensaios de secagem.	82
Figura 4.16. Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro.	84
Figura 4.17. Valores preditos em função dos valores observados.	85
Figura 4.18. Distribuição dos resíduos em função do modelo.	85
Figura 4.19. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as condições de temperaturas de 80°C e vazão mássica do ar de $0,3 \text{ kg min}^{-1}$	86
Figura 4.20. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as condições de temperaturas de 110°C e vazão mássica do ar de $0,4 \text{ kg min}^{-1}$	87
Figura 4.21. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as condições de temperaturas de 140°C e vazão mássica do ar de $0,5 \text{ kg min}^{-1}$	87
Figura 4.22. Diagrama de Pareto para o parâmetro k obtido pelo ajuste do modelo de Page..	91
Figura 4.23. Diagrama de Pareto para o parâmetro n obtido pelo ajuste do modelo de Page..	91
Figura 4.24. Isotermas de equilíbrio para as temperaturas de 20, 35 e 50°C	92
Figura 4.25. Ajuste dos modelos de Smith e Oswin modificado à isoterma de dessorção a 20°C	95
Figura 4.26. Ajuste dos modelos de Smith e Oswin modificado à isoterma de dessorção a 35°C	95
Figura 4.27. Ajuste dos modelos de Smith e Oswin modificado à isoterma de dessorção a 50°C	95

Figura 4.28. Ajuste dos modelos de GAB e GDW à isoterma de dessecção a 20 °C.....	98
Figura 4.29. Ajuste dos modelos de GAB e GDW à isoterma de dessecção a 35 °C.....	98
Figura 4.30. Ajuste dos modelos de GAB e GDW à isoterma de dessecção a 50 °C.....	99
Figura 4.31. Cinética de secagem dos experimentos de secagem em estufa.....	100
Figura 4.32. Taxas de secagem para os ensaios de secagem em estufa.	100
Figura 4.33. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as temperaturas de 80 °C.....	103
Figura 4.34. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as temperaturas de 110 °C.....	103
Figura 4.35. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as temperaturas de 140 °C.....	103
Figura 4.36. Redução superficial do lodo em função da razão do teor de umidade (b.s.). As linhas representam as curvas ajustadas pela Equação 4.2.	107
Figura 4.37. Redução volumétrica do lodo em função da razão do teor de umidade (b.s.). As linhas representam as curvas ajustadas pela Equação 4.3.	108
Figura 4.38. Redução da espessura do lodo em função da razão do teor de umidade (b.s.). As linhas representam as curvas ajustadas pela Equação 4.3.	108
Figura 4.39. Dados experimentais e valores preditos pelo modelo Perez e Calvelo (1984) para a redução volumétrica para as temperaturas de (a) 80 °C, (b) 110 °C e (c) 140 °C.....	109
Figura 4.40. Redução volumétrica do lodo em função do tempo.....	111
Figura 4.41. Taxas de encolhimento do lodo em função da razão de umidade (b.s.). As linhas representam a tendência de decréscimo das taxas.	113
Figura 4.42. Densidade aparente em função da razão de umidade (b.s.).	114
Figura 4.43. Porosidade em função da razão de umidade (b.s.).....	115
Figura 4.44. Fotos do lodo seco analisado por MEV: (a) 80 °C (250x); (b) 110 °C (250x); (c) 140 °C (250x); (d) 80 °C (1000x); (e) 110 °C (1000x); (f) 140 °C (1000x); (g) 80 °C (3000x); (h) 110 °C (3000x); (i) 140 °C (3000x).	117
Figura 4.45. Condições climáticas de temperatura ambiente (T_{amb}), umidade relativa do ar (UR) e temperatura no interior do secador (T_i) durante a secagem solar.	118
Figura 4.46. Teor de umidade adimensional do lodo em função do tempo de secagem solar.	119
Figura 4.47. Taxas de secagem em função do adimensional de umidade (X_R) e teor de umidade médio das amostras.....	120

Figura 4.48. Taxas de secagem em função do adimensional de umidade (X_R) e teor de umidade médio das amostras a partir do terceiro dia de secagem.....	120
Figura 4.49. Variação das massas de lodo e água retirada por filtração nos dois primeiros dias de secagem solar.....	121
Figura 4.50. Balanço de massa da operação de secagem solar testada.	122
Figura 4.51. Aparecimento rachaduras ao final do segundo dia de secagem solar.	123
Figura 4.52. Eficiência energética e consumo específico de energia para os ensaios de acordo com o planejamento experimental proposto.	124
Figura 4.53. Eficiência energética do secador em cada dia de operação.....	127
Figura 4.54. Balanço de massa das etapas de desidratação mecânica e secagem convectiva.	129
Figura 4.55. Pastilhas de biossólido.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Parâmetros de caracterização de lodos de indústria de gelatina.	8
Tabela 2.2. Níveis máximos admissíveis de metais pesados em biossólido.	10
Tabela 2.3. Concentração máxima de patógenos admitida no biossólido.	10
Tabela 3.1. Dimensões características da câmara de secagem.	46
Tabela 3.2. Planejamento fatorial 3 ² com duplicata.	55
Tabela 4.1. Porcentagem de umidade, sólidos totais.	64
Tabela 4.2. Porcentagem de sólidos fixos e voláteis do lodo.	64
Tabela 4.3 Concentração de metais pesados no lodo bruto (mg kg ⁻¹).	66
Tabela 4.4. Concentração de microrganismos patogênicos presentes no lodo bruto e no lodo seco à temperatura de 80 °C e vazão de ar de 0,3 kg.s ⁻¹	67
Tabela 4.5. Composição centesimal do lodo.	69
Tabela 4.6. Teores de umidade das amostras nos pontos de início da secagem e transição dos períodos.	77
Tabela 4.7. Tempo de equilíbrio das amostras nos ensaios, de acordo com o Planejamento Experimental proposto.	81
Tabela 4.8. Coeficientes de regressão para a variável resposta.	83
Tabela 4.9. Análise de variância para a variável resposta.	83
Tabela 4.10. Valores para o teste F para a variável resposta.	83
Tabela 4.11. Parâmetros dos modelos matemáticas utilizados no ajuste dos dados.	88
Tabela 4.12. Parâmetros dos os modelos dependentes de temperatura ajustados para as isotermas.	94
Tabela 4.13. Parâmetros dos os modelos independentes de temperatura ajustados para as isotermas.	97
Tabela 4.14. Parâmetros dos modelos ajustados nos ensaios de secagem em estufa.	102
Tabela 4.15. Difusividade Efetiva (D _{eff}), coeficientes de obtidos para a Equação de Crank (1975).	104
Tabela 4.16. Parâmetros característicos calculados pelas Equações 4.2 a 4.4.	106
Tabela 4.17. Fatores de desempenho para avaliação energética dos ensaios de acordo com o planejamento experimental proposto.	124
Tabela 4.18. Percentual de período decrescente em relação ao período total de secagem.	125
Tabela 4.19. Eficiência global da secagem solar (η _d).	127

LISTA DE SÍMBOLOS

- a, b, c, k, k_2, n : parâmetros dos modelos de secagem (-)
 a_1 : área do tubo (cm^2)
 a_2 : área do orifício (cm^2)
 a_w : atividade da água
 A, A', A'' : coeficientes dos modelos de encolhimento (-)
 A_d : superfície exposta à incidência solar (m^2)
 B, B', B'' : coeficientes dos modelos de encolhimento (-)
 b_1 : pressão barométrica no local (mmHg)
 C, C', C'' : coeficientes dos modelos de encolhimento (-)
 C_A : calor específico do ar úmido ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 C_{pa} : calor específico do ar à pressão constante ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 C_M : calor específico do material ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 C_{MI} : calor específico do material no início da secagem ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 C_{MF} : calor específico do material no final da secagem ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 C_{MS} : calor específico do material seco ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 C_W : calor específico da umidade contida na fase líquida ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 D_{ef} : difusividade efetiva ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)
 E : capacidade evaporativa;
 E_R : energia total requerida (J);
 E_F : Energia total fornecida (J);
 E_{MEC} : energia mecânica da operação (kJ);
 E_{TER} : energia térmica fornecida à operação (kJ);
 I : radiação solar total (W.m^{-2})
 \dot{m}_a : fluxo mássico de ar no secador (kg.s^{-1})
 m_i : massa inicial úmida (g)
 m_s : massa final de sólido seco (g)
 m_{SF} : massa de sólidos fixos (g)
 m_{H_2O} : massa de água (g)
 $m_{V,W}$: massa de água evaporada (kg)
 m_T : massa total (g)
 m_M : massa de material ao final da secagem (kg)

P_f : energia consumida pelo soprador/ventilador (W)
 $P_{sat(t)}$: pressão parcial de vapor d'água pura (Pa)
 P_W : pressão parcial de vapor do produto (Pa)
 Q_m : vazão mássica ($\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$)
 Q_{AR} : fluxo mássico do ar secagem ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
 Q_M : calor necessário para aquecer o material (kJ)
 Q_W : calor necessário para evaporar a umidade (kJ);
 r : distância do centro até o ponto (cm);
 t : tempo de secagem (s)
 T_{en} : temperatura do ar de entrada ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{sa} : temperatura do ar de saída ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{amb} : temperatura do ar ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{bu} : temperatura do bulbo úmido
 T_{MI} : temperatura do material no início da secagem (K)
 T_{MF} : temperatura do material no final da secagem (K)
 UR : umidade relativa do meio ambiente (%)
 V : volume total (L)
 V_{ar} : volume ocupado pela fase gasosa (L)
 V_S : volume ocupado pela fase sólida (L)
 V_W : volume ocupado pela fase líquida (L)
 \dot{V}_{ar} : vazão volumétrica de ar bombeada pelo compressor ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
 W_i : umidade absoluta do ar de entrada ($\text{kg}_w\cdot\text{kg}_a^{-1}$)
 W_0 : umidade absoluta do ar de saída ($\text{kg}_w\cdot\text{kg}_a^{-1}$)
 W_s : umidade absoluta de saturação ($\text{kg}\cdot\text{kg}_{ar\ seco}^{-1}$)
 $X_{b.u.}$: teor de umidade em base úmida ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 $X_{b.s.}$: teor de umidade em base seca ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 $X_{eq.}$: teor de umidade de equilíbrio (b.s.);
 X_0 : teor de umidade inicial (b.s.)
 X_R : conteúdo adimensional de umidade (b.s.)
 Y_{en} : umidade absoluta do ar de entrada ($\text{kg}\cdot\text{kg}_{ar\ seco}^{-1}$)
 Y_{sa} : umidade absoluta do ar de saída ($\text{kg}\cdot\text{kg}_{ar\ seco}^{-1}$)
 Y_{SAT} : umidade absoluta do ar saturado ($\text{kg}\cdot\text{kg}_{ar\ seco}^{-1}$)
 $\Delta H_{V,W}$: calor latente de evaporação da água pura na temperatura do ar ($\text{kJ}\cdot\text{kg}_w^{-1}$)

ΔP : queda de pressão (Pa)

Δh : queda de pressão na placa de orifício (cm H₂O);

ΔT : gradiente de temperatura do ar (K)

ε : porosidade do papel (-)

η : eficiência energética (-)

η_{conv} : eficiência energética convectiva (-)

$\eta_{conv,máx}$: eficiência energética convectiva máxima (-)

η_{ev} : eficiência energética de evaporação (-)

η_p : eficiência de aproveitamento (-)

η_a : eficiência global de secagem do sistema (-)

η_{d1} : eficiência global de secagem do sistema no primeiro dia (-)

η_c : eficiência de coleta térmica (-)

ρ_{ap} : densidade aparente do lodo (g.cm⁻³)

ρ_r : densidade real do lodo (g.cm⁻³)

ρ_w : densidade da água líquida (g.cm⁻³)

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população e das atividades industriais criam sérios desafios para o desenvolvimento sustentável, pois ocasionam uma maior geração de resíduos (ARLABOSSE et al., 2012; BENNAMOUN, 2012; SYED-HASSAN et al., 2017;). Syed-Hassan et al. (2017) afirmam que o grande do volume de águas residuais produzidas pelas comunidades urbanas e setores industriais exigem não apenas uma política adequada, mas também uma melhor tecnologia para o tratamento, manuseio e descarte/disposição seguros destes resíduos.

O tratamento destas águas residuais, de origem urbana ou industrial gera como subproduto os resíduos sólidos (ou lodos) (EDWARDS et al., 2017). Estima-se que, em 2017, a produção de lodo foi de cerca de 45 milhões de toneladas em base seca (ZHANG et al., 2017). Fijalkowski et al. (2017) afirmam que o não aproveitamento adequado deve ser tratado como um desperdício. Além da sua utilização como recurso energético, o lodo proveniente de estações de tratamento de efluentes (ETEs) pode ser considerado como um substrato para fertilização e remediação do solo, devido à sua composição rica em matéria orgânica e nutrientes (KACPRZAK et al., 2017; MAWIOO et al., 2017).

Neste cenário atual, em que um conjunto de problemas ambientais pode ser identificado, é de especial interesse a abordagem de temas relacionados ao tratamento, à redução e à disposição ambientalmente adequada de resíduos sólidos que são gerados diariamente devido ao progresso tecnológico (FREIRE et al., 2014; KACPRZAK et al., 2017).

Em se tratando de resíduos provenientes do processo de fabricação de gelatina, são geradas grandes quantidades de resíduos orgânicos. O tratamento dos resíduos líquidos gerados no processo de fabricação de gelatina dá origem à resíduos sólidos (lodos), a uma proporção estimada de 6 toneladas por tonelada de gelatina produzida (REIMANN, 2005).

Apesar das suas características favoráveis para o aproveitamento agrícola, devem ser considerados aspectos preventivos, especialmente nos valores-limite (critérios de qualidade) em virtude da possível presença de metais pesados e contaminantes orgânicos nos resíduos sólidos (ALVARENGA et al., 2015; PETRIE et al., 2015). Portanto, para evitar riscos à saúde humana e ao meio ambiente, esta disposição não pode ser realizada sem a eliminação de componentes perigosos e redução da concentração de poluentes por meio da aplicação de alguns tratamentos adequados (BENNAMOUN et al., 2013a).

Apesar de serem considerados resíduos sólidos, os lodos provenientes da indústria de gelatina (LIG) possuem um elevado teor de umidade, de aproximadamente 98 %, uma característica comum aos resíduos sólidos orgânicos (GUIMARÃES, 2009; TANIGUCHI, 2010; GUIDI, 2012; FREIRE, 2014). Este fato favorece a aceleração dos processos de fermentação e degradação e também dificulta atividades típicas de gestão ambiental, tais como o tratamento físico, o transporte e o armazenamento em condições favoráveis (FREIRE et al., 2014).

É evidente que, qualquer que seja o destino final do lodo, a secagem constitui uma importante etapa de tratamento, pois reduz com eficiência o teor de umidade do lodo, reduzindo conseqüentemente seu volume e custos com manuseio, transporte e armazenamento (BENNAMOUN et al., 2013a). Quando desidratado de uma concentração de 2 % para 20 % de sólidos, o lodo tem seu volume reduzido em até 90 % (VAXELAIRE et al., 1999; VAXELAIRE et al., 2004; NIELSEN e WILLOUGHBY, 2005).

Além da redução do teor de umidade, a secagem também proporciona uma redução na concentração de microrganismos patogênicos. A secagem convectiva promove a inativação microbiológica por meio do tratamento térmico (PAN et al., 2017; LI e FARID, 2016; SERENOTTI et al., 2010). Nadhari et al. (2014) acrescentam que o baixo teor de umidade permite que os materiais sejam armazenados por maior tempo. A secagem solar, por sua vez, promove a desinfecção microbiológica em virtude do poder germicida dos raios ultravioleta (SODIS, 2006).

Devido à complexidade da operação de secagem, à diversidade e heterogeneidade dos resíduos sólidos, a secagem de resíduos sólidos é um assunto que apresenta inúmeras possibilidades de pesquisa. Além disso, fenômenos como encolhimento, rachaduras e endurecimento da camada superficial, relatados por Li et al. (2015a; 2015b) e Bennamoun et al. (2013a; 2013b; 2014) influenciam no comportamento do lodo durante a secagem, provocando mudanças no processo. O encolhimento é um fenômeno importante que ocorre durante a secagem de muitos materiais, e em particular, durante a secagem de lodo. Como consequência do encolhimento e das mudanças estruturais do lodo, as taxas de secagem diminuem e ocorrem mudanças em algumas propriedades físicas, como densidade aparente e porosidade.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como motivação o estudo e a avaliação da secagem de lodo proveniente de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria de gelatina, que tem apresentado diversos problemas relacionados ao gerenciamento,

principalmente pelo grande volume gerado e pela quantidade significativa de microrganismos patogênicos.

Para tanto, analisou-se experimentalmente a secagem utilizando-se um secador convectivo de fluxo ascendente e um secador solar, por meio das cinéticas de secagem, eficiência energética e caracterização do produto obtido. Além disso, estudou-se o fenômeno de encolhimento do lodo durante a secagem e a relação deste fenômeno com as condições operacionais, propriedades físicas do lodo e sua cinética de secagem.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o processo da secagem de lodos digeridos provenientes de uma indústria de gelatina e a influência de diversas variáveis na cinética de secagem do lodo e no produto final, além de buscar novas informações que contribuam na solução de problemas ambientais, na área de disposição de resíduos sólidos. Para tanto, os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) determinar as características físico-químicas e microbiológicas do lodo digerido *in natura*;
- b) avaliar a influência de diversas condições operacionais na cinética de secagem do lodo, por meio de planejamento experimental;
- c) determinar as características físico-químicas e microbiológicas do produto final para diferentes condições de secagem, verificando as possíveis alterações ocasionadas pelo processo;
- d) empregar modelos matemáticos simplificados na descrição dos dados experimentais;
- e) realizar um estudo comparativo entre a secagem natural e a secagem por convecção forçada;
- f) avaliar a eficiência energética da secagem convectiva e secagem solar;
- g) analisar os fenômenos de encolhimento do lodo durante a secagem e o ajuste de modelos aos dados experimentais da cinética e da redução das dimensões;
- h) analisar os resultados e verificar qual das condições estudadas é mais favorável à obtenção de um produto final de qualidade e adequado para a utilização como biofertilizante em termos de legislação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos Sólidos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da Norma Técnica Registrada (NBR) 10004 (2004), define resíduos sólidos como:

“Resíduos no estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes dos sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle da poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis, em face a melhor tecnologia disponível.”

Os resíduos sólidos podem ser classificados de várias maneiras: 1) por sua natureza física: seco ou molhado; 2) por sua composição química: matéria orgânica ou matéria inorgânica; 3) pelos riscos potenciais ao meio ambiente; e 4) quanto à origem. As classificações mais comumente utilizadas são em função dos riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública e em função da natureza e origem (ABNT, 2004).

Em relação aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, a NBR 10004 (2004), classifica os resíduos sólidos em:

Classe I – perigosos: são aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública, através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provoquem efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados de forma inadequada.

Classe II – não perigosos: são divididos em duas outras subclasses, IIA (não inertes) e IIB (inertes).

- Subclasse IIA – não inertes: são os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com capacidade de acarretar riscos à saúde e ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações dos resíduos de classe I – perigosos ou subclasse IIB – inertes.

- Subclasse IIB – inertes: são aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa,

segundo a norma NBR 10007 (2004), e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, segundo a norma NBR 10006 (2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, executando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Em termos de classificação em função da natureza e origem, os resíduos sólidos são classificados em: domiciliar, comercial, público, serviços de saúde, industrial, construção civil, radioativos, portos, aeroportos e terminais rodoferroviários, agrícola e entulhos (ABNT, 2004).

Dentro da classe dos resíduos industriais, encontram-se os resíduos agroindustriais, que são aqueles provenientes do processamento de alimentos, fibras, couro, madeira, produção de açúcar e álcool, etc. Os efluentes, ou águas residuárias, podem ser o resultado da lavagem do produto, escaldamento, cozimento, pasteurização, resfriamento e lavagem do equipamento de processamento e das instalações. Os resíduos sólidos são formados pelas sobras de processo, descartes e lixo proveniente de embalagens, lodo de sistemas de tratamento de águas residuárias, além de lixo gerado no refeitório, pátio e escritório da agroindústria (MATOS, 2005).

A geração de resíduos e sua destinação final inadequada representam um problema de abrangência mundial, dos setores ambiental, sanitário e econômico. Uma vez gerado, o resíduo demanda soluções adequadas de forma a alterar o mínimo possível o meio ambiente e todos os elementos que fazem parte dele (FREIRE et al., 2014; FIJALKOWSKI et al., 2017).

As empresas geradoras de resíduos têm sido obrigadas a realizar o seu tratamento como forma de minimizar a contaminação dos solos, do ar e das nascentes, uma vez que, se não tratados e adequadamente manejados, os resíduos sólidos acabam sendo amontoados e enterrados, os líquidos são despejados em rios e mares e os gasosos são lançados no ar. Como exemplos de resíduos industriais contaminantes têm-se os resíduos de curtume, que contêm cromo em sua composição, e a vinhaça, produto resultante do processamento industrial da cana-de-açúcar (GUIMARÃES, 2012).

Raij et al. (1996) enquadraram na classificação de resíduos industriais a vinhaça, a torta de filtro, as borras, os resíduos de laticínios, etc. O termo lodo é mais frequentemente aplicado ao resíduo gerado nas estações de tratamento de esgoto, mas pode também ser usado para outros resíduos. Segundo Edwards et al. (2017), lodo é o resíduo produzido durante o tratamento de águas residuais. De acordo com a norma técnica P 4.230 (CETESB, 1999), lodo é o material resultante do processo de sedimentação no decantador secundário de sistemas de tratamento biológico ou em lagoas de tratamento, ou de processo de digestão.

2.2 Lodo de indústria de gelatina

A gelatina é uma mistura heterogênea de proteínas obtidas pela hidrólise do colágeno contido nos ossos e peles de animais. É comumente utilizada em indústrias como alimentos, produtos farmacêuticos, fotografia, cosméticos, entre outros (KRUTHIKA et al., 2013).

No ano de 2005, a produção de gelatina no Brasil era de 33 mil toneladas por ano, gerando portanto cerca de 198 mil toneladas de lodo (REIMANN, 2005). A GELITA é líder mundial na fabricação de proteínas de colágeno e fornece vários tipos de gelatina para todo tipo de aplicação. O presidente da Gelita para a América do Sul, Paulo Reimann, afirmou em 2005 que a produção era de 85 mil toneladas de gelatina por ano, das quais, 20 mil eram produzidas no Brasil, o que representa 60 % da produção brasileira (ABREU, 2015).

A principal matéria-prima do processo de produção da gelatina é o tecido conjuntivo, o colágeno de mamíferos (bovinos principalmente, e suínos), aves e peixes. O processo se inicia com um pré-tratamento onde a matéria-prima é submetida a uma série de lavagens e, em seguida, a um tratamento alcalino, que pode ser feito com hidróxido de cálcio ou com hidróxido de sódio, seguido de lavagem. A gelatina é extraída da matéria-prima pré-tratada com água quente e a solução resultante tem concentração de aproximadamente 6 %. Seguem-se os estágios de purificação, concentração, filtração, esterilização, secagem e moagem (GELITA, 2015).

Os resíduos líquidos gerados no processo de produção da gelatina são encaminhados às ETEs, das quais resultam os resíduos sólidos (lodos), ricos em matéria orgânica (REIMANN, 2005). Estes lodos são classificados de acordo com o tipo de tratamento que recebem: o primeiro, é designado lodo primário (LPG); o segundo, após passar por processos de biodigestão anaeróbia e lagoas de aeração, é chamado de lodo biológico (LBG). Os elementos químicos, nutrientes de plantas ou não, estão presentes tanto no LPG, quanto no LBG, porém em concentrações diferentes. De modo geral, os resíduos gerados na fabricação de gelatina variam em composição, dependendo do processo industrial. Uma das principais diferenças é a presença ou não de gordura.

Os resíduos sólidos orgânicos ricos em gordura devem ser tratados antes de serem aplicados aos solos para não causar prejuízos ao ambiente. O tratamento pode ser feito por meio de compostagem, para reduzir seu potencial poluidor e obter produto com boa composição para atuar como corretivo de acidez, pois apresenta pH elevado, e como fertilizante, devido aos altos teores de nitrogênio e cálcio (RIBEIRO, 2007). Os resíduos que não apresentam gordura

seguem para o tratamento por meio de decantadores e digestores. O lodo biológico de gelatina (LBG) é uma suspensão que apresenta umidade média superior a 98 % e que poderia ser classificado como lodo fluido, a exemplo da classificação utilizada na norma P-4002 para efluentes e lodos da indústria cítrica, embora para o LBG ainda não exista normatização (TANIGUCHI, 2010).

Na composição do lodo biológico de gelatina estão nutrientes de plantas em concentrações de interesse agrônomico (GUIMARÃES et al., 2009; TANIGUCHI, 2010).

Os lodos de indústria de gelatina geralmente são pobres em potássio (K) devido aos processos que lhes dão origem, com perdas do nutriente em solução. Entretanto, são considerados fontes de nitrogênio (N), e contribuem também com quantidades apreciáveis de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e zinco (Zn) (ABREU JR. et al., 2005). A presença e a concentração de N nos resíduos da indústria de gelatina são os pontos mais favoráveis para sua utilização.

Entre os elementos químicos não nutrientes, o sódio (Na) é o mais abundante e este é o aspecto mais limitante, uma vez que micronutrientes e outros elementos que demandam atenção especial, particularmente o cromo, ocorrem em concentrações muito pequenas em relação aos limites estabelecidos em legislação (GUIMARÃES et al., 2012; TANIGUCHI, 2010).

Brito e Rolim (2005) afirmam que nutrientes de natureza orgânica, ou seja, N, P e enxofre (S), são particularmente interessantes, mas elementos tais como Na, comum em resíduos industriais, são muitas vezes encontrados na composição juntamente com os nutrientes. A vinhaça é outro exemplo de resíduo agroindustrial conhecido por ser uma boa fonte de K para as plantas, mas também por aumentar o teor de Na no solo (ABREU JR. et al., 2002).

Diversos autores estudaram os lodos gerados na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) do processo de fabricação de gelatina (GUIDI, 2012; TANIGUCHI, 2010; GUIMARÃES, 2009; ARAUJO, 2006). Estes pesquisadores utilizaram o lodo biológico fornecido pela Gelita do Brasil, unidade de Mococa (SP) e avaliaram o seu potencial de aplicação como fertilizante. Guidi (2012) e Taniguchi (2010) avaliaram a produtividade da cana-de-açúcar e milho, respectivamente, em função da aplicação do lodo e os efeitos do lodo em atributos químicos do solo. Guimarães (2009) avaliou alterações em atributos químicos de solos provocadas pelas aplicações do mesmo. Araújo (2006) estudou o efeito do lodo na fertilidade do solo e no capim-tanzânia. Ribeiro (2007) utilizou o lodo biológico fornecido pela Gelico – Gelatinas Indústria & Comércio Ltda., em Campo Belo (MG) para avaliar o tratamento deste resíduo por meio da compostagem constituída de serragem de palha e café. Na Tabela 2.1

são mostrados os parâmetros obtidos na caracterização do lodo em cada um destes trabalhos e uma caracterização fornecida pela Bioagri (2005), citada por Guimarães (2009).

Tabela 2.1. Parâmetros de caracterização de lodos de indústria de gelatina.

Parâmetro	Guidi (2012)	Tanigushi (2010)	Guimarães (2009)	Ribeiro (2007)	Araújo (2006)	Bioagri (2005)
pH	8,0	8,1	8,3	9,5	12,5	7,6
Umidade (%)	98,7	98,7	98,5	-	-	-
COT (g.kg ⁻¹)	149,0	151,3	141,7	250,0	240,0	165,0
Nitrogênio total	64,3	71,1	68,0	95,0	30,0	10,6
N - NH ₄ ⁺	14,3	18,4	14,0	0,4	-	50,0
N - NO ₃ ⁻	0,4	0,4	0,2	0,1	-	41,7
Relação C/N	2,3	2,2	2,1	2,6	8,0	15,6
P (g.kg ⁻¹)	4,1	3,6	3,9	0,4	3,0	4,5
K (g.kg ⁻¹)	2,0	1,8	2,0	0,2	0,4	6,1
S (g.kg ⁻¹)	14,0	1,7	-	1,8	7,7	-
Ca (g.kg ⁻¹)	81,8	96,6	105,3	22,7	135,0	30,1
Mg (g.kg ⁻¹)	1,5	2,2	1,9	7,5	7,4	4,5
Mn (mg.kg ⁻¹)	-	-	-	54,7	116,0	-
Fe(mg.kg ⁻¹)	-	-	-	1139,9	2714,0	-
Zn (mg.kg ⁻¹)	-	-	-	60,1	82,0	-
Cu (mg.kg ⁻¹)	-	-	-	9,5	7,0	-
B (mg.kg ⁻¹)	-	-	-	19,0	-	-
Na (mg.kg ⁻¹)	54000,0	47400,0	41000,0	30150,5	16000,0	34166,0
Cr (g.kg ⁻¹)	-	-	-	-	18,0	-
Ni (g.kg ⁻¹)	-	-	-	-	9,0	-
Pb (g.kg ⁻¹)	-	-	-	-	3,0	-
Cd (g.kg ⁻¹)	-	-	-	-	-	-

- não determinado.

Em 1995, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) criou o *Title 40 of the code Federal Regulations (CFR), Part 503* que são um conjunto de regras que buscam proteger a saúde pública e o ambiente dos efeitos adversos do bio sólido aplicado à agricultura. Este documento foi atualizado em 2003 (EPA, 2003).

No Brasil, para obtenção do registro do lodo como produto ou a autorização para o uso agrícola, é necessário atender as exigências estabelecidas na Instrução Normativa do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento nº 23 e 27 (MAPA, 2005; MAPA, 2006) ou estar de acordo com os limites impostos na Resolução Federal do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 375 (CONAMA, 2006).

Um dos maiores riscos associados ao uso de biossólidos é a presença de microrganismos patogênicos oportunistas como vírus, bactérias, protozoários e helmintos presentes neste material, para os quais são necessárias diferentes técnicas para minimizá-los (TOZE e SIDHUA, 2011).

Outro aspecto de relevância é a presença de metais pesados no composto. Estes contaminantes inorgânicos não são biodegradáveis e, portanto, podem se acumular no solo e entrar na cadeia alimentar e no bio-concentrado no meio ambiente. Historicamente, os mais importantes são os metais pesados, classificados como elementos químicos com uma densidade específica superior a $4,5 \text{ g cm}^{-3}$ (FIJALKOWSKI et al., 2017; KABATA-PENDIAS, 2010).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) definem biossólido como lodo de esgoto tratado que atende os níveis adequados de poluentes ou patógenos e é aplicado como fertilizante (EPA, 2003; CONAMA 2006).

Portanto, para ser usado na agricultura com segurança, o biossólido obtido a partir do lodo deve obedecer a dois critérios: de limites de teores de metais pesados e da densidade de patógenos, devendo ser tratado para reduzir a atração por vetores. Nas Tabelas 2.2 e 2.3 mostram-se os níveis máximos admissíveis de metais pesados e a concentração máxima de patógenos de acordo com as regulamentações de alguns órgãos ambientais (CONAMA, 2006).

A caracterização microbiológica do lodo, de acordo com a norma nº 375 (CONAMA, 2006) define em que Classe ele se enquadra. O lodo Classe A pode ser utilizado sem restrições, inclusive para horticultura, enquanto que o lodo Classe B é de uso mais restrito, devendo ser aplicado em grandes culturas, reflorestamento e outras situações em que o risco pode ser mais controlado.

Para que o lodo possa ser utilizado de maneira segura são recomendados processos de tratamento que garantam a redução do teor de patógenos para níveis abaixo dos limites estabelecidos (EPA, 2003; CONAMA, 2006).

Tabela 2.2. Níveis máximos admissíveis de metais pesados em biossólido.

Metal	Concentração máxima permitida no lodo (base seca) mg.kg ⁻¹			
	EPA (2003)	CONAMA 375 (2006)	IAP (2003)	CETESB (1999)
Arsênio (As)	75	41	-	75
Bário (Ba)	-	1300	-	-
Cádmio (Cd)	85	39	20	85
Cromo (Cr)	3000	1000	1000	-
Cobre (Cu)	4300	1500	1000	4300
Chumbo (Pb)	840	300	750	840
Mercúrio (Hg)	57	17	16	57
Molibdênio (Mo)	75	50	-	75
Níquel (Ni)	420	420	300	420
Selênio (Se)	100	100	-	100
Zinco (Zn)	7500	2800	2500	7500

- Não definidos.

Tabela 2.3. Concentração máxima de patógenos admitida no biossólido.

Parâmetros	Concentração máxima de patógenos permitida			
	Classe A		Classe B	
	EPA (2003)	CONAMA 375 (2006)	EPA (2003)	CONAMA (2006)
Coliformes TT (E. coli) NMP ^a . g _{ST} ⁻¹	*10 ³	10 ³	*2.10 ⁶	10 ⁶
Ovos viáveis de helmintos ovo. g _{ST} ⁻¹	0,25	0,25	-	10
Salmonella NMP.(10 g _{ST}) ⁻¹	*<3NMP/4 g _{ST}	ausência	*<3NMP/4 g _{ST}	-
Enterovírus UFP ^b . g _{ST} ⁻¹	0,25	0,25	-	-

* Apenas um dos dois critérios precisa estar de acordo com a regulamentação.

^a NMP- número mais provável

^b UFP – unidade formadora de colônia

2.3 Processos recomendados para o tratamento do lodo

Nas normas Conama nº 375 e EPA 40 CFR Part 503 são recomendados 11 processos de tratamento de lodo para a redução de agentes patogênicos (CONAMA, 2006; EPA, 2003)

No Quadro 2.1 são relacionados os processos aceitos para redução significativa de patógenos (necessários para a obtenção de lodos de esgoto ou produto derivado Classe B) e no Quadro 2.2 são relacionados os processos aceitos para redução adicional de patógenos (necessários para a obtenção de lodos de esgoto ou produto derivado Classe A) e redução da atratividade de vetores. Outros processos poderão ser propostos, desde que haja comprovação de sua eficiência e seja aceito pelo órgão ambiental.

Quadro 2.1. Processos de redução significativa de patógenos (Lodo Classe B).

Processo recomendado	Descrição do processo
Digestão aeróbia	Ar ou oxigênio, com retenções mínimas de 40 dias a 20 °C ou por 60 dias a 15 °C
Secagem	Em leitos de areia ou em bacias pavimentadas (secagem natural ao ar) ou não durante 3 meses no mínimo, e neste período deve haver dois meses com temperatura superior a 0 °C
Digestão anaeróbia	Deve ocorrer por pelo menos 15 dias a uma temperatura de 35 a 55 °C ou por 60 dias a 20 °C.
Compostagem	Por qualquer um dos métodos acima, sendo a temperatura da biomassa superior a 40 °C por pelo menos 5 dias, e desde que conservado ao longo de 4 horas sucessivas nos 5 dias à uma temperatura maior que 55 °C.
Estabilização com cal	É adicionada cal ao lodo, o suficiente para elevar o pH a 12 depois de 2 horas de contato.

Fonte: CONAMA, 2006; EPA, 2003.

Quadro 2.2. Processos de redução adicional de patógenos (Lodo Classe A).

<i>Processo recomendado</i>	<i>Descrição do processo</i>
Compostagem	Confinada ou em leiras aeradas (3 dias a 55 °C no mínimo) ou com revolvimento das leiras (15 dias a 55 °C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias ao longo dos 15 do processo);
Secagem térmica	A umidade do lodo deve ser igual ou menor a 10 %. A temperatura das partículas de lodo ou a temperatura de bulbo úmido do gás em contato com o lodo deve ser superior a 80 °C
Tratamento térmico	O lodo é aquecido a 108 °C no mínimo, pelo menos durante 30 minutos
Digestão aeróbia termofílica	Tempos de residência de 10 dias a temperaturas de 55 a 60 °C;
Irradiação	Raios beta a dosagens mínimas de 1 megarad a 20 °C, ou com raios gama na mesma intensidade e temperatura, a partir de isótopos de Cobalto 60 ou Césio 137
Pasteurização	Pasteurização com a temperatura do lodo mantida no mínimo à 70 °C, durante pelo menos 30 minutos

Fonte: CONAMA, 2006; EPA, 2003.

Após os processos de estabilização adequados o material pode ser denominado como “biossólido” (CONAMA, 2006; EPA, 2003). A norma P 4230 (CETESB, 1999), vigente no estado de São Paulo, define o biossólido como o lodo resultante do sistema de tratamento biológico de despejos líquidos sanitários, com as características tais que atendam as condições normativas para uma utilização segura na agricultura. Este mesmo conceito é ampliado pela Water Environmental Federation (1996), que afirma que os lodos tratados ou beneficiados pelos processos de estabilização citados nas Tabelas 2.4 e 2.5, podem apresentar utilização agrícola.

O Instituto Ambiental do Paraná (IAP) define como biossólido o resíduo de composição predominantemente orgânica gerado nos sistemas de tratamento de esgoto que adequadamente processados apresentam potencial para utilização benéfica e segura para produção agropecuária (IAP, 2003).

Os processos normalmente empregados na separação sólido-fluido do lodo, embora apresentem uma alta eficiência de captura de sólidos, ainda geram uma torta com alto teor de umidade (aproximadamente 70 % de umidade após o processo de centrifugação). Com isso, o processo de secagem vem se tornando uma alternativa na área de saneamento ambiental, visto que além da redução de volume, poderá contribuir para a eliminação de microrganismos patogênicos em função da temperatura decorrente do processo de secagem.

2.4 Processo de secagem

A secagem é uma operação destinada a eliminar água, ou qualquer outro líquido, contido em um sólido, por meio de adição de calor (FOUST, 1982; McCABE et al., 2001). Cook & Dumont (1991) afirmam que a secagem é utilizada para preservação e redução do peso e volume, tornando o transporte e a embalagem economicamente mais vantajosos, aumentando também o prazo de armazenamento de produtos, concentrando substâncias para mudar ou melhorar o sabor e agregar valor ao produto.

Segundo Strumillo & Kudra (1986), o material submetido ao processo de secagem, consiste geralmente da matéria seca (matriz) e certa quantidade de umidade, principalmente no estado líquido. Esta umidade apresenta diferentes propriedades físicas, químicas, estruturais, mecânicas, bioquímicas, entre outras, que resultam das propriedades do esqueleto e do estado da água no seu interior. Porém, as propriedades que exercem maior influência no processo de secagem são as propriedades mecânicas – estruturais, o tipo de umidade no sólido e a ligação umidade – material. Os autores definiram os tipos de umidade que podem ser encontradas em um sólido:

- umidade superficial: este é o líquido que existe como um filme externo sobre o material, devido aos efeitos de tensão superficial;

- umidade não ligada, livre ou capilar: é todo o líquido contido em um material não-higroscópico. No caso de um material higroscópico, o excesso do conteúdo de umidade de equilíbrio corresponde à umidade de saturação. Este tipo de umidade pode estar presente em duas formas: no estado funicular, onde o líquido existe em estado contínuo dentro do corpo poroso; e no estado pendular, onde o líquido em torno e entre as partículas discretas está em condição descontínua, sendo a umidade intercalada por bolhas de ar. A Figura 2.1 apresenta esquematicamente as duas formas da umidade não ligada.

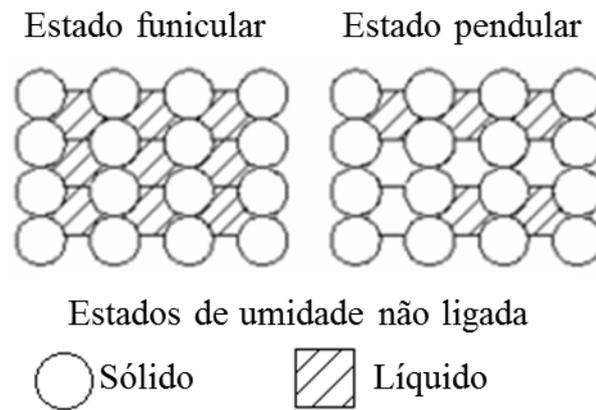


Figura 2.1. Estados da umidade não-ligada.
Fonte: adaptado de Strumillo e Kudra (1986).

No estado funicular o líquido movimenta-se para a superfície externa do material por ação capilar. Com a remoção da umidade, a continuidade da fase líquida é gradualmente interrompida, devido à sucção de ar para dentro dos poros deixando porções de umidade isoladas (bolsas), formando então o estado pendular. No entanto, o fluxo capilar é possível somente em uma escala localizada. Quando o material está próximo ao estado seco, a umidade é mantida como uma monocamada de moléculas sobre a parede dos poros e é removida principalmente por fluxo de vapor.

– Umidade ligada, higroscópica ou dissolvida: é o líquido que exerce uma pressão de vapor menor que a do líquido puro em uma dada temperatura. Esta pode estar em várias condições: na forma líquida retida em pequenos poros, em solução contida nas paredes celulares, adsorvida química ou fisicamente.

Segundo McCabe et al. (2001), a umidade livre é a diferença entre o conteúdo de umidade total do sólido e a da umidade de equilíbrio. A umidade de equilíbrio é definida como a menor umidade que um material pode atingir em um processo de secagem sob condições constantes de pressão e temperatura (FOUST et al., 1982). Ou seja, a umidade livre é a umidade que pode ser removida, em uma determinada condição de processo, e pode conter umidade ligada e não ligada (MUJUMDAR e MENOM, 1995).

O teor de umidade é geralmente expresso em função de sua massa de matéria seca, já que esta permanece constante durante todo o processo de secagem, ao contrário do volume úmido, que pode variar e o qual não é indicado para expressar o teor de umidade. Desta maneira, o teor de umidade em base seca (b.s.) é expresso como sendo a razão entre a massa de água presente no grão e a massa de matéria seca, de acordo com a Equação 2.1:

$$X_{b.s.} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \quad (2.1)$$

Em que: $X_{b.s.}$: teor de umidade em base seca (b.s.); m_{H_2O} : massa de água; m_s : massa seca.

O teor de umidade em base úmida (b.u.) é determinado por meio da razão entre a massa de água e massa total presente, conforme Equação 2.2.

$$X_{b.u.} = \frac{m_{H_2O}}{m_T} \quad (2.2)$$

Em que: $X_{b.u.}$: teor de umidade em base úmida; m_T : massa total.

2.4.1 Isotermas de equilíbrio

As isotermas de sorção consistem na representação da umidade relativa de equilíbrio, em função da atividade da água a uma certa temperatura. Isotermas de sorção são ferramentas termodinâmicas úteis para prever a interação entre os componentes do material e da água (PEDRO et al., 2010). Podem ser utilizadas também em modelos preditivos de secagem e no projeto de secadores (FASINA, 2006).

A atividade da água em um sólido é expressa como a razão entre a pressão parcial de vapor d'água na fase gasosa em equilíbrio com a fase sólida úmida a uma dada temperatura e pressão de vapor de saturação d'água à mesma temperatura, sendo também uma função da umidade relativa do ambiente, representada pela Equação 2.3:

$$a_w = \frac{P_w}{P_{sat(t)}} = \frac{UR}{100} \quad (2.3)$$

Em que: a_w : atividade da água; UR: umidade relativa do meio ambiente; P_w : pressão parcial de vapor do produto; $P_{sat(t)}$: pressão de saturação de vapor d'água pura à mesma temperatura.

Segundo Vieira e Rocha (2008), quando a atividade de água em um sólido é alta (próxima da unidade), a água nele contida encontra-se livre e durante a secagem comporta-se como se estivesse pura. É o caso de vários produtos biológicos muito hidratados. Para baixos valores de atividade de água, a umidade presente no sólido encontra-se ligada e a remoção desta água, cuja pressão de vapor saturado é menor do que se ela estivesse pura é mais difícil. A água

ligada é fixa à matéria seca por ligações de diferentes tipos (ligações químicas, água fixa por capilaridade nos poros, etc.).

Foust et al. (1982) ressaltam a importância das isotermas para qualquer que seja o material estudado, mostrando que com uma única curva de isoterma de equilíbrio obtém-se o comportamento térmico do material mediante as condições ambientais. A determinação coerente de uma isoterma é de fundamental importância, uma vez que pode ser aplicada nos modelos de secagem, colaborando para uma predição adequada dos perfis de umidade e temperatura (JOHANN, 2016).

Além de sua importância na predição dos processos de secagem, as isotermas de sorção são de grande importância para prever processos armazenamento de um produto (PAGLARINI et al., 2013). Samapundo et al. (2007) e Tunc e Duman (2007) destacam ainda a utilidade do estudo das isotermas na seleção de um equipamento adequado de secagem, do material da embalagem, na previsão de estabilidade durante a vida útil de armazenamento e transporte do produto. Dessa maneira, a qualidade do material biológico pode ser preservada mediante o estudo de parâmetros como secagem e armazenamento (SOUSA et al., 2014).

As isotermas de sorção são divididas em três regiões distintas, de acordo com o estado em que se encontra a água presente (MUJUMDAR & MENON, 1995; SMITH, 2003), como mostra a Figura 2.2.

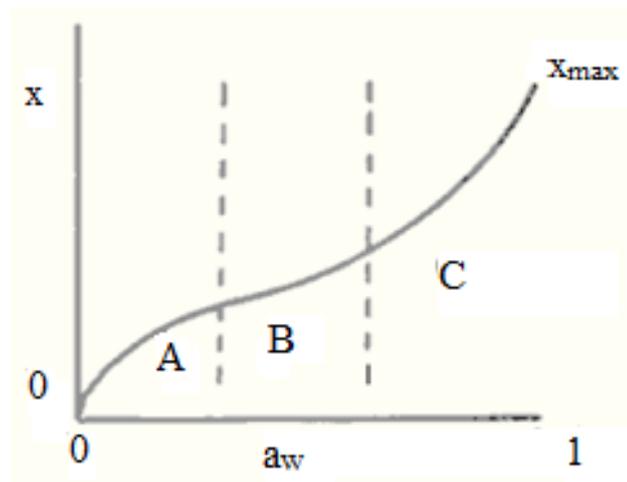


Figura 2.2. Isoterma de sorção. Fonte: Mujumdar e Menon,1995.

-Região A ($a_w < 0,2$): nesta região, a água está ligada a sítios individuais. Esta é a região em que são formadas as camadas monomoleculares. Dentre as principais características desta região destacam-se a estabilidade, não congelamento e a impossibilidade de remoção durante a secagem do produto. Corresponde à água que está fortemente ligada ou indisponível para reações químicas;

- região B ($0,20 < a_w < 0,60$): nesta região a água encontra-se mais fracamente ligada. Esta região representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada e é onde se iniciam as reações químicas e bioquímicas que necessitam de água, pois aumenta a mobilidade dos solutos;

- região C ($a_w > 0,60$): nesta região tem-se praticamente água livre condensada nas estruturas capilares. A água é mantida no interior do material por forças de ligação fracas, sendo facilmente removidas. Nesta região da isoterma a água presente é totalmente livre para reação.

As curvas das isotermas de sorção são classificadas por Brunauer et al. (1938), em cinco formas diferentes, como mostra a Figura 2.3.

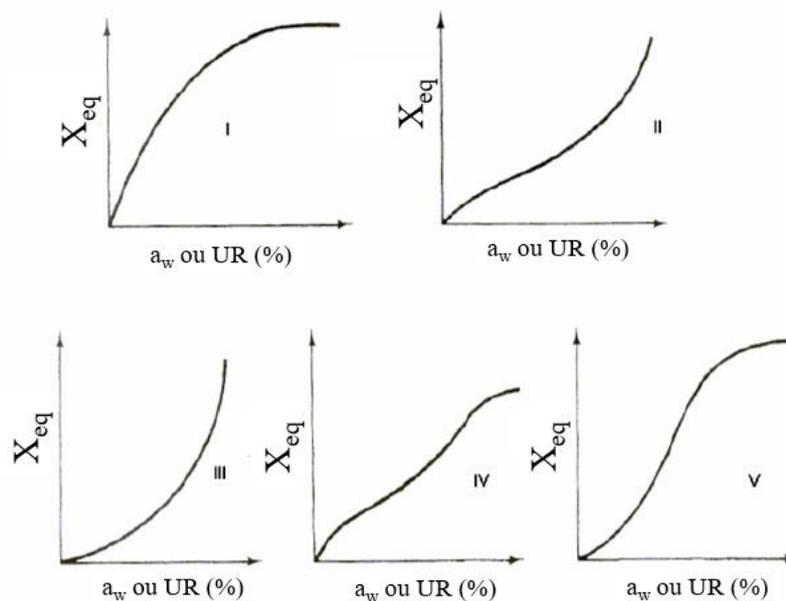


Figura 2.3. Classificação das curvas de sorção. Adaptado de Brunauer et al., 1938.

- Tipo I – Isotherma Langmuir: obtida pela adsorção pura em camada monomolecular;
- tipo II – Isotherma Sigmoidal ou forma de S: característica de formação de multicamadas de moléculas adsorvidas sobre a superfície do sólido. Frequentemente encontrada em sólidos não porosos ou com poros maiores do que microporos;
- tipo III – Isotherma formato “J”: seu formato também sugere adsorção em multicamadas, porém são raramente encontradas em sólidos não porosos;
- tipo IV: nesta isoterma ocorre condensação capilar, em se observa a formação da monocamada seguida de adsorção de multicamadas;
- tipo V – também observa-se a formação da monocamada seguida de adsorção de multicamadas, porém não é possível identificar a formação da primeira camada de adsorção.

2.4.1.1 Modelos de isotermas

Alguns modelos (teóricos, empíricos e semi-empíricos) têm sido propostos na literatura para descrever o fenômeno de sorção. Entretanto, mesmo quando apresentam bons ajustes, dificilmente conseguem descrever satisfatoriamente o processo ao longo de toda a faixa de atividade da água. O Quadro 2.3 mostra algumas equações (2.4 a 2.12) utilizadas para descrever o comportamento das curvas de dessorção de umidade.

Quadro 2.3. Modelos utilizados para descrever o comportamento das curvas de dessorção de umidade.

<i>Modelo</i>	<i>Equação</i>
Langmuir (1918)	$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C a_w}{1 + C a_w} \quad (2.4)$
Brunauer-Emmett-Tetter (BET) (1938)	$X_e = \frac{(X_m C_{BET} a_w)[1 - (n + 1)a_w^n + n a_w^{n+1}]}{(1 - a_w)[1 + (C_{BET} - 1)a_w - C_{BET} a_w^{n+1}]} \quad (2.5)$
Guggenheim-Anderson-de Bôer (GAB) (1983)	$X_e = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (2.6)$
Generalised D'Arcy-Watt (Furmaniak et al., 2007).	$X_e = \frac{X_m C a_w}{(1 + K a_w)} \frac{1 - K(1 - w)a_w}{(1 - K a_w)} \quad (2.7)$
Oswin (1946)	$X_e = A \left(\frac{a_w}{1 + a_w} \right)^B \quad (2.8)$
Henderson (1952)	$X_e = \left(\frac{-\ln(1 - a_w)}{B} \right)^{\frac{1}{A}} \quad (2.9)$
Smith (1947)	$X_e = A - (BT) - C \ln(1 - a_w) \quad (2.10)$
Henderson-Thompson (Thompson et al., 1968)	$X_e = \left(\frac{\ln(1 - a_w)}{-A(T + B)} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (2.11)$
Oswin Modificada (PARK et al., 2008)	$X_e = \frac{A + (B T)}{\left(\frac{1 - a_w}{a_w} \right)^{\frac{1}{C}}} \quad (2.12)$

Em que: a_w : atividade da água; X_e : umidade de equilíbrio (b.s.); T : temperatura (K); $A, B, C, C_{BET}, K, n, X_m$: parâmetros das equações.

A Equação de Langmuir (1918) pode ser utilizada para descrever o comportamento de isotermas Tipo I. Brunauer, Emmett e Teller (BET) (1938) elaboraram a teoria de generalização

do conceito de Langmuir e este modelo tem sido aplicado com êxito para diversos materiais. Guggenheim, Anderson e de Bôer (GAB) estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando numa equação tripamétrica, que permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até a atividade de água de 0,9 (PARK et al., 2008). Quando $K = 1$, a equação de GAB fica reduzida à equação de BET linearizável.

De acordo com Pedro et al. (2010), o modelo de GAB apresenta a vantagem de ser um modelo relativamente simples e com parâmetros que têm definição física, além de representar adequadamente os dados experimentais na faixa de atividade de água de 0,10 a 0,90.

O modelo GDW (Generalised D'Arcy e Watt) foi proposto recentemente e assume a existência de sítios de adsorção multicamada na superfície sólida e a possibilidade de que uma molécula de água anexada a um sítio primário possa criar mais de um site de adsorção secundária (Furmaniak et al., 2007).

Pela facilidade de quantificação da isoterma, existem muitas equações empíricas que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos (PARK et al., 2008).

O modelo de Oswin é um modelo empírico baseado na expansão matemática para curvas de formato sigmoideal com apenas duas constantes e de fácil linearização (CHINNAN e BEAUCHAT, 1985). O modelo empírico de Henderson é um dos modelos mais utilizados para a predição de isotermas, assim como a suas versões modificadas (PARK et al., 2008).

2.4.2 Cinética de secagem

A cinética de secagem está associada à mudança do conteúdo médio de umidade e da temperatura média do material úmido com o tempo e possibilita a determinação de parâmetros como a quantidade de água evaporada, o tempo de secagem, o consumo de energia, entre outros (STRUMILLO e KUDRA, 1986). O estudo da cinética de secagem é de grande importância para o dimensionamento do secador, pois permite determinar o tempo de residência do material no interior do equipamento (VIEIRA, 2006).

De acordo com Strumillo e Kudra (1986), a evolução do processo de secagem pode ser ilustrada pelas curvas típicas de secagem:

- *curva de secagem*: apresenta a variação do teor de umidade do sólido em função do tempo;

- *curva da taxa de secagem*: apresenta a taxa de secagem em função do teor de umidade ou do tempo de secagem; e

- *curva de temperatura*: apresenta a temperatura do produto durante a secagem em função do tempo de secagem.

Nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6 apresentam-se, respectivamente, a curva de secagem, a curva da taxa de secagem e a curva de temperatura.

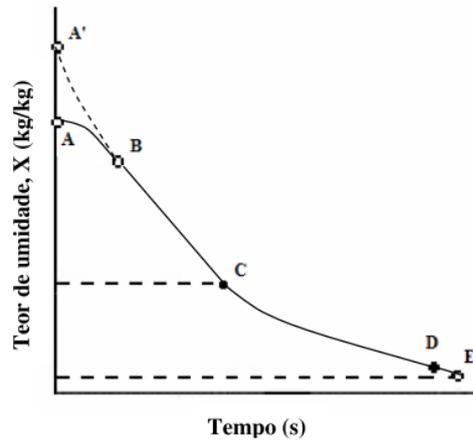


Figura 2.4. Curva de secagem.
Fonte: adaptado de Strumillo e Kudra (1986).

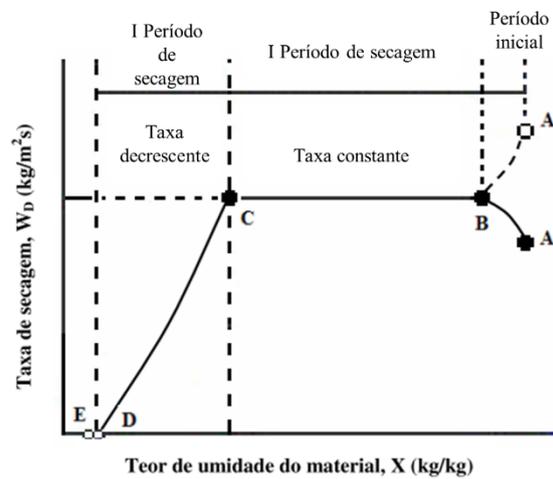


Figura 2.5. Curva de secagem.
Fonte: adaptado de Strumillo e Kudra (1986).

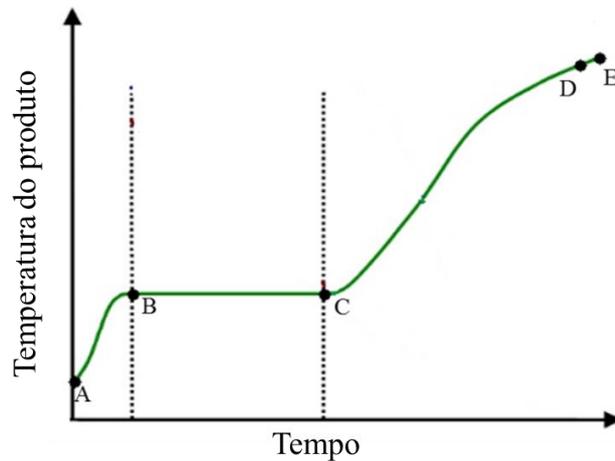


Figura 2.6. Curva de temperatura.
Fonte: adaptado de Park et al. (2007).

Podem-se observar três fases ou períodos de secagem distintos: período inicial de secagem (ou período de adaptação), período de secagem à taxa constante e período à taxa decrescente, como segue:

-período inicial de secagem: neste período, representado pelo segmento A-B, o sólido está em contato com ar de temperatura normalmente superior à temperatura inicial do sólido. Por esta razão, neste período, também chamado de período de adaptação, a taxa de secagem aumenta até a temperatura da superfície do sólido atingir o valor correspondente ao patamar do período de taxa constante. Cabe ressaltar que para camadas finas, este período é curto e na prática muitas vezes pode ser desprezado ou desconsiderado (DENG et al., 2011).

-período de secagem à taxa constante: nesta fase (segmento B-C), a superfície exposta do sólido está saturada e é coberta por um filme contínuo de água livre, que age como se o sólido não existisse. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante. A diminuição linear do teor de umidade com o tempo ocorre continuamente até atingir o ponto crítico (X_C). Este é o instante em que o transporte do líquido do interior do sólido para a superfície é insuficiente para manter o filme contínuo sobre a superfície do sólido.

Geankoplis (1983) e Strumillo e Kudra (1986) explicam que, neste período, o transporte da umidade dentro do sólido é suficientemente rápido para manter a condição de saturação na superfície, então, quando se considera a resistência à transferência de massa, os fatores limitantes da taxa de secagem são as condições externas e a camada limite da fase gasosa. Por esta razão, a velocidade de secagem é controlada pela rapidez com que ocorre a transferência

de calor para a superfície evaporante e, na ausência de transferência de calor por radiação ou condução, a temperatura de superfície é aproximadamente a da temperatura de bulbo úmido.

-período de secagem à taxa decrescente: neste período, representado pelo segmento C-D, quantidade de umidade que chega à superfície do material decresce gradualmente. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa e o fluxo de calor absorvido pelo sólido é utilizado para evaporação da água na superfície e para aumentar a temperatura do sólido. O fator limitante nessa fase é a difusão da umidade intrapartícula. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. O teor de umidade diminui até atingir o teor de umidade de equilíbrio do material X_{eq} , representado pelo ponto E.

2.4.3 Modelos matemáticos de cinética de secagem

Os processos de secagem envolvem simultaneamente fenômenos de transferência de calor e massa. O desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevem estes mecanismos de transferência baseia-se em três categorias principais: teórica, semi-empírica e empírica.

As aproximações teóricas relacionam a equação da difusão ou as equações simultâneas de transferência de calor e massa; as aproximações semi-teóricas relacionam equações teóricas aproximadas; e, as equações empíricas são facilmente aplicadas à simulação de secagem dependendo apenas dos dados experimentais. O ajuste dos modelos e a simulação dos dados da cinética de secagem podem auxiliar no projeto de secadores e otimização do processo (AFZAL e ABE, 2000).

Vieira (2006) afirma que o processo de secagem envolve fenômenos complexos de transferência de calor e de massa que dificultam a descrição matemática em escala microscópica. Por esta razão existem diversos modelos matemáticos que buscam representar a cinética de secagem quando a resistência externa à transferência de calor e de massa é eliminada ou minimizada.

Cabe ressaltar que Park et al. (2001) observaram que o fenômeno de secagem não pode ser generalizado para materiais biológicos, pois possuem características próprias e propriedades que podem sofrer importantes alterações durante a secagem. As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem.

Como a maioria dos sólidos orgânicos é amorfa ou fibrosa ou gelatinosa, estes materiais retêm a umidade como parte integral da estrutura do sólido, ou então a retêm no interior de fibras ou de poros delgados internos. Dessa forma, o movimento da umidade é lento e provavelmente ocorre pela difusão do líquido através da estrutura do sólido. As camadas superficiais tendem a secar mais rapidamente que no interior e a torta pode apresentar fissuras ou se deformar, ou ainda poderá se formar um revestimento relativamente impermeável de material parcialmente seco que iniba o desenvolvimento da secagem no interior do sólido (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

A retirada de umidade interna do material, a qual apresenta resistência à transferência de massa, e que tem como variável de processo de maior influência a temperatura, pode ser descrita pela segunda Lei de Fick (Equação 2.13), baseada da teoria da difusão da umidade como líquido ou vapor:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -D_{ef} \cdot \nabla^2 \cdot X \quad (2.13)$$

Em que: X: teor de umidade (b.s.); t: tempo (s); D_{ef} : difusividade efetiva ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Crank (1975) apresenta algumas soluções analíticas em forma de séries para a equação da difusão, baseadas em diferentes hipóteses e condições inicial e de contorno. Considerando que o mecanismo de difusão no interior da partícula limita a transferência de massa global, o teor de umidade inicial é uniforme ao longo da amostra e a difusividade efetiva é constante e independente do teor de umidade da amostra, a solução analítica da Equação 2.13 para uma placa plana é dada pela Equação 2.14:

$$\frac{X - X_0}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^{*2}}\right) \quad (2.14)$$

Em que X: teor de umidade (b.s.); X_{eq} : teor de umidade de equilíbrio (b.s.); X_0 : teor de umidade inicial (b.s.); L^* é a metade da espessura do material (m) e t é o tempo de secagem (min). Para tempos longos tempos de secagem, pode-se truncar a Equação 2.14 no primeiro termo da série, obtendo-se a Equação 2.15:

$$\frac{X - X_0}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^{*2}}\right) \quad (2.15)$$

Alguns modelos semi-teóricos se baseiam na teoria de difusão (PARRY, 1985) e levam em consideração que a resistência ocorre numa camada fina na superfície das partículas. Este modelo é expresso pela Equação 2.16 e estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre:

$$\frac{dX}{dt} = -K \cdot (X - X_{eq}) \quad (2.16)$$

Em que: K: constante de secagem (min^{-1}).

Scheufele et al. (2015) afirmam que a transferência de umidade em uma matéria depende de parâmetros como difusividade, condutividade térmica e coeficientes de transferência de calor e massa. Entretanto, em alguns casos, a constante de secagem (k) é usada como combinação destes parâmetros de transporte.

De acordo com Bennamoun et al. (2014) e Li et al. (2014), os modelos de Lewis (1921), Page (1949), Henderson e Pabis (1961) são modelos clássicos de secagem que têm sido extremamente aplicados para representar os processos de secagem em camada fina com bons ajustes.

Para as Equações 2.18, 2.19, 2.20, 2.21 e 2.22, o termo X_R representa a razão do conteúdo de umidade e pode ser calculado pela Equação 2.17:

$$X_R = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2.17)$$

Lewis (1921) sugeriu um modelo semi-empírico, análogo à Lei de Resfriamento de em sua forma integral. Este modelo, também conhecido como “Lei exponencial”, é mostrado pela Equação 2.18:

$$X_R = e^{(-k.t)} \quad (2.18)$$

Page (1949) propôs uma pequena modificação no modelo proposto por Lewis (1921), gerando um novo modelo exponencial e mais preciso para descrever a cinética de secagem, conhecido como Equação de Page para camada fina (Equação 2.19).

$$X_R = e^{(-k.t^n)} \quad (2.19)$$

Henderson e Pabis (1961), com a secagem de sementes de trigo, propuseram um modelo matemático semi-empírico 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, conforme a Equação 2.20:

$$X_R = a. e^{(-k.t)} \quad (2.20)$$

No caso de equações empíricas, destaca-se o modelo Logarítmico (MIDILLI; KUCUK, 2003), mostrado pela Equação 2.21, que tem sido aplicado com êxito em trabalhos de secagem de lodo (BENNAMOUN et al., 2010; BENNAMOUN et al., 2014; LI et al., 2014):

$$X_R = a. e^{(-k_1.t)} + c \quad (2.21)$$

Em que: a, b, c, k, n: parâmetros dos modelos de secagem.

Recentemente, Danish et al. (2016) propuseram um novo modelo cinético para a secagem de lodo na presença de óxido de cálcio (CaO) e hipoclorito de sódio (NaClO), mostrado na Equação 2.22:

$$X_R = e^{(-k.t^n)} + a \quad (2.22)$$

2.5 Secagem do lodo

O progresso tecnológico no campo da secagem tem permitido o desenvolvimento de várias técnicas que podem ser divididas principalmente em três maneiras: secagem por condução, secagem convectiva e secagem solar. Entretanto, há a possibilidade de combinar diferentes métodos de secagem e, conseqüentemente, processos de secagem híbridos ou combinados (BENNAMOUN et al., 2013a).

Na *secagem convectiva* o ar ou vapor aquecido passa diretamente pelo produto causando a evaporação da água presente. Estes tipos de secadores podem ser usados com aquecimento direto ou indireto por meio da queima de combustíveis fósseis, biogás, queima de biomassa, trocadores de calor, ou por uma combinação de dois equipamentos em escala industrial (ARLABOSSE et al., 2012). Em escala semi-industrial e laboratorial podem ser utilizadas resistências elétricas como fontes de aquecimento como mostraram Li et al. (2014), Bennamoun et al. (2014), Bennamoun et al. (2013a), Serenoti et al. (2010), Vieira et al. (2006a) e Leonard et al. (2008, 2004a, 2003). Os secadores convectivos industriais mais utilizados são: secadores

de correia, secadores flash, secadores de leito fluidizado, secadores rotativos e *spray dryer*, mostrados na Figura 2.7.

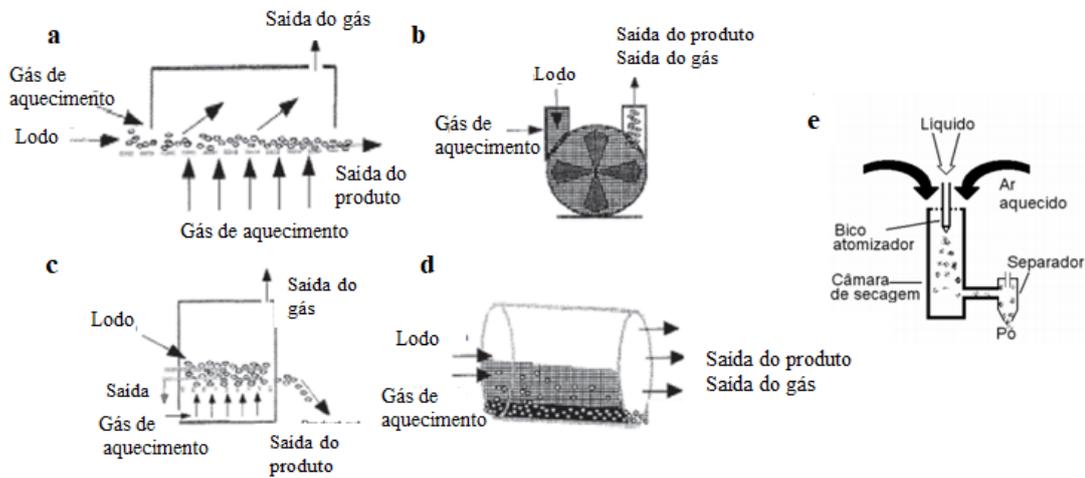


Figura 2.7. Representação de alguns tipos de secadores convectivos industriais de lodos: a) secador de correia, b) secador flash, c) secador de leito fluidizado e d) secador rotativo e e) *spray dryer*. Fonte: adaptado de Lowe (1995) e Labmaç (2003).

Na *secagem por condução* a operação ocorre por aquecimento da superfície do secador que transfere o calor para o lodo. Geralmente, são utilizados como fluido de aquecimento óleo térmico ou vapor saturado aquecidos numa caldeira com combustível fóssil ou biomassa. Na Figura 2.8 são mostrados três modelos de secadores condutivos (secador de disco, secador de pás e secadores de filme ou camada fina).

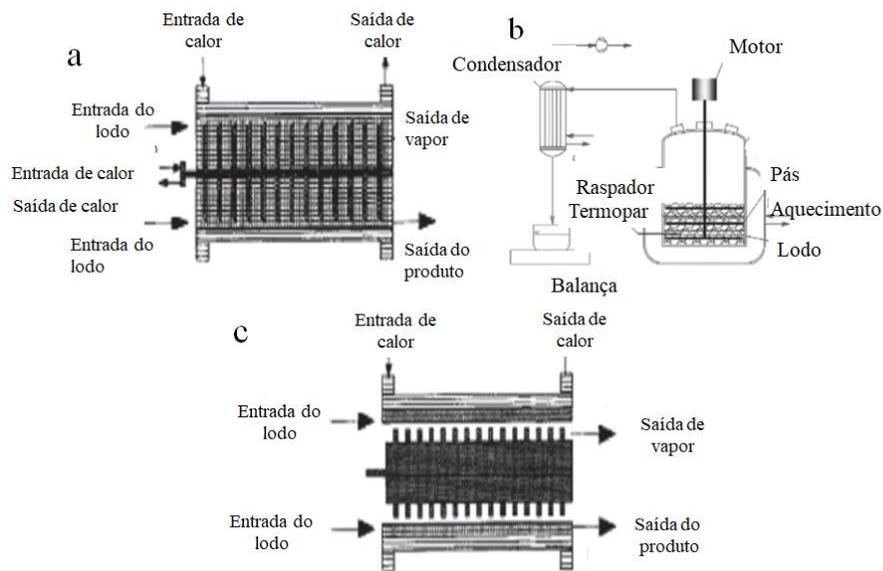


Figura 2.8. Representação de alguns tipos de secadores condutivos industriais de lodos: a) secador de disco, b) secador de pás e c) secadores de filme ou camada fina.

Fonte: adaptado de Lowe (1995) e Yan et al. (2009).

A *secagem solar* é realizada em câmaras abertas ou fechadas. A superfície é aquecida pela da radiação solar e o lodo é colocado em camadas entre 40 e 80 cm de altura. É utilizada ventilação natural ou forçada para renovar o ar dentro da câmara de secagem. Em alguns sistemas são utilizados métodos automáticos para espalhar o lodo e transportá-lo, renovando assim sua superfície de transferência de calor e massa e evitando a formação de crosta, ou seja, endurecimento da superfície do leito (BENNAMOUN, 2012). Na Figura 2.9 são mostrados dois modelos de secadores solar.

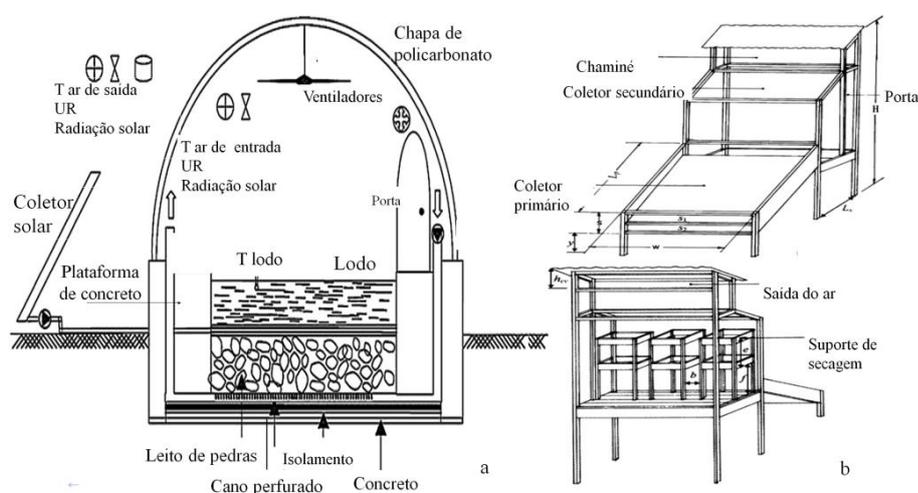


Figura 2.9. Representação de alguns tipos de secadores solar desenvolvidos: a) planta de secagem solar coberta b) secador de pás.

Fonte: adaptado de Bennamoun (2012) e Forson et al. (2007).

Algumas as técnicas de desidratação mecânica clássicas também são utilizadas com o objetivo de remover a água, como filtração, compressão e centrifugação. Entretanto, tais operações dificilmente conseguem uma concentração maior do que 20-30 % de teor de sólidos secos. Dessa maneira, devido ao alto teor de umidade dos lodos (maior de 95 %) estas técnicas têm sido utilizadas como métodos preliminares na remoção de água, a fim de reduzir o custo do processo. Esta prática leva à redução de cerca de 5 % do teor inicial de umidade do produto, sendo em seguida o lodo submetido a processos de secagem (OLIVIER e VAXELAIRE, 2005; RAYNAUD et al., 2010a; RAYNAUD et al., 2010b; RUIZ et al., 2010; MA et al., 2011; RAYNAUD et al., 2012).

Apesar de relativa ascensão nos últimos anos e alguns trabalhos já existentes na literatura, o estudo da secagem de resíduos sólidos continua sendo considerado um desafio devido à complexidade da operação e comportamento do material (BENNAMOUN et al., 2014; FREIRE et al., 2014). Bennamoun (2012) e Vaxelaire e Cézac (2004) afirmam em seus

trabalhos que a curva típica de secagem do lodo pode ser dividida principalmente em quatro partes, como ilustra a Figura 2.10. A operação se inicia com um período de secagem à taxa constante, representado pela linha AB, dois períodos sucessivos à taxa decrescente (BC e CD) e um último período em que ocorre a diminuição do teor de umidade até que finalmente se atinge o fim do processo.

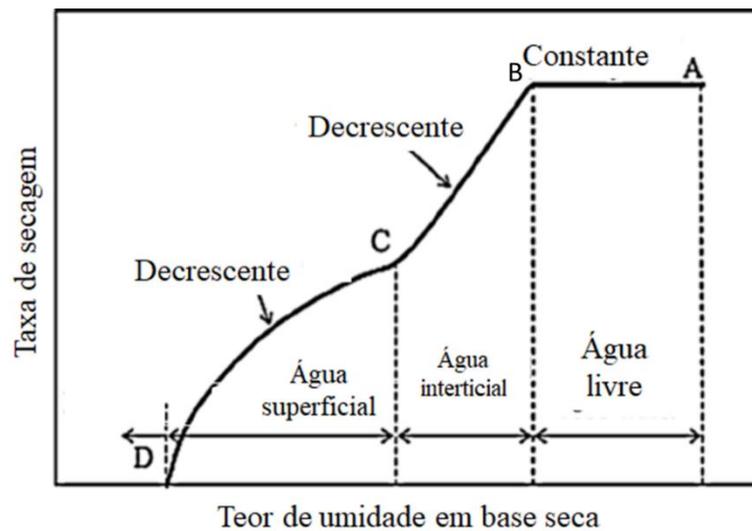


Figura 2.10. Curva típica de secagem do lodo.
Fonte: adaptado de Bennamoun et al. (2013a).

Entretanto, alguns autores (BENAMOUN et al., 2014; LEONARD et al. 2004b; REYES et al., 2004; LEONARD et al. 2002; VAXELAIRE e PUIGGALI, 2002) observaram um período inicial de pré-aquecimento ou período de adaptação, em que o produto se adapta às novas condições de processo. Este período inicial foi seguido dos períodos já relatados de taxas constantes e decrescentes de secagem.

A variação na cinética de secagem do lodo, a duração das fases ou até mesmo a presença ou ausência destas, depende de vários fatores, como as características do lodo, entre elas: a origem do lodo (LEONARD et al., 2004a), a agitação ou mistura do mesmo durante a secagem (LEONARD et al., 2008), eventuais pré-tratamentos do lodo, como a calagem (HURON et al., 2010) e o endurecimento da camada superficial (TAO et al., 2006). Fraikin et al. (2011) constataram que até mesmo o tempo de armazenamento pode influenciar na cinética de secagem.

Leonard et al. (2004a) utilizaram lodos provenientes de 5 diferentes estações de tratamentos de esgoto, designados como A (lodo doméstico de uma população de 8000 habitantes), B (lodo doméstico de uma população de 9000 habitantes), C (lodo agroindustrial),

D (lodo doméstico de população de 27000 habitantes) e E (mistura entre lodo agroindustrial e lodo doméstico). Os autores afirmam que a secagem de lodo é uma operação particularmente complexa porque este pode apresentar comportamentos muito diferentes, tanto do ponto de vista cinético quanto textural. O teor de umidade e sua composição não são suficientes para explicar os diferentes comportamentos observados. Os autores chegaram à conclusão de que a cinética de secagem dos lodos diminui com o aumento do conteúdo orgânico, que depende da sua origem.

Leonard et al. (2008) estudaram também a influência da agitação na cinética de secagem convectiva de lodos. A presença de mistura/agitação mostrou ter um efeito positivo sobre a cinética de secagem de lodos, pois conduz a uma expansão do leito e, conseqüentemente, um aumento da área disponível para transferência de calor e massa e diminuição do tempo de residência no equipamento.

Huron et al. (2010) estudaram o efeito da calagem na cinética de secagem dos lodos. A calagem é uma operação muito comum em estações de tratamento de resíduos, com a finalidade de desidratar ou estabilizar lodos desidratados. Os autores estudaram a adição de cal antes e depois da desidratação mecânica (pré-calagem e pós-calagem, respectivamente) sobre o comportamento do produto. Os resultados obtidos mostraram o efeito positivo da calagem na cinética de secagem, com um aumento das taxas e diminuição do tempo de secagem.

Já em relação à influência do tempo de armazenamento nas taxas de secagem, Fraikin et al. (2011) mostraram que este é um efeito negativo na secagem. Os autores notaram que, quanto maior o tempo de armazenamento, menores são as taxas de secagem e maior é o tempo de secagem. Por exemplo, a taxa de secagem após 20 dias se mostrou-se aproximadamente 3 vezes menor do que a taxa de secagem para o lodo bruto.

Além das características do lodo, diversos autores (BENNAMOUN et al., 2013b; BENNAMOUN et al., 2010; BENNAMOUN, 2009; BENNAMOUN e BELHAMRI, 2006; LEONARD et al., 2005a; REYES et al., 2004; LOWE, 1995; van BRAKEL, 1980) relataram as influências das condições operacionais, principalmente a temperatura e a velocidade do ar de secagem no comportamento do lodo. Os resultados obtidos apontam que a secagem é fortemente afetada pela temperatura do ar e, em menor grau, pela velocidade superficial do ar. De maneira geral, o aumento da temperatura e da velocidade superficial conduzem ao aumento da velocidade de secagem.

Alguns autores têm estudado o aparecimento de encolhimento e rachaduras durante o processo de secagem, que são fenômenos que também influenciam o comportamento do lodo durante a secagem, como é apresentado no próximo item 2.6.

2.6 Encolhimento do lodo durante a secagem

Diversos materiais sofrem encolhimento de suas dimensões durante a secagem. O grau de encolhimento e sua variação com as condições de secagem, assim como com o conteúdo de umidade do produto, influenciam os mecanismos de transferência de calor e de massa dentro do material (ISLAM e MUJUMDAR, 2003).

O encolhimento é um importante fenômeno que ocorre durante a secagem de lodos, com uma significativa redução do volume devido à perda de umidade. Como consequência das mudanças que ocorrem na estrutura do lodo, a área de secagem decresce e, por esta razão, a taxa de secagem também diminui. Verifica-se estudos destas mudanças estruturais por meio de equipamentos como o tomógrafo de raios X, durante a secagem de lodo de esgoto (LEONARD et al., 2008; LI et al., 2015a) e misturas de lodo com serragem (LEONARD et al., 2005b; LI et al., 2014; LI et al., 2015b) Alguns trabalhos apresentam também de que maneira a cinética de secagem e o grau de encolhimento do lodo são afetados pelas condições operacionais da secagem (BENNAMOUN et al., 2014) e origem do lodo (BENNAMOUN et al., 2013c).

Li et al. (2015a) usaram um tomógrafo de raios- X de alta energia, associado com análise de imagem, para caracterizar as estruturas 3D do lodo durante o processo de secagem convectiva em um secador de leito fixo em escala piloto. Os autores destacam que as evoluções estruturais do volume, o encolhimento, fração de vazios, e superfície total de transferência são todos relevantes para as transferências de calor e massa durante o processo de secagem.

Leonard et al. (2008) já haviam utilizado este tipo de equipamento para investigar a influência da agitação na secagem convectiva do lodo em um leito fixo. No entanto, os autores apenas determinaram as características estruturais antes e depois da secagem, mas não durante todo o processo.

Li et al. (2015b; 2014) utilizaram também um tipo de equipamento com a mesma característica para investigar a secagem convectiva em leito fixo de lodo misturado com serragem e estudaram as propriedades como encolhimento, coeficiente de difusão e o coeficiente de transferência de massa. Os resultados mostraram um impacto positivo na adição de serragem ao lodo, visto que houve um aumento na superfície de troca. O produto final apresentou um volume de aproximadamente 20% do volume inicial, com valores próximos aos obtidos por Leonard et al. (2005b; 2002).

Bennamoun et al. (2014) estudaram o grau de encolhimento do lodo em diferentes condições de temperatura, velocidade do ar e umidade do ar. Os resultados mostraram que a

cinética de secagem pode ser dividida em três fases, as duas primeiras mais curtas (período de adaptação e período de taxa constante) e a última fase, mais longa, em que a taxa é decrescente. Os autores observaram que o volume final também foi influenciado pelas temperaturas.

Bennamoun et al. (2013c), por meio da secagem de dois tipos de lodo de esgoto, introduziram o efeito do encolhimento na modelagem matemática. Os resultados mostraram que o encolhimento, parâmetro importante durante a secagem de lodo, deve ser levado em consideração no estudo da operação de secagem. Resultados semelhantes foram encontrados por Bennamoun e Belhamri (2008; 2006) que utilizaram a modelagem matemática no estudo do encolhimento durante a secagem de grãos e uvas sem sementes.

Nos resultados obtidos por Tao et al. (2005) na secagem convectiva de lodos, por meio de uma câmera e um scanner de tomografia micro-computadorizada de raio-X, observou-se diminuição do diâmetro, formação de fissuras e endurecimento da camada superficial. A redução volumétrica foi de 70 %.

Li et al. (2014) avaliaram 5 modelos (Lewis, Page, Henderson e Pabis, Logarítmico e Wang e Singh) no ajuste aos dados experimentais na secagem do lodo considerando o encolhimento. Exceto por este último modelo, os ajustes se mostraram satisfatórios mesmo considerando o grau de encolhimento do lodo. Bennamoun et al. (2013c) também obtiveram bons ajustes aos dados experimentais utilizando o modelo de Lewis e um modelo polinomial de quarto grau.

Li et al. (2015a) também avaliaram a variação de parâmetros como o grau de encolhimento, a fração de vazios e a superfície de troca em relação ao teor de umidade, obtendo ajustes lineares para todos. O comportamento linear do encolhimento em relação ao teor de umidade também foi observado por Li et al. (2015b) e Ruiz et al. (2005; 2007) no estudo da secagem de lodos biológicos.

Vieira et al. (2006b), no estudo da secagem do papel reciclado, além da redução volumétrica, avaliaram o encolhimento linear e superficial. Os resultados obtidos mostraram bons ajustes lineares para a redução superficial e volumétrica. A redução na espessura, entretanto foi melhor correlacionada como uma função logarítmica de X. Esta relação linear entre o encolhimento volumétrico e o teor de umidade também foi verificada na secagem de alimentos, como batatas (McMINN e MAGEE, 1997), cenouras (HATAMIPOUR e MOWLA, 2002) e sementes de mamão (PRADO e SARTORI, 2002), e também de rosa mosqueta (OCHOA et al., 2002).

Conforme observado na pesquisa bibliográfica, ainda são poucos os trabalhos referentes ao estudo do encolhimento do lodo durante a secagem, com um aumento de pesquisas

recentemente. Por esta razão, um estudo mais detalhado da influência das condições operacionais, conteúdo de umidade e características físicas do lodo no encolhimento do produto e na cinética de secagem é de grande interesse científico e acadêmico.

2.7 Secagem solar do lodo

A secagem solar é praticada desde tempos remotos para a preservação de culturas alimentares e agrícolas. Este processo, também chamado de secagem natural, era feito normalmente sob céu aberto. Por se tratar a secagem solar de um processo relativamente lento, podem ocorrer perdas consideráveis. Além disso, podem ocorrer atração de vetores (insetos), reações indesejadas, crescimento de microorganismos, e desenvolvimento de micotoxinas (VIJAYAVENKATARAMAN et al., 2012).

Entretanto, como a secagem é considerada um processo de alto custo energético, estudos são dirigidos para o uso de fontes alternativas de energia, em especial a energia solar. Dessa maneira, caso sejam encontradas soluções para contornar estes inconvenientes, a secagem solar é uma alternativa atraente e viável de secagem (BENNAMOUN et al., 2012; VIJAYAVENKATARAMAN et al., 2012).

A aplicação da secagem solar para lodos tem sido objeto de alguns estudos. Bennamoun et al. (2013a) e Bennamoun (2012) estudaram aspectos fundamentais da secagem solar do lodo, Ferreira et al. (2014) testaram lodos provenientes de indústria de fios de aço, Kurt et al. (2015) avaliaram os custos da operação, enquanto Roux et al. (2010), Slim et al. (2008), Seginer e Bux (2006) realizaram a modelagem e simulação do processo. Uma característica específica da secagem solar é que as condições operacionais aplicadas dependem totalmente das condições climáticas: radiação solar, temperatura e velocidade do ar.

Este caráter variável foi relatado por Lei et al. (2009) na secagem de lodo de esgoto em uma câmara de secagem coberta que observou maiores índices de radiação solar e maiores temperaturas no verão do que no outono. Como consequência, um menor tempo de secagem é necessário no verão.

Salihoglu et al. (2007) estudaram na Turquia dois tipos de câmara de secagem solar: uma aberta e uma fechada. Na câmara aberta, após 55 dias de secagem o teor de umidade estava em torno de 60%. No entanto, na câmara coberta, neste mesmo período de tempo o teor de umidade do lodo atingiu 20%. Além de um menor tempo de residência a câmara fechada também apresenta a vantagem de proteger o lodo de chuvas e precipitações.

A secagem solar, quando aplicada adequadamente pode ser uma alternativa benéfica na desidratação de lodos, pois além de reduzir o teor de umidade com um menor consumo energético, ainda deve-se ressaltar o poder germicida dos raios ultra-violeta.

Segundo Daniel et al. (2001; 2000), a desinfecção de água e esgotos pode ser realizada por intermédio de agentes físicos e/ou químicos. Os processos físicos de desinfecção utilizam calor, radiação solar, radiação ultravioleta e radiação ionizante (raios gama), com a qual se obtém a esterilização do produto.

A tecnologia DSAUI (Desinfecção Solar em Unidades Individuais) ou SODIS (*Solar Water Disinfection*), desenvolvida por Acra et al. (1984) na Universidade de Beirut, e aperfeiçoada mais tarde, pelo EAWAG – Instituto de Água de Zurich, é um método eficiente para a eliminação de microorganismos patogênicos (SODIS, 2006). A radiação ultravioleta UV-A (320 a 400nm) é a principal responsável pela inativação de microrganismos. A radiação ultravioleta de comprimento de onda de 400 a 450 nm praticamente não tem efeito bactericida quando tem atuação independente. Entretanto, o efeito sinérgico dessas duas faixas de radiação (como é o caso da radiação solar) aumenta significativamente a taxa de inativação dos microrganismos (DANIEL, 2001).

2.8 Eficiência energética

A secagem é uma das operações unitárias que apresenta maior consumo energético. No setor da indústria, a secagem consome de 12 a 20 % de toda a energia e a operação pode representar entre 60 e 70 % do custo total (SARKER et al., 2015; RAGHAVAN et al., 2004; BAHU et al., 1991). Essa proporção de consumo energético é ainda mais expressiva nas indústrias de derivados de madeira (70 %), indústrias têxteis (50 %), processos de produção de milho (60 %) e indústria papelreira (33 %) (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

Sarker et al. (2015) destacam, portanto, a importância de se maximizar a eficiência global de energia do processo, uma vez que indica a eficiência com que a energia está sendo usada pelo secador na indústria. Outras fontes de energia têm sido estudadas, a fim de reduzir o consumo energético na secagem. Destaca-se, entre elas, a energia solar, que trata-se de uma alternativa para o fornecimento de calor de baixa temperatura em muitas aplicações industriais (ALTOBELLI et al., 2014). Existem variados exemplos de secadores solares cuja tecnologia permitiu uma redução no consumo de fontes convencionais de energia, tais como o gás e lenha. (CONDORÍ e SARAVIA, 1998, 2003; CONDORÍ et al, 2001; DURÁN et al, 2010). A seguir

são mostrados alguns parâmetros encontrados na literatura para a avaliação da eficiência energética da secagem convectiva e da secagem solar.

2.8.1 Secagem Convectiva

A abordagem básica para o cálculo da eficiência energética é dada pela razão entre a energia requerida e energia fornecida no processo, como mostra a Equação 2.23 (RAGHAVAN et al. 2004):

$$\eta = \frac{E_R}{E_F} \quad (2.23)$$

Em que: E_R : energia total requerida (kJ) E_F : Energia total fornecida (kJ).

De acordo com Menshutina et al. (2004), considera-se, geralmente, que em secadores convencionais o calor fornecido ao secador é utilizado para o aquecimento tanto do material úmido quanto do equipamento de secagem, para a evaporação da umidade, e compensação das perdas de calor. No entanto, segundo os autores, a secagem de um grande número de materiais envolve energia, não só para a evaporação da água livre, mas também para a remoção da água ligada pelo fenômeno da capilaridade. Os autores definem a eficiência energética como a razão entre o calor necessário para evaporação da umidade e o calor requerido para aquecer o ar de secagem, conforme Equação 2.24.

$$\eta = \frac{Q_W}{Q_M} \quad (2.24)$$

Em que: Q_W : calor necessário para evaporar a umidade (kJ); Em que: Q_M : calor necessário para aquecer o material (kJ);

Segundo Mujumdar e Beke (2003), os secadores convectivos representam cerca de 85 % de todos os secadores industriais. A eficiência energética e a eficiência energética máxima para estes tipos de secadores geralmente é calculada por meio das temperaturas do ar na entrada e na saída do secador e a temperatura do ar ambiente e de bulbo úmido, como mostram as Equações 2.25 e 2.26 (RAGHAVAN et al., 2004):

$$\eta_{conv} = \frac{T_{en} - T_{sa}}{T_{en} - T_{amb}} \quad (2.25)$$

$$\eta_{conv,m\acute{a}x} = \frac{T_{en} - T_{bu}}{T_{en} - T_{amb}} \quad (2.26)$$

Em que: T_{en} : temperatura do ar de entrada (°C); T_{sa} : temperatura do ar de saída (°C); T_{amb} : temperatura do ar ambiente (°C); T_{bu} : temperatura do bulbo úmido (°C).

Segundo Vieira et al. (2007), para avaliar a eficiência de um secador, utiliza-se na prática, alguns fatores de desempenho, como eficiência energética (EE), eficiência de secagem (ES), eficiência térmica (ET), consumo específico de calor (CEC) e consumo específico de energia (SEC), mostrados pelas Equações 2.27 a 2.31 (MOTÉVALI et al., 2014a; MOTÉVALI et al., 2014b; MOTÉVALI et al., 2011; HEBBAR et al., 2004; PAKOWSKI e MUJUMDAR, 1995; LIMA, 1998):

$$\text{Eficiência energética (EE)} = \frac{Q_W}{E_{TER} + E_{MEC}} \quad (2.27)$$

$$\text{Eficiência de secagem (ES)} = \frac{Q_W + Q_M}{E_{TER} + E_{MEC}} \quad (2.28)$$

$$\text{Eficiência térmica (ET)} = \frac{Q_W}{E_{TER}} \quad (2.29)$$

$$\text{Consumo específico de calor (CEC)} = \frac{E_{TER}}{Q_W} = \frac{1}{ET} \quad (2.30)$$

$$\text{Consumo específico de energia (SEC)} = \frac{E_{TER} + E_{MEC}}{m_{V,W}} \quad (2.31)$$

Em que: Q_W : calor necessário para evaporar a umidade (kJ); Q_M : calor necessário para aquecer o material (kJ); E_{TER} : energia térmica fornecida à operação (kJ); E_{MEC} : energia mecânica da operação (kJ); $m_{V,W}$: massa de água evaporada (kg).

De acordo com Luz (2010), a avaliação do consumo de energia na secagem, tendo-se como volume de controle todo o secador, tem como objetivo averiguar a condição de temperatura do vapor de aquecimento que leve ao menor consumo energético, confiando àquela a manutenção da qualidade final e o menor custo de produção. Assim, para a definição do consumo energético do secador, podem ser considerados os gastos com energia mecânica e térmica. Na secagem convectiva, estes dois tipos de energia são, respectivamente, a energia necessária para acionar o ventilador, para o fornecimento de fluxo de ar para o leito secador e,

em segundo lugar, a energia necessária para aquecer o ar que vai para a câmara de secagem (ZARE e CHEN, 2009).

Para a determinação dos parâmetros relacionados nas equações anteriores é necessário calcular as variáveis da equação de acordo com o tipo de secador e condições operacionais do processo, que estão detalhadas na metodologia descrita no item 3.6.5

2.8.2 Secagem Solar

Para um aproveitamento adequado da secagem solar, deve haver uma avaliação da fonte energética, onde devem ser consideradas todas as variáveis ambientais, tais como radiação solar, temperatura ambiente e umidade relativa do ar (ALTOBELLI et al., 2014).

Existem muitos estudos sobre a eficiência térmica de secadores solares. No entanto, não há um consenso geral sobre a metodologia para comparar seus desempenhos (SINGH E KUMAR, 2012). Uma das principais dificuldades é a dependência de fontes energéticas de energias que variam com o tempo e com a localização geográfica. Além disso, os produtos têm diferentes velocidades de secagem de acordo com as condições ambientais. Isto torna difícil comparar os resultados obtidos a partir de testes sobre o desempenho de secadores mesmo se o mesmo tipo de secador é considerado. Alguns autores têm proposto diferentes definições de desempenho secador solar tentando lidar com essas dificuldades.

Jannot e Coulibaly (1998) definiram a capacidade evaporativa conforme é mostrado na Equação 2.32.

$$E = \dot{m}_a(W_0 - W_i) \quad (2.32)$$

Em que: \dot{m}_a : fluxo mássico de ar no secador ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$); W_0 : umidade absoluta do ar de saída ($\text{kg}_w\cdot\text{kg}_a^{-1}$); W_i : umidade absoluta do ar de entrada ($\text{kg}_w\cdot\text{kg}_a^{-1}$).

Leon et al (2002) e Banout et al. (2011) estabeleceram uma metodologia para caracterizar o desempenho de um secador solar utilizando os seguintes indicadores: eficiência de aproveitamento (η_p), eficiência global de secagem do sistema (η_d), eficiência de secagem no primeiro dia (η_{d1}), e eficiência de coleta térmica (η_c). As duas primeiras são representadas pelas Equações 2.33 e 2.34.

$$\eta_p = \frac{W_o - W_i}{W_s - W_i} \quad (2.33)$$

$$\eta_d = \frac{\dot{m}_a \cdot \Delta H_{V,W}}{A_d \cdot I + P_f} \quad (2.34)$$

Em que: W_s : umidade absoluta de saturação (kg. kg_{ar seco}); $\Delta H_{V,W}$: calor latente de evaporação da água pura na temperatura do ar (kJ.kg⁻¹); A_d : superfície exposta à incidência solar (m²); I : radiação solar total (W.m⁻²); P_f : energia consumida pelo soprador/ventilador (W).

A eficiência de secagem do primeiro dia é semelhante à Equação 2.34 porém considera apenas as variações no início da secagem, como mostrado na Equação 2.35:

$$\eta_{d1} = \frac{m_a \cdot \Delta H_{V,W}}{A_d \cdot I + P_f} \quad (2.35)$$

A eficiência de coleta térmica é definida como a razão entre o calor sensível e a radiação solar incidente, conforme a Equação 2.36:

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{sa} - T_{en})}{A_d \cdot I} \quad (2.36)$$

Em que: C_{pa} : calor específico do ar à pressão constante (kJ.kg⁻¹.K⁻¹).

A determinação dos parâmetros relacionados à secagem solar depende das condições climáticas e características do secador, que serão detalhadas no item 3.6.6.

2.9 Aplicação do lodo como fertilizante

A aplicação do lodo como fertilizante é o método mais adequado de destinação final de resíduos sólidos, do ponto de vista ambiental. Isto porque ele permite a recuperação de nutrientes orgânicos e inorgânicos, diferentemente do que acontece em outros métodos tradicionalmente utilizados, como o descarte em aterros sanitário e incineração (GUDE, 2015; FIJALKOWSKI et al., 2017)

Já na década de 90, o uso agrícola do lodo era utilizado em diversos países desenvolvidos (Bélgica, 29 %; Dinamarca, 54 %; França, 58 %; Alemanha, 27 %; Itália, 33 %; Espanha, 50 %; Reino Unido, 44 %), sendo que nos Estados Unidos o uso do lodo como fertilizante data de 1927 (NEIVA, 1999).

Bennamoun (2012) afirma que os países com maior geração de resíduos sólidos de lodos destinam entre 40 % e 50 % dos lodos secos para o uso agrícola.

De acordo com os dados mais recentes, de acordo com o relatório da Comissão Europeia publicado em 2010, 39 % dos lodos de esgoto são recicladas para a agricultura na União Europeia (ENVIRONMENT, 2014). Entretanto, no relatório são notadas grandes variações, alguns países como a Holanda e Suíça não realizam esta prática, enquanto outros, como Noruega, Grã-Bretanha, França destinam mais de 50% dos seus resíduos para este fim.

Cerca de 27 % e 22 % desses lodos produzidos respectivamente pela a União Europeia e os Estados Unidos são direcionados para incineração ou tratamento térmico. Essas práticas conseguem com sucesso reduzir a destinação a aterros sanitários, que são considerados nocivos para o ambiente, com apenas 14 % e 17 % da quantidade total produzida com regras rigorosas e diretrizes para esta aplicação.

Segundo Fijalkowski et al. (2017) em países desenvolvidos, como Canadá e Austrália, os biossólidos tratados são amplamente utilizados em solos. Em países em desenvolvimento, esta ainda não é uma prática tão comum, porém é uma alternativa crescente para substituir a disposição em aterros sanitários.

Bennamoun et al. (2013b), Barbosa e Tavares filho (2006) afirmam que, devido à presença de importantes quantidades de micronutrientes no lodo, como ferro, zinco, cobre e manganês e macronutrientes como carbono, nitrogênio, fósforo e potássio, incorporar o lodo na agricultura como um fertilizante complementar é uma interessante opção de manejo. Entretanto, para uma utilização segura este deve respeitar os parâmetros estabelecidos pela legislação vigente.

Há alguns anos a reciclagem agrícola já vem sendo apontada como a forma de disposição final mais adequada para os lodos de esgoto em termos técnicos, econômicos e ambientais, desde que convenientemente aplicada (ANDREOLI, 2000; TSUTIYA, 1999), uma vez que apresenta o menor custo para a reciclagem de matéria orgânica e de nutrientes (MATTHEWS, 1998).

Em relação aos resíduos orgânicos das indústrias e da agricultura, estes também já vêm sendo apontados como adequados para fins agrícolas, desde que atendidas as disposições legais e descartada a possibilidade desses materiais contaminarem o solo, a água e a planta, inclusive pelo excesso de N no ambiente (FONSECA et al., 2007; FONSECA et al., 2005b).

Abreu Jr et al. (2005) citam alguns exemplos resíduos orgânicos que podem ser aplicados no solo, como: esterco bovino, esterco de galinha, esterco de porco, torta de filtro, torta de mamona, adubos verdes, turfa, entre outros. A opção da disposição de resíduos orgânicos em solos agrícolas é econômica, social e ambientalmente mais sustentável, em médio a longo prazo, do que a incineração e a disposição em lixões, corpos d'água ou mesmo aterros

planejados. Entretanto, há que se considerar a disponibilidade e os custos de transporte e da aplicação do resíduo na área agrícola.

Dos resíduos industriais, muitos possuem valor fertilizante, entre eles a vinhaça, o lodo de curtume, as farinhas e resíduos frigoríficos e as tortas vegetais, aos quais, ainda, podem ser acrescentados, por exemplo, os resíduos de laticínios. A vinhaça e os lodos de curtume, devido à grande quantidade de geração e da experiência acumulada em muitos anos de aplicação ao solo, já contam, no Estado de São Paulo, com normas que regulamentam especificamente o seu uso (CETESB, 2006a; CETESB, 2006b).

Diversos autores relatam a melhoria dos atributos químicos dos solos com a aplicação de resíduos de origem urbana, industrial e da agropecuária (TEJADA et al., 2016; IYYEMPERUMAL et al., 2008; TRANNIN et al., 2008; ODLARE et al., 2008; NARAMABUYE e HAYNES, 2007; FONSECA et al., 2005a, 2005b, 2007; DOUGLAS et al., 2003; ERDEM e OK, 2002). Em geral, os resíduos orgânicos agroindustriais fornecem nutrientes para plantas e aumentam o teor de matéria orgânica e o pH do solo (GUIMARÃES et al., 2012). Alguns trabalhos recentes têm utilizado o lodo de indústria de gelatina como objeto de estudo, como Guidi (2012); Taniguchi (2010); Guimarães (2009) e Araujo (2006) que avaliaram os lodos gerados na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) do processo de fabricação de gelatina e cujos trabalhos já foram apresentados no item 2.2.

2.10 Considerações finais sobre a Revisão Bibliográfica

A busca por uma gestão ambiental adequada de resíduos de natureza sólida vem exigindo alternativas para a resolução dos problemas ambientais ocasionados por estes materiais. Com respeito aos resíduos sólidos orgânicos, a elevada concentração de umidade inicial favorece a aceleração dos processos de fermentação e degradação, dificultando atividades típicas de gestão ambiental, tais como o tratamento físico, o transporte e o armazenamento em condições favoráveis (FREIRE et al., 2014).

De acordo com Putranto e Chen (2014), a secagem do lodo é um passo essencial para reduzir o custo do tratamento de resíduos, pois a redução do volume e, conseqüentemente do peso, permite uma e maior capacidade de manuseio, armazenamento e disposição final (BENNAMOUN et al., 2013a; BENNAMOUN et al., 2014).

Diversos autores (VAXELAIRE e CEZAK, 2004; SALIHOGLU et al., 2007; SERENOTI et al., 2010; ARLABOSSE et al., 2012; BENNAMOUN et al., 2013a;

BENAMOUN et al., 2014; FREIRE et al., 2014) têm mostrado que a secagem vem sendo utilizada com êxito na desidratação de resíduos sólidos. Além da redução do volume, os autores destacam que a retirada de umidade inibe as reações bioquímicas, promove a inativação microbiológica, condições seguras de armazenamento e a minimização do grau de periculosidade. E, finalmente, por meio da secagem é possível agregar valor ao produto seco e favorecer a aplicação de variadas técnicas de aproveitamento.

A Revisão Bibliográfica apresentou uma introdução sobre tópicos importantes no estudo da secagem como método de tratamento de lodos provenientes da indústria de gelatina. A secagem do lodo de indústria de gelatina ainda é um assunto pouco estudado na comunidade científica. Os trabalhos encontrados que utilizaram o lodo provenientes de ETEs de indústria de gelatina apresentaram objetivos voltados à área da Ciência do Solo, focando na avaliação da sua composição e atributos de qualidade dos solos nos quais foram aplicados.

Os trabalhos de secagem de resíduos sólidos, por sua vez, em sua maioria avaliaram lodos de ETEs de resíduos urbanos. Porém, as informações relacionadas à composição físico-química e microbiológica do lodo de indústria de gelatina, bem como o seu comportamento durante o processo de secagem ainda são escassas. As informações obtidas na etapa de revisão da literatura permitiram que se percebesse os gargalos científicos na secagem de lodo de indústria de gelatina, apresentando diversas possibilidades de estudo sobre o assunto.

Desta maneira, foi possível propor uma metodologia para o estudo da desidratação e secagem de lodo de indústria de gelatina que contemplaram a caracterização físico-química e microbiológica do lodo utilizado, a análise dos parâmetros e variáveis que influenciaram em diferentes processos de secagem e a avaliação do produto final obtido de acordo com os requerimentos da legislação vigente para a sua classificação como biossólido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto foi planejado e realizado em oito etapas, como descrito a seguir:

1ª Etapa: Preparação e caracterização físico-química e microbiológica da matéria-prima (lodo aeróbio);

2ª Etapa: Definição de um planejamento experimental para a secagem convectiva, verificando a influência da temperatura e vazão mássica do ar de secagem no tempo e nas curvas de secagem; assim como nas características do produto obtido;

3ª Etapa: Estudo da cinética de secagem do lodo, por meio da determinação de curvas de secagem obtidas para as diferentes condições operacionais estabelecidas no planejamento experimental e verificação do ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais;

4ª Etapa: Caracterização físico-química e microbiológica do produto obtido para as diferentes condições operacionais;

5ª Etapa: Estudo da cinética de secagem solar;

6ª Etapa: Avaliação da eficiência energética da secagem convectiva e secagem solar;

7ª Etapa: Análise do encolhimento do lodo durante a secagem, correlacionando este fenômeno com as condições operacionais e características do lodo; e

8ª Etapa: Análise dos resultados e verificação das condições mais favoráveis à obtenção de um produto final de qualidade e adequado à utilização como biofertilizante.

No fluxograma da Figura 3.1 ilustra-se estas etapas.

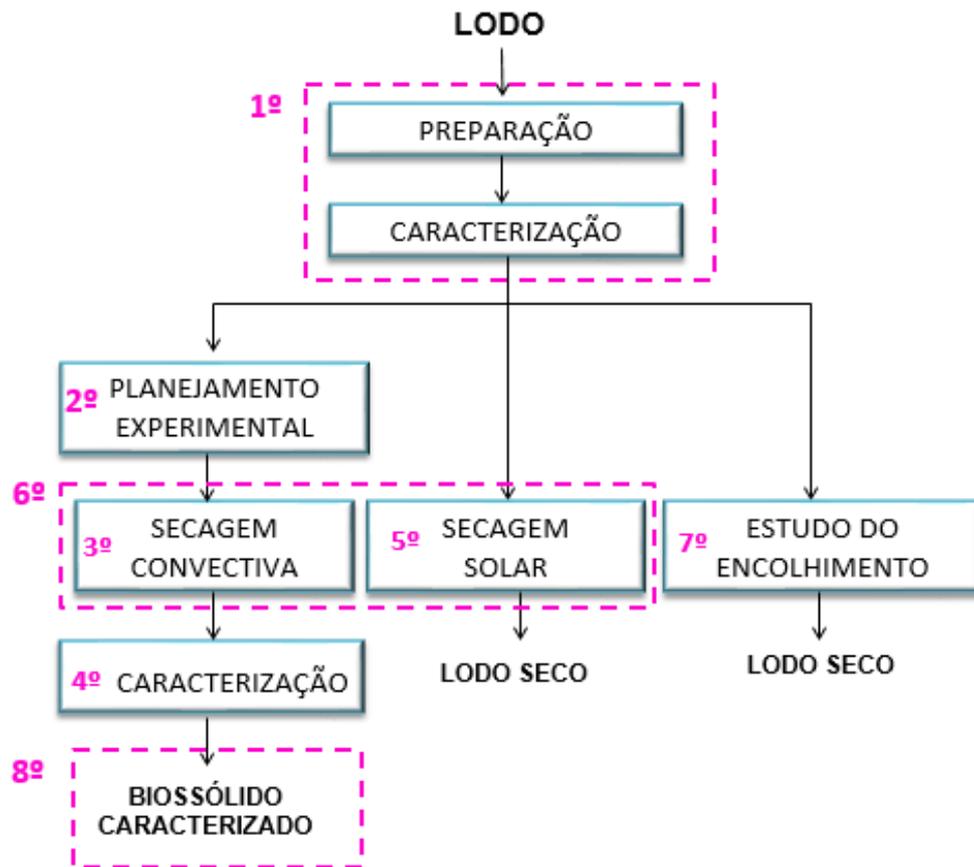


Figura 3.1. Fluxograma das etapas realizadas no projeto.

3.1 Material

O lodo utilizado neste trabalho é um lodo de origem industrial, gerado ETE da GELITA, unidade de Maringá. Na Figura 3.2 é mostrado o fluxograma do processo de ETE. O efluente que origina o lodo é líquido e sem gordura, denominado “efluente fábrica”. O tratamento se inicia em caixas de captação para a retenção de sólidos grosseiros. O efluente passante segue para lagoas de equalização, para mistura, homogeneização e equalização da vazão e depois, para os biodigestores. O biogás produzido é utilizado na caldeira e o lodo remanescente segue para sistemas de sedimentação e células de aeração. O lodo utilizado neste trabalho foi coletado após esta etapa de aeração, destacada no fluxograma, e é designado como 7R.

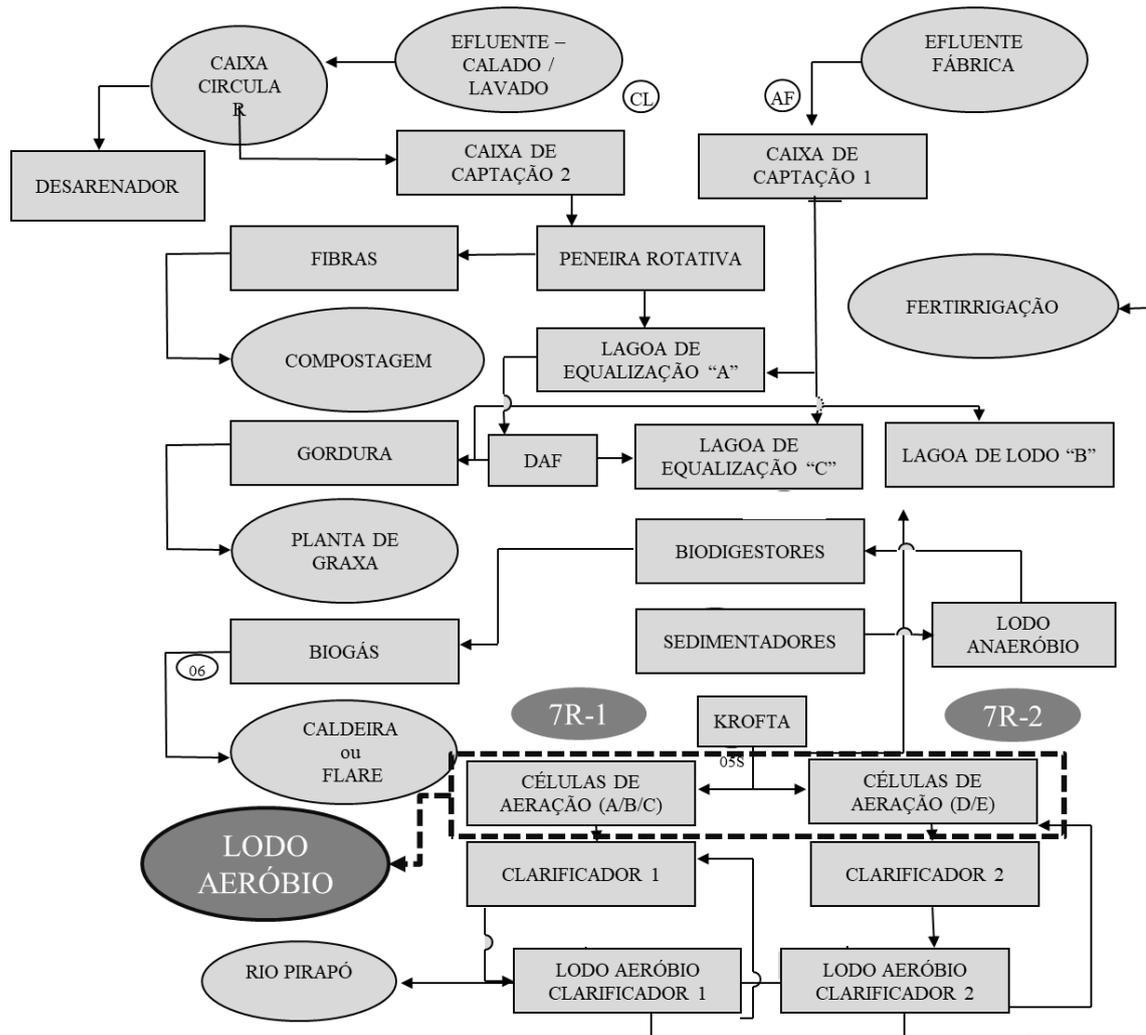


Figura 3.2. Fluxograma da ETE – Gelita Maringá.
Fonte: adaptado de Gelita (2015).

3.2 Coleta e preparação da amostra

O lodo foi coletado conforme a necessidade de amostra. A coleta era sempre realizada por funcionários da empresa, sem acesso da autora no local. As amostras eram colocadas em galões de 5, 10 ou 20 L. Informações cedidas pela GELITA indicam que não há variações das características físico-químicas do lodo ocasionadas por sazonalidade. Dessa maneira, buscou-se diminuir o tempo de armazenamento do lodo de modo a reduzir as possibilidades de alterações nas características do mesmo, de acordo com o que foi constatado no estudo de Fraikin et al. (2011).

O lodo bruto, logo após a coleta, apresentava-se heterogêneo, com uma fase aquosa na parte superior, e a lama decantada. Devido ao alto teor de umidade do lodo bruto coletado foi

necessário submeter o lodo a algumas etapas de preparação. Na Figura 3.3 é mostrado o fluxograma com as etapas preliminares de desidratação.

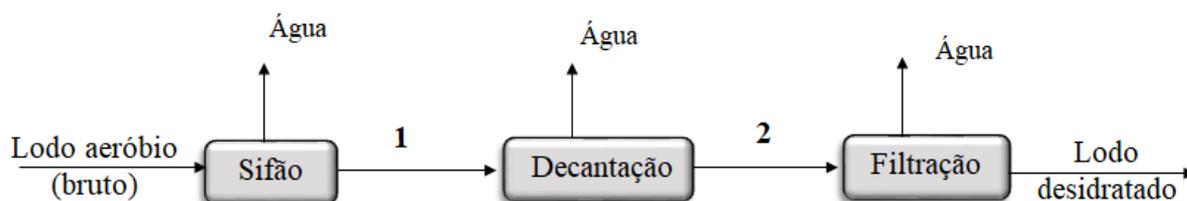


Figura 3.3. Fluxograma do preparo do lodo para a secagem

Fonte: elaborado pelo autor.

Primeiramente, foi retirada a água sobrenadante do lodo aeróbio com o auxílio de um sifão. Após a retirada inicial de água, o lodo (1) foi levado a um decantador, onde permaneceu por aproximadamente 24 horas. O lodo decantado (2) foi então filtrado em um filtro a vácuo. Como meio filtrante testou-se primeiramente um papel filtro, porém, como não houve passagem de filtrado, foram testados outros materiais. O meio filtrante que melhor se adaptou às necessidades da etapa foi uma folha descartável utilizada para limpeza, com textura de tecido (semelhante ao perfex). Foi usada uma camada dupla desta folha e o lodo retido no meio filtrante foi então acondicionado em recipientes herméticos e armazenado à temperatura de 4 °C aproximadamente, em acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004).

3.3 Sistema experimental de secagem

O sistema de secagem foi cedido pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas para o Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

A montagem do sistema de secagem convectivo e sua instrumentação foram projetadas e instaladas por Carvalho (2003) para a secagem de resíduo hospitalar e modificadas por Serenotti (2009) para a secagem de resíduo de estações de tratamento de esgoto (ETE). Para tanto, foi conectado um sistema visando a eliminação de odores, constituído por um lavador e um filtro para gás liberado após o condensador, além da alteração na malha das bandejas devido a maior umidade do lodo. Na instalação do equipamento no DEQ/UEM, para este trabalho, foi conectado apenas o lavador de gases, pois este se mostrou eficiente na eliminação de odores. Na Figura 3.4 é mostrado o desenho esquemático do sistema experimental, instalado no Laboratório II de Engenharia Química no DEQ/UEM.

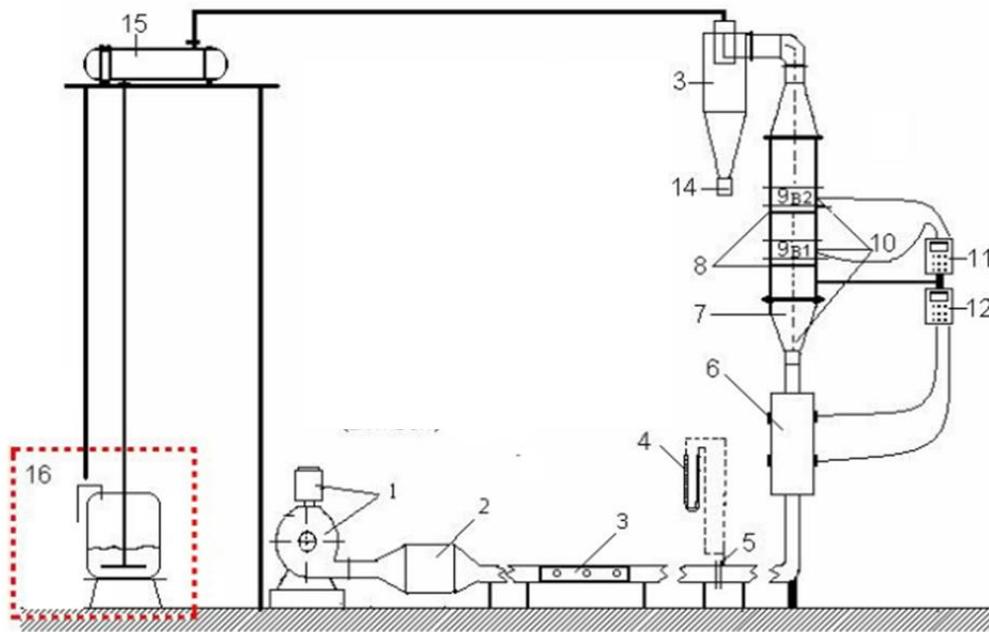


Figura 3.4. Desenho esquemático do sistema de secagem
Fonte: adaptado de Serenotti (2009).

Soprador e acessórios (1): é provido de um motor de 2 cv e acessórios, tais como filtro de ar e supressor de ruídos.

Resfriador de ar (2): é constituído por condensador de resfriamento de ar de cobre-alumínio, aletado e resfriado por água. O condensador está instalado dentro de uma caixa na forma de pirâmide de ferro galvanizado, com saída e entrada de água em cobre. Este sistema é necessário para que se possa estabilizar a temperatura de entrada do ar no aquecedor, uma vez que depende do tipo e tempo de operação dos sopradores.

Leito de sílica (3): constituído de um tubo de PVC de 02 polegadas de diâmetro interno e 65 cm de comprimento, preenchido com sílica gel azul de 8 – 12 mm de diâmetro. O leito de sílica não foi utilizado no processo

Medidor de vazão (4) e (5): placa de orifício de aço-inox de 3 mm de espessura, 10 cm de diâmetro e orifício de 20 mm de diâmetro. A queda de pressão medida pela placa de orifício é lida em um manômetro em U (4). A pressão estática do sistema também é medida com um manômetro em U, com um dos lados abertos para a pressão atmosférica. Ambos os manômetros foram confeccionados em vidro de um metro de comprimento cada, nos quais água é utilizada como fluido manométrico.

Aquecedor elétrico (6) e (12): é constituído de um conjunto de 3 resistências ôhmicas, sendo 2 resistências de 1200 W e 1 resistência controladora de 600 W. As resistências ôhmicas estão instaladas dentro de uma caixa metálica de 7,5 x 14,0 x 30,0 cm isolada termicamente

interna e externamente. O funcionamento do aquecedor é controlado por comandos instalados em um painel de controle (12).

Câmara de Secagem (7), (8) e (9): consiste de uma secção cilíndrica construída em aço-inox, conforme as dimensões apresentadas na Tabela 3.1. Esta secção possui duas aberturas laterais com portas (9), por onde são colocadas bandejas perfuradas (aço-inox) construídas com malha de 2 mm e revestidas por uma malha de 0,05 mm, para que o lodo utilizado não escoasse pela bandeja devido à alta umidade inicial do produto. Os suportes das bandejas são segmentos tronco-cônicos (8) soldados horizontalmente abaixo das aberturas, que direcionam o fluxo de ar quente para o fundo das bandejas. Os particulados finos e os gases são conduzidos para o ciclone (13).

Tabela 3.1. Dimensões características da câmara de secagem.

Características		Dimensões
Câmara	-Diâmetro interno	16 cm
	-Altura	70 cm
Bandejas	-Número	2
	-Dimensões	15 x 4cm
Cones internos	-Número	2
	-Diâmetro	14 cm

Fonte: Carvalho (2003).

Medida e registro de temperatura (10) e (11): o sistema de secagem possui três termorresistências do tipo PT-100 e dois termopares do tipo “J” calibrados. As termorresistências possuem haste de inox com diâmetro de 3,0 mm e comprimento de 200 mm e os termopares possuem haste de inox com diâmetro de 1,5 mm e comprimento de 120 mm.

Na Figura 3.5 ilustra-se a distribuição dos termopares no corpo do secador, sendo os termopares 4 e 5 colocados no interior da torta.

A temperatura de entrada é medida pelo Termopar 1 e por esta razão, foi instalado ao termopar um controlador de temperatura da Marca Novus, modelo N480 para manter a temperatura constante. Os registros das temperaturas dos demais termopares foram obtidos empregando-se quatro indicadores de temperatura da marca Novus, modelo N321. É importante destacar que neste trabalho foi utilizada apenas uma bandeja na etapa de secagem (bandeja inferior), e portanto foram monitorados apenas os termopares 1, 2 e 4.

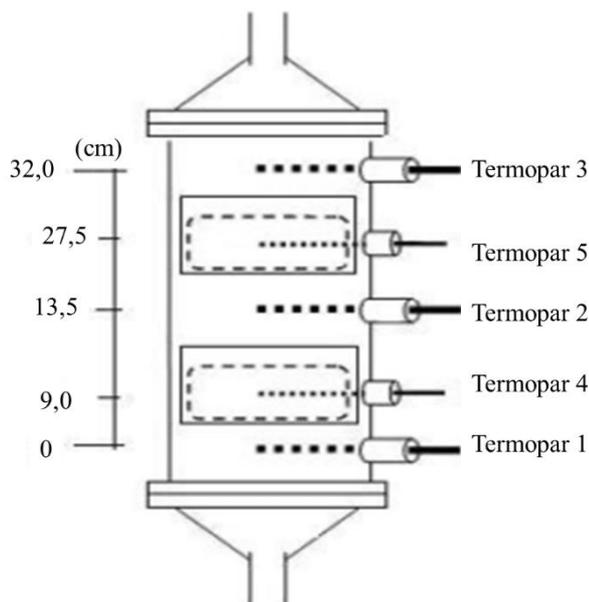


Figura 3.5. Distribuição dos termopares no corpo do secador
Fonte: Serenotti, 2009.

Ciclone (13) e (14): construído em aço-inox, de acordo com a configuração Lapple, com 10 cm de diâmetro interno na parte cilíndrica, considerando a eficiência global de coleta de 95%, para diâmetro de corte igual a 0,064 mm. O material particulado ficava retido em filtro coletor do tipo saco (14), localizado na base do ciclone, e os gases de topo seguiam para o condensador (15);

Resfriador (15): tipo casco-tubos é constituído por 19 tubos internos de ½ polegada, sendo os tubos e a carcaça em aço-inox. O gás de secagem quente escoava na carcaça e o fluido de resfriamento (água) nos tubos. Após ser resfriado, o gás é enviado para o sistema de eliminação de odores (16);

Sistema de Eliminação de Odores (16): constituído por um lavador de gases. Utilizou-se um tambor plástico de 100 L de capacidade instalado na saída do condensador (15). Na tampa do lavador, foi instalada uma luva de engate rápido de PVC com diâmetro de ¾ pol, sendo o acoplamento auxiliado com mangueira de diâmetro externo de 1 pol. À luva foi conectado um tubo de PVC de ¾ pol com uma altura adequada para o borbulhamento do residual gasoso proveniente do condensador em solução de hipoclorito de sódio, sendo o tambor hermeticamente fechado. Os gases são liberados por meio de uma mangueira de ½ pol instalada na tampa deste tambor, no exterior do prédio. Nas Figuras 3.6 e 3.7 mostram-se o detalhamento do sistema de secagem.

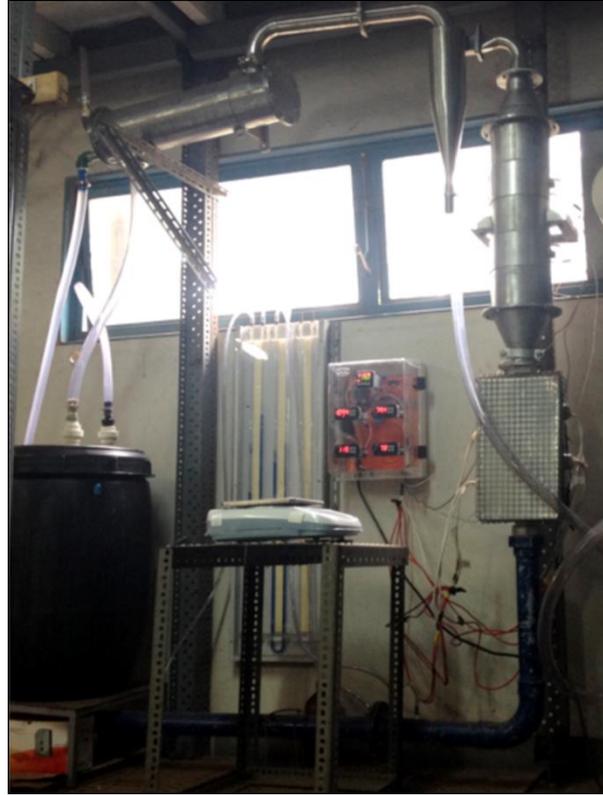


Figura 3.6. Vista geral do sistema de secagem convectiva.

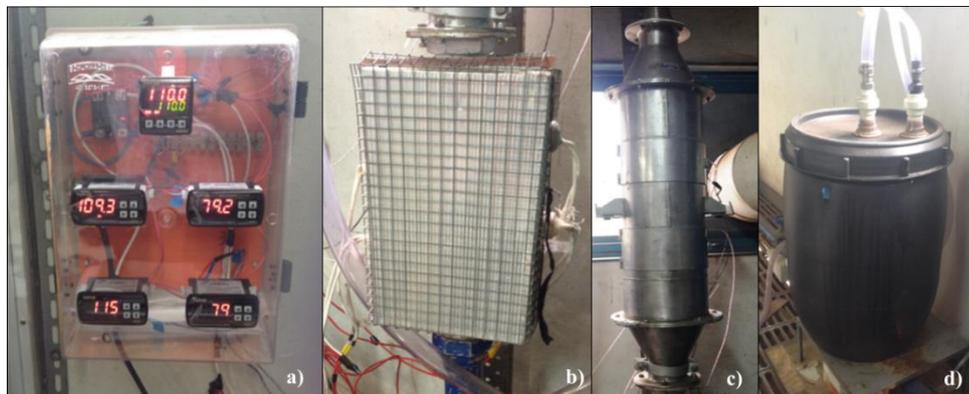


Figura 3.7. Vista do a) sistema de registro de temperaturas; b) sistema de aquecimento; c) câmara de secagem; d) sistema de lavador de gases.

3.4 Caracterização do lodo

A caracterização físico-química do lodo aeróbio (bruto) foi realizada de acordo com os parâmetros e metodologias definidas pela Resolução 375 (CONAMA, 2006) e CFR 40 (EPA, 2003). Foram determinados: porcentagem de sólidos, pH, teor de umidade, concentração de patógenos e metais pesados. Também foi determinada a composição centesimal das amostras.

Para fins de comparação de resultados, utilizou-se o boletim fornecido pelo Laboratório Bioagri – Maringá, que realiza regularmente análises dos resíduos da Gelita – Maringá.

3.4.1 Sólidos

A análise de sólidos foi realizada para o lodo em diferentes etapas de tratamento. Para avaliar o teor de remoção de umidade da etapa de desidratação mecânica, foram analisados o lodo aeróbio (bruto), os lodos após a etapa de sifonamento e decantação (lodos 1 e 2, respectivamente, na Figura 3.3) e o lodo desidratado (após a filtração à vácuo).

Para avaliar a eficiência de remoção de umidade da secagem, após cada ensaio determinava-se o teor de umidade das amostras.

A análise foi realizada por meio do método gravimétrico que é considerado uma metodologia clássica de acordo com *Standard Methods* (APHA, 1998). As amostras, em duplicata, foram preparadas com porções de 10 g e pesadas em uma balança analítica com precisão de 0,0001 g, e submetidas à secagem em estufa sob 105 ± 5 °C. O material foi mantido na estufa por 23 horas e, em seguida, foi pesado e retornado à estufa por mais uma hora, e novamente pesado. Após verificação da massa constante, esta foi considerada a massa final de sólido seco. A umidade inicial em base úmida foi determinada utilizando a Equação 3.1.

$$\%U = \frac{m_i - m_s}{m_i} \quad (3.1)$$

Em que: m_i : massa inicial úmida (g); m_s : massa final de sólido seco (g).

A determinação de sólidos totais e voláteis seguiu também a metodologia clássica de acordo com *Standard Methods* (APHA, 1998). A massa de sólidos totais é a massa final obtida de sólido seco (m_s).

Para a determinação de sólidos fixos, as amostras foram submetidas à mufla à temperatura de 550 °C, por 4 horas. As cinzas foram pesadas e determinou-se a massa de sólidos fixos (m_{SF}). A diferença entre sólidos totais e sólidos fixos resulta no cálculo de sólidos voláteis, cuja porcentagem pode ser calculada pela Equação 3.2.

$$\%SV = \frac{m_s - m_{SF}}{m_s} \quad (3.2)$$

Em que: m_s : massa de sólidos totais (g); m_{SF} : massa de sólidos fixos (g).

3.4.2 pH

As medidas de pH para o lodo bruto foram realizadas em um pHmetro, marca Digimed – modelo DM-2.

3.4.3 Poluentes inorgânicos

Para a caracterização dos elementos presentes lodo, foi realizada a análise de Fluorescência de Raio-X por reflexão total um espectrômetro TXRF de bancada portátil, modelo S2 PICOFOX, marca Bruker. Este equipamento permite uma análise simultânea e multielementar dos elementos presentes na amostra. O equipamento está instalado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, na cidade de Toledo.

Antes da preparação das amostras, os discos de quartzo (30 mm de diâmetro e 3 mm de espessura) foram submetidos a um procedimento de limpeza específico (ESPINOZA-QUINÕES et al., 2013) para evitar contaminação. A preparação das amostras é diferente, dependendo do seu estado físico, conforme descrito a seguir:

Amostras líquidas: as amostras foram preparadas em microtubos do tipo Eppendorf com capacidade de 2 mL, em que foram adicionados 990 µL das amostras e 10 µL de uma solução padrão interno Gálio (1000 ppm), resultando em uma concentração 10 ppm do padrão interno Gálio. As micropipetas utilizadas foram aferidas com o uso de uma balança analítica. Após a adição do padrão interno, 10 µL das amostras foram pipetados sobre o centro de discos de quartzo. Os discos contendo as amostras foram deixados secar em capela de fluxo laminar à temperatura ambiente.

Amostras sólidas: as amostras sólidas foram maceradas até a formação de um pó muito fino. Foram pesadas em microtubos 30 mg das amostras e adicionados 3 µL da solução padrão de Gálio e 2,5 mL de uma solução de Triton para a digestão instantânea. Após a adição da solução de Triton, 10 µL das amostras foram pipetados sobre o centro de discos de quartzo. Os discos contendo as amostras foram deixados secar em capela de fluxo laminar à temperatura ambiente.

Após a secagem, os discos eram colocados no espectrômetro. As leituras das amostras líquidas e sólidas no TXRF duram 300 s e 500 s, respectivamente.

3.4.4 Microrganismos patogênicos

Foram determinadas as concentrações de coliformes termotolerantes, salmonella, ovos viáveis de helmintos e vírus entéricos. Devido à impossibilidade da realização de tais análises na Universidade Estadual de Maringá, as análises destes microrganismos patogênicos foram realizadas no Laboratório Ambiental Labsam, seguindo as metodologias definidas pela Resolução 375 (CONAMA, 2006) análogas às metodologias especificadas em EPA (2003).

O alto custo da análise limitou a quantidade de experimentos, dessa maneira, escolheu-se realizar a análise para a condição mais branda de secagem ($0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ e $80 \text{ }^\circ\text{C}$) e caso o resultado da desinfecção fosse satisfatório, poderia supor-se que as demais condições também realizariam tal inativação microbiológica.

Devido ao grande volume de lodo necessário para a realização das análises, optou-se por realizar a análise composta, ou seja, utilizando-se a mistura da amostra e da sua respectiva duplicata, neste caso, as amostras dos ensaios 1 e 2 do Planejamento Experimental (item 3.6.1).

3.4.5 Densidade aparente

A densidade aparente é definida como a razão da massa do lodo e seu volume total, incluindo o volume de poros. O volume aparente e densidade aparente foram determinados usando-se o princípio de Arquimedes pesando a amostra no ar e em um líquido conhecido (n-hexano). O n-hexano foi usado por não dissolver o lodo.

Para a determinação da massa no n-hexano foi utilizada uma balança hidrostática (Figura 3.8) que se trata de uma balança analítica na qual foi acoplado um aparato baseado no Princípio de Arquimedes, que afirma que a força de empuxo que um líquido exerce em um objeto é igual ao peso do líquido que o objeto desloca.

A densidade aparente foi calculada a partir da massa da amostra no ar dividida pelo seu volume aparente.



Figura 3.8. Balança hidrostática.

3.4.6 Densidade real

A densidade real do lodo é definida como a razão entre a sua massa e o volume que o sólido ocupa, ou seja, excluindo o volume ocupado pelos poros. A densidade absoluta foi determinada por picnometria a gás Hélio, por meio do picnômetro do modelo ACCUPYC II 1340, da marca Micromeritics. As análises foram realizadas no Laboratório de Engenharia e Processos Ambientais (LEPA), na Universidade Estadual de Campinas.

3.4.7 Porosidade

O termo porosidade é definido como a razão entre o volume de poros e o volume total de um corpo. A porosidade pode ser calculada por meio do modelo de três fases, desenvolvido a partir das Equações 3.3, 3.4 e 3.5 (MAYOR e SERENO, 2004; KATEKAWA e SILVA, 2004).

$$V = V_W + V_{ar} + V_S \quad (3.3)$$

Em que: V_W : volume ocupado pela fase líquida (L); V_{ar} : volume ocupado pela fase gasosa (L); V_S : volume ocupado pela fase sólida (L).

Apesar do considerável volume que o ar ocupa no sólido, sua massa pode ser considerada desprezível. Desta maneira, obtém-se a Equação 3.4.

$$m = m_{H_2O} + m_S \quad (3.4)$$

Em que: m_{H_2O} : massa de água na amostra (g); m_S : massa de sólido da amostra (g).

Combinando as Equações 3.3 e 3.4 e usando as definições do teor de umidade em base seca e porosidade, pode-se obter uma expressão para porosidade que a correlaciona com a densidade aparente, densidade real do sólido e teor de umidade do material, como mostrado na Equação 3.5.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap} \left[\frac{\rho_r}{\rho_W} \cdot X + 1 \right]}{\rho_r \cdot [X + 1]} \quad (3.5)$$

Em que: ε : porosidade do lodo (-); ρ_{ap} : densidade aparente do lodo (g.cm^{-3}); ρ_r : densidade real do lodo (g.cm^{-3}); ρ_W : densidade da água líquida (g.cm^{-3}); X: teor de umidade do lodo em base seca) (kg.kg^{-1}).

3.4.8 Composição centesimal

A composição centesimal das amostras do teor de umidade, proteína bruta, lipídeos e cinzas, foi realizada de acordo com metodologia proposta pela AOAC (2005). O teor de carboidratos foi calculado pela diferença dos outros componentes da composição centesimal.

3.5 Procedimento experimental de secagem

3.5.1 Planejamento experimental

Para o estudo foi proposto um Planejamento Fatorial 3^2 com duplicata para analisar a influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem no tempo equilíbrio. A aplicação deste planejamento teve como objetivo verificar a influência das variáveis independentes bem como a interação entre os fatores no processo de secagem.

A variável resposta foi o tempo de secagem para que a amostra atingisse o equilíbrio, garantindo que o seu teor de sólidos estivesse entre 92 – 95 %. Esta condição foi definida de para assegurar que o lodo, após a secagem, apresente teor de sólidos igual ou superior a 90%

(CONAMA, 2006; EPA, 2003). A definição dos níveis das variáveis independentes foi realizada seguindo alguns critérios.

Segundo os processos adicionais para a redução de patógenos (Tabela 2.5), requeridos também pelo CONAMA (2006), EPA (2003) e CETESB (1999), a temperatura das partículas de lodo deve atingir no mínimo 80 °C, e não apenas permanecer o ar de secagem nesta temperatura na entrada da câmara de secagem. Porém, Stern (1974) e Roediger (1976) verificaram em seus respectivos trabalhos que o tempo de exposição do lodo por 30 min a uma temperatura de 60 °C já garantiria a completa inativação microbiológica. Portanto, o consumo de energia pelo processo é minimizado. Esta afirmação foi verificada com êxito por Serenotti (2009), cuja desinfecção bacteriológica e parasitológica se mostrou eficiente em ensaios de secagem sob esta temperatura.

Testes preliminares mostraram que esta condição foi atingida quando se utilizou a temperatura de entrada de 80 °C. Dessa maneira, fixou-se essa temperatura como o nível mínimo de operação para que a temperatura mínima das partículas atingisse 60 °C por mais de uma hora.

O nível máximo foi fixado em 140 °C, considerando-se que acima desta temperatura, alguns constituintes do lodo podem entrar em decomposição térmica e promover a emissão de possíveis compostos tóxicos para a atmosfera. Além disso, Bennamoun et al. (2014), estudando o comportamento geral da cinética de secagem do lodo e os efeitos de três diferentes temperaturas do ar de secagem (80, 140 e 200 °C) obtiveram resultados semelhantes para as temperaturas de 140 e 200 °C. Desta maneira, foi escolhida a temperatura de 140 °C como nível máximo, devido ao menor consumo energético. Fixou-se, então como nível médio, a temperatura de 110 °C.

Os níveis de vazão do ar de secagem foram definidos de modo a garantir a operação na condição de leito fixo, com altura da torta de aproximadamente 5 cm. O nível máximo foi estabelecido como sendo a máxima queda de pressão (Δh) na placa de orifício, para a qual o lodo permanece fixo, nas bandejas, sem que haja expansão do leito, e, neste caso, ficou em 0,5 kg.min⁻¹.

O nível mínimo foi fixado como sendo 60 % da queda de pressão (Δh) do nível máximo. A vazão média correspondeu à média dos valores máximo e mínimo. Assim foram definidas as vazões de 0,5 kg.min⁻¹, 0,4 kg.min⁻¹, e 0,3 kg.min⁻¹, níveis máximo, médio e mínimo, respectivamente. Na Tabela 3.2 é mostrada a matriz experimental dos dados.

Tabela 3.2. Planejamento fatorial 3^2 com duplicata.

Corridas		Temperatura do ar (°C)	Vazão mássica do ar (kg.min⁻¹)
1	1	-1,00000	-1,00000
2	1	-1,00000	0,00000
3	1	-1,00000	1,00000
4	1	0,00000	-1,00000
5	1	0,00000	0,00000
6	1	0,00000	1,00000
7	1	1,00000	-1,00000
8	1	1,00000	0,00000
9	1	1,00000	1,00000
10	2	-1,00000	-1,00000
11	2	-1,00000	0,00000
12	2	-1,00000	1,00000
13	2	0,00000	-1,00000
14	2	0,00000	0,00000
15	2	0,00000	1,00000
16	2	1,00000	-1,00000
17	2	1,00000	0,00000
18	2	1,00000	1,00000

A análise estatística foi desenvolvida com o auxílio do STATISTICA 7.0®, empregando uma confiabilidade de 95%, para verificar o grau de influência das variáveis individuais e sua interação sobre a resposta tempo de secagem.

A metodologia para a calibração da vazão de ar foi determinada pela placa de orifício, descrita no Apêndice A.

3.5.2 Cinética de secagem

Para a realização dos experimentos da cinética de secagem inicialmente ligava-se o secador e regulava-se a velocidade do ar por meio da válvula. Em seguida fixava-se a temperatura do ar desejada. Aguardava-se a estabilização das condições selecionadas.

Em seguida, pesava-se a bandeja separadamente. O lodo preparado e armazenado sob refrigeração à 4 °C era colocado na bandeja previamente pesada. Foi utilizada uma massa de 600 g de lodo. Após a estabilização das condições operacionais do equipamento e do preparo da bandeja, iniciava-se a secagem. Durante o processo, a bandeja era pesada em uma balança semi-analítica da marca BEL-ENGINEERING, modelo MARK LI2001, com capacidade máxima de 12000 g e sensibilidade de 0,1 g. Nos primeiros 60 min, a massa de sólidos era determinada em intervalos de 5 min, a partir daí, em intervalos de 10 min. A partir dos 120 min as massas eram determinadas a cada 30 min. Além das massas, eram monitoradas as temperaturas medidas pelos termopares. Ao final da secagem, quando estavam próximas do equilíbrio, as amostras voltavam a ser pesadas em intervalos de 10 min para determinar com maior precisão o tempo de secagem. Também se monitorava continuamente a temperatura ambiente e umidade relativa do ar durante os ensaios.

Após a secagem, o lodo seco era triturado, quarteadado e acondicionado em recipientes plásticos vedados e identificados. Por meio dos dados obtidos para cada condição proposta no planejamento experimental, foram calculados o valor médio obtido entre a amostra e duplicata o desvio médio. Em seguida, plotou-se as a curva de secagem, a curva da taxa de secagem e a curva de temperatura. As taxas de secagem foram obtidas a partir da derivação numérica, apresentada pela Equação 3.6.

$$\frac{\Delta X_i}{\Delta t_i} = \frac{X_{i-1} - X_i}{X_i - X_{i-1}} \quad (3.6)$$

Em que X_{i-1} : conteúdo de umidade da medida anterior (b.s.); X_i : conteúdo de umidade atual (b.s.); t_i : tempo atual (min); e, t_{i-1} : tempo da medida anterior (min).

3.5.3 Modelagem matemática

Para o ajuste aos dados experimentais da cinética de secagem foram utilizados os modelos empíricos de Lewis (1921), Page (1949), Henderson e Pabis (1961), Henderson (1974), Logarítmico e Danish et al. (2016), representados pelas Equações 2.18 a 2.22.

Também foi realizado o ajuste aos dados de acordo com a solução analítica proposta por Crank (1975) descrita pela Equação 2.15 desenvolvido pela Crank (1975). Neste trabalho, a regressão não linear foi realizada usando o software STATISTICA 7.0® pelo método de Levenberg-Marquardt.

3.5.4 Isotermas de dessorção

A determinação das isotermas de dessorção foi realizada no Laboratório de Caracterização de Biomassa, Recursos Analíticos e de Calibração (LRAC), na Universidade Estadual de Campinas. As isotermas de dessorção de umidade do lodo foram realizadas pelo método dinâmico, por meio do equipamento DVS-*Dynamic Vapour Sorption*, marca SMS, modelo DVS 02. A amostra foi previamente seca em estufa a vácuo à 70 °C por 24 h, em seguida, foi levada ao equipamento DVS.

O sistema possui uma microbalança que mede a perda de umidade da amostra, a partir do arraste de um gás inerte, com umidade relativa e temperatura controladas. As umidades estabelecidas são geradas a partir de controladores de fluxo de massa, misturando-se fluxos de gás seco e vapor saturado em determinadas proporções.

Não foi possível realizar as isotermas sob as mesmas temperaturas utilizadas nos ensaios de secagem convectiva, devido à limitação do equipamento. Por esta razão, as isotermas foram realizadas sob as condições de 20, 35 e 50 °C.

3.5.5 Eficiência energética da secagem convectiva

Para a avaliação da eficiência energética foram utilizados os parâmetros de eficiência energética (η), eficiência energética (EE), eficiência de secagem (ES), eficiência térmica (ET), consumo específico de calor (CEC) e consumo específico de energia (SEC), mostrados no item 2.8.

Para a utilização dos fatores de desempenho foram utilizadas equações para o secador convectivo de acordo com as condições operacionais definidas pelo planejamento experimental:

- Energia necessária para aquecer o material de sua temperatura inicial até a temperatura final para um tempo de secagem fixado (STRUMILLO e KUDRA, 1986), utilizando-se a 3.7.

$$Q_M = m_M \cdot (C_{MF} \cdot T_{MF} - C_{MI} \cdot T_{MI}) \quad (3.7)$$

Em que: Q_M : calor necessário para aquecer o material (kJ); m_M : massa de material ao final da secagem (kg); C_{MI} : calor específico do material no início da secagem ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

C_{MF} : calor específico do material no final da secagem ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); T_{MI} : temperatura do material no início da secagem (K); T_{MF} : temperatura do material no final da secagem (K).

Os valores de calor específico do material no início e no final da secagem (C_{MF} e C_{MI}) podem ser calculados de acordo com o calor específico do material seco e o seu teor de umidade, conforme Equação 3.8.

$$C_M = \frac{C_{MS} + C_W \cdot X}{1 + X} \quad (3.8)$$

Em que: C_{MS} : calor específico do material seco ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); C_W : calor específico da umidade contida na fase líquida ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); X : teor de umidade do material (b.s.).

- Energia necessária para evaporação da umidade, descrita pela Equação 3.9. (PERRY e CHILTON, 1973),

$$Q_W = \Delta H_{V,W} \cdot m_{V,W} \quad (3.9)$$

Em que: Q_W : calor necessário para evaporar a umidade (kJ); $\Delta H_{V,W}$: calor latente de evaporação da água pura na temperatura do ar ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$); $m_{V,W}$: massa de água evaporada (kg).

O calor latente de evaporação é considerado como aquele necessário para evaporar a água livre, válido para materiais com teores de umidade elevados e pode ser calculado pelas Equações 3.10 e 3.11, dependendo da temperatura do ar (MUTHU e CHATTOPADHYAY, 1993 citado por Vieira, 2006).

$$\Delta H_{w,v} = 2502,535259 - 2,38576424 \cdot (T + 273) \text{ para } 0^\circ\text{C} \leq T_{ar} \leq 65,56^\circ\text{C} \quad (3.10)$$

$$\Delta H_{w,v} = [7329155,98 - 15,9959641 \cdot (T + 273)^2]^{\frac{1}{2}} \text{ para } 65,56^\circ\text{C} < T_{ar} \leq 260^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

Para efeitos de cálculo, foram desprezadas as perdas de calor para o ambiente e foi considerado que a energia total fornecida à operação pelo secador é igual à energia consumida pelo secador. Dessa maneira, a energia fornecida à operação foi considerada como a soma da energia térmica e da energia mecânica, mostradas nas equações 3.12 e 3.13, respectivamente (MOTEBALI et al., 2014a; MOTEBALI et al., 2011; AGHBASHLO et al., 2008; KOYUNCU et al., 2007; VIEIRA et al., 2007).

- Energia térmica da operação (energia para aquecer o ar de secagem):

$$E_{TER} = Q_{AR} \cdot C_A \cdot \Delta T \cdot t \quad (3.12)$$

Em que: Q_{AR} : fluxo mássico do ar secagem ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$); C_A : calor específico do ar úmido ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); ΔT : gradiente de temperatura do ar (K); tempo de secagem (s).

-Energia mecânica da operação (energia consumida pelo soprador):

$$E_{MEC} = \Delta P \cdot \dot{V}_{ar} \cdot t \quad (3.13)$$

Em que: ΔP : queda de pressão (Pa); \dot{V}_{ar} : vazão volumétrica de ar bombeada pelo compressor ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$); t: tempo de secagem (s).

O calor específico do ar úmido na entrada do secador foi calculado pela Equação 3.14 (ZARE et al., 2006).

$$C_A = 1009,26 - 0,0040403 \cdot (T - 273,16) + 0,00061759 \cdot (T - 273,16)^2 - 0,0000004097 \cdot (T - 273,16)^3 \quad (3.14)$$

3.5.6 Secagem solar do lodo

Para o estudo da cinética de secagem solar do lodo foi utilizado o protótipo desenvolvido na Unioeste (SCALCON, 2014) com o intuito de promover a desidratação do lodo por meio da secagem solar e filtração simultaneamente. O protótipo foi resultado do projeto de dissertação do autor e em dezembro de 2015 foi realizado um depósito de pedido de patente sob o número do registro: BR2020150321878. O equipamento está instalado na área de testes do Projeto Pró-Natureza Limpa da Unioeste e é mostrado na Figura 3.9. Na Figura 3.10 são mostradas as vistas frontal e lateral.

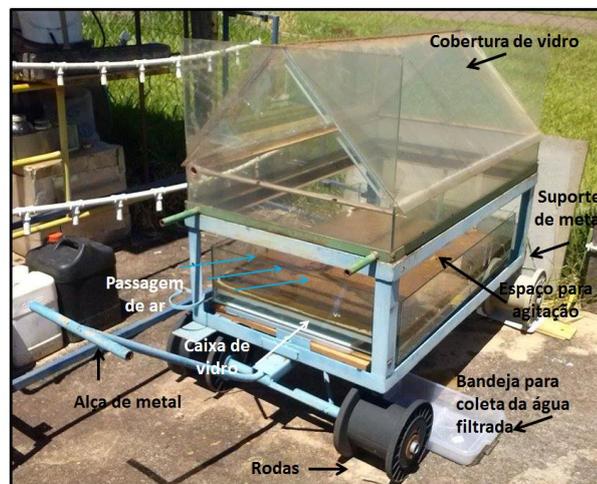


Figura 3.9. Foto do protótipo.



Figura 3.10. Vista frontal e lateral do protótipo.

Nas Figuras 3.9 e 3.10 são mostrados os componentes do sistema de secagem solar, sendo eles:

- Estrutura metálica: que serve de suporte da caixa de vidro,
- Caixa de vidro: em que é colocado o lodo durante o processo de desidratação. Sobre a base (que possui orifícios) é colocado um meio filtrante, possibilitando a perda de umidade por filtração e secagem;
- Devido à limitação da balança e dificuldade de manuseio da caixa de vidro, foram utilizadas bandejas com orifícios, que possibilitaram a pesagem das amostras e a realização do experimento em duplicatas;
- Cobertura de vidro: que possibilita a incidência solar e simultaneamente protege o lodo de chuvas, orvalhos e outras intempéries como ressaltaram Salihoglu et al. (2007);
- Bandeja: coleta a água retirada por filtração.

As amostras de lodo foram preparadas conforme a metodologia descrita no item 3.3. A massa de lodo foi monitorada em intervalos de 30 minutos nos dois primeiros dias de secagem. Depois os intervalos foram de 2 a 3 horas, até a obtenção de massa constante. A temperatura ambiente, a temperatura dentro da câmara de secagem e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de um termohigrômetro digital. Após os ensaios de secagem o lodo foi caracterizado quanto ao teor de sólidos.

Para a avaliação da eficiência da secagem solar foram utilizadas as Equações 2.24 e 2.25 de eficiência global de secagem (η_d) e eficiência secagem no primeiro dia (η_{d1}). Como no módulo de secagem solar não há utilização de ventiladores, o termo P_f foi desconsiderado.

Devido às características construtivas do secador e também à ausência de ventilador, não foi possível medir as diferentes variáveis na entrada e na saída do secador, como temperatura e umidade absoluta. Por esta razão, os demais parâmetros de eficiência energética da secagem solar não foram calculados.

3.5.7 Análise do encolhimento do lodo

O efeito da temperatura no encolhimento do lodo foi analisado apenas para o período de taxa de secagem decrescente, já que este fenômeno é observado neste período. Por esta razão, o lodo desidratado mecanicamente, conforme descrito no item 3.3, foi inicialmente seco em um secador convectivo nas temperaturas de 80, 110 e 140 °C a uma vazão mássica de ar de 0,5 kg.min⁻¹, até que o teor de umidade crítica (X_C) fosse atingido. O tempo de secagem necessário para a obtenção de X_C foi determinado em ensaios de secagem anteriores.

As amostras de lodo com X_C foram acondicionadas em discos de aço inox de dimensões conhecidas (18,2 mm de diâmetro e 5 mm de espessura) cuja base era de tela, para possibilitar a secagem também pela face interior. As amostras foram pesadas e levadas à uma estufa. Foram realizados ensaios sob as temperaturas de 80, 110 e 140 °C.

Os experimentos foram realizados em duplicata. Durante a secagem, as amostras eram retiradas do secador em intervalos de tempo estabelecidos para a determinação de propriedades físicas.

Em cada ponto as amostras eram pesadas e suas dimensões (diâmetro e espessura) eram medidas em quatro direções diferentes por meio de um paquímetro digital. O volume aparente e densidade aparente foram determinados usando-se o princípio de Arquimedes pesando a amostra no ar e em um líquido conhecido (n-hexano). O n-hexano foi usado por não dissolver o lodo. O teor de umidade das amostras foi obtido pelo método gravimétrico em estufa a 105 °C por 24 h.

Foram analisadas mudanças estruturais na superfície do lodo após a secagem por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), da marca LEO Electron Microscopy (modelo Leo 440i) acoplado a um Detector de Energia Dispersiva de raios X (EDX), da marca LEO Electron Microscopy (modelo 6070).

Para o ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem foram utilizados os modelos empíricos de Lewis (1921), Page (1949), Henderson e Pabis (1961), Henderson (1974), Logarítmico e Danish et al. (2016), representados pelas Equações 2.18 a 2.22. Também foi realizado o ajuste dos dados de acordo com a solução analítica proposta por Crank (1975), representada pela Equação 2.15.

Para o ajuste aos dados obtido de encolhimento das dimensões foram utilizados modelos lineares e modelos polinomiais. Também foi testado o modelo fundamental de Perez e Calvelo (1984), modificado por Mayor e Sereno (2004). Os modelos fundamentais de encolhimento

baseiam-se em balanços de massa, definições de densidade e porosidade e variação do volume (PEREZ e CALVELO, 1984; MAYOR e SERENO, 2004). O modelo de Perez e Calvelo modificado (Equação 3.15) inclui explicitamente variações da porosidade durante o processo de secagem e leva em consideração a porosidade inicial do material:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{(1 - \varepsilon)} \left[1 + \frac{\rho_0(X - X_0)}{\rho_w(1 + X_0)} - \varepsilon_0 \right] \quad (3.15)$$

Neste trabalho a regressão não-linear foi realizada utilizando-se o software STATISTICA 7.0[®] pelo método de Levenberg-Marquardt.

Além destes parâmetros, foram analisadas a cada intervalo de tempo a densidade aparente e porosidade, por meio das metodologias descritas nos itens 3.5.5 e 3.5.7.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Características físico-químicas do lodo

4.1.1 Umidade inicial e Sólidos Totais e Voláteis

O conteúdo de umidade inicial obtido para o lodo aeróbio bruto foi de $99,18 \pm 0,19$ % (b.u.), valor próximo ao resultado fornecido no boletim de análise fornecido pela Gelita, que foi de 99,4 %. Este resultado confirmou a necessidade de um processo preliminar de desidratação mecânica.

Os resultados mostram que após as etapas de decantação e filtração, o teor de umidade do lodo diminuiu para $92,21 \pm 0,009$ %. Esta redução de aproximadamente 7 % é próxima aos teores de redução de umidade por meio de desidratação mecânica encontrados na literatura (RAYNAUD et al., 2012; MA et al., 2011; RAYNAUD et al., 2010a; RAYNAUD et al., 2010b; RUIZ et al., 2010; OLIVIER e VAXELAIRE, 2005). O percentual de redução de umidade obtido nas operações parece pequeno quando comparado ao teor de umidade total do lodo. Porém, por meio de um balanço de massa (Figura 4.1), observa-se uma redução de 91,3 % da massa. Dessa maneira, uma etapa prévia de desidratação do lodo é importante pois além desta reduzir o tempo de secagem, facilita o seu manuseio e armazenamento.

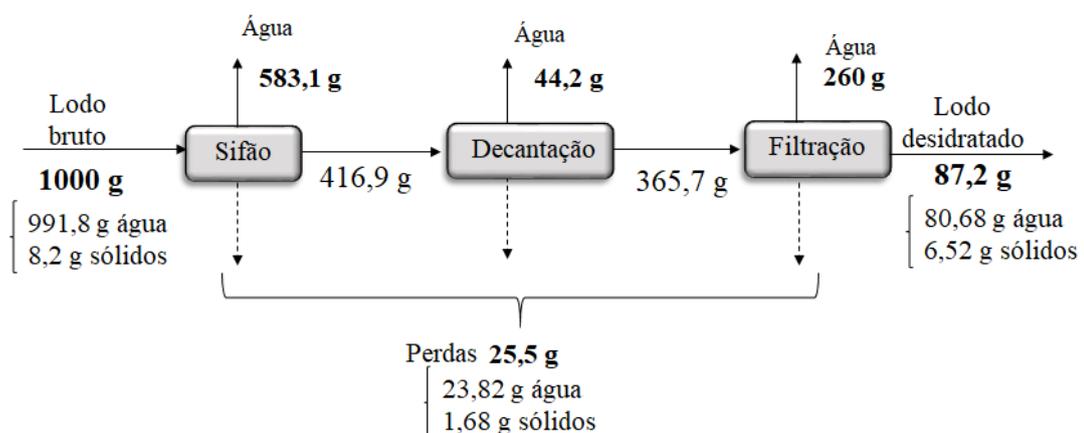


Figura 4.1. Fluxograma do balanço de massa das operações de desidratação mecânica do lodo. As setas pontilhadas representam perdas durante o processo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Algumas perdas de lodo podem ocorrer no processo (setas pontilhadas), como por exemplo no manuseio do sifão. A composição em massa de água e sólidos presentes no lodo

bruto e no lodo desidratado mecanicamente foram estimados de acordo com a análise de sólidos realizadas, mostrada a seguir.

A Tabela 4.1 mostra a porcentagem de umidade e sólidos totais presentes nas amostras de lodo. A Tabela 4.2 mostra a porcentagem de sólidos fixos e voláteis presentes nos sólidos totais.

Tabela 4.1. Porcentagem de umidade, sólidos totais.

	Lodo aeróbio (bruto)	Lodo decantado	Lodo filtrado
% Umidade	99,18 ± 0,19	97,31 ± 0,02	92,21 ± 0,009
% Sólidos Totais	0,82 ± 0,19	2,69 ± 0,02	7,79 ± 0,009

Tabela 4.2. Porcentagem de sólidos fixos e voláteis do lodo.

	Lodo aeróbio (bruto)	Lodo decantado	Lodo filtrado
% Sólidos Fixos	53,32 ± 0,52	43,72 ± 0,19	39,58 ± 0,02
% Sólidos Voláteis	46,68 ± 0,52	56,28 ± 0,19	60,42 ± 0,02

Comparando o resultado de sólidos totais do lodo aeróbio com o resultado da análise de sólidos totais requisitados pela Gelita ao Laboratório Bioagri, os valores estão próximos e podem ter uma pequena variação devido às chuvas.

As lamas ou lodos secundários, também conhecidos como lamas ou lodos biológicos, são produzidos nos processos de tratamento biológico. Quando provenientes dos processos de lamas ativadas e de leitos percoladores, geralmente contêm sólidos com concentração de 0,4 a 1,5 % e de 1 a 4 % em matéria seca, respectivamente. Estes lodos são mais difíceis de desidratar do que os lodos primários por causa do floco biológico pouco denso inerente às lamas biológicas. A natureza coloidal tem um efeito muito importante sobre o desempenho da desidratação, pois quanto maior a natureza coloidal, mais difícil se torna a desidratação (DURSUN e DENTEL, 2009; TUROVSKIY e MATHAI, 2006). Esta característica explica porque a redução da umidade por processos mecânicos é tão baixa.

Nota-se, pela análise da Tabela 4.2 que, no decorrer do preparo do lodo, a porcentagem de sólidos voláteis em relação à porcentagem de sólidos fixos aumenta. Este fato pode ser explicado pela maneira como os sólidos encontram-se distribuídos no lodo. Fernandes (2000) afirma que, dos sólidos totais de lodos de esgoto, nos sólidos suspensos encontram-se,

aproximadamente 75 % de sólidos voláteis e 25 % fixos. Entretanto, quanto aos sólidos dissolvidos tem-se 30 % de voláteis contra 70 % de fixos.

Dessa forma, grande parte dos sólidos fixos (que está dissolvida na água) é retirada por decantação e filtração. Já a matéria orgânica (SV) é retida no meio filtrante. Li et al. (2014) obtiveram uma porcentagem semelhantes de sólidos voláteis (63.79 %).

4.1.1 Teor de umidade final

O teor de umidade também foi determinado após os ensaios de secagem no secador convectivo, segundo *Standard Methods* (APHA, 1998). O percentual de umidade variou entre 3 e 5 %. Este valor está abaixo do limite máximo estabelecido pela legislação brasileira (10%) como um dos requisitos para ser considerado um biossólido (CONAMA, 2006) .

4.1.2 pH

O valor de pH obtido para o lodo bruto foi de 7,9. Este valor é compatível com os valores encontrados na literatura para lodo de indústria de gelatina, que variam entre 7,6 e 12,5 (GUIDI,2012; TANIGUSHI,2010; ARAÚJO,2006).

4.1.3 Metais Pesados

A Tabela 4.3 mostra os resultados das análises de metais pesados para o lodo bruto e para o lodo seco, segundo o procedimento de TXRF, bem como os níveis máximos admitidos pelas legislações vigentes.

Os valores de concentração de cada metal variaram para as 19 amostras. Segundo Tedesco (2008) o teor de nutrientes nos resíduos orgânicos é muito variável, mesmo quando se considera um único tipo de resíduo.

Apesar da variabilidade, as concentrações de metais encontrados no lodo encontram-se abaixo dos limites especificados pelo EPA (2003) e CONAMA (2006) para todas as amostras.

Tabela 4.3 Concentração de metais pesados no lodo bruto (mg kg⁻¹).

Ensaio* ↓	Arsênio (As)	Bário (Ba)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Chumbo (Pb)	Níquel (Ni)	Selênio (Se)	Zinco (Zn)
Níveis máximos**	41	1300	1000	1500	300	420	100	2800
Bruto	39,7	512	586	314	25	412	72	1540
1	39,7	514	587	332	8,5	410,5	67,6	1524,5
2	39,5	516,2	583,4	336	9,1	402,1	69,2	1632
3	40,4	250	641	284	18,3	372	42,45	1311
4	38,2	347,3	638,3	282,1	20,1	392	41	1492
5	28,8	715	591,5	147,5	34,6	360	37,7	1507,5
6	43,15	702	983,5	330,5	21,4	333	56,6	1331
7	27,3	593	549	285,5	26,25	407,4	35,2	989,5
8	30,1	584	552	294	27,1	412	41,2	959
9	28,9	409	615,5	258,5	15,7	231,5	25	1577
10	31,3	425	620,4	273,4	22,4	244	29	1674
11	21,75	467	644,5	239,1	17,2	393	28,3	1256,5
12	22,5	455	683	227	13,2	395	29,3	1278
13	32,3	417	620,4	273	22,4	244	39	1608
14	22,1	467	642	239,1	17,2	333	29,5	1254,5
15	22,5	475	638	227	13,2	405	29,3	1278
16	28,7	550	592	239	25	398	41	1302
17	41,8	512	614	341	41	345	43	998
18	42	516	593	295	24	405	39	1547

* Ensaio da secagem convectiva - **Níveis máximos de acordo com Norma nº375 (CONAMA,2006)

Alguns autores destacam que quando o lodo é proveniente de estações de tratamento biológico das águas servidas, ou seja, com predominância de esgotos domésticos sobre os industriais, os níveis de metais pesados permanecem dentro das faixas aceitáveis para o seu uso agrônomo (GALLOWAY e JACOBS, 1977; CETESB, 1999; OLIVEIRA et al., 2001; TSUTIYA, 2001; PEGORINI et al., 2003; GALDOS et al., 2004).

Apesar de se tratar de um lodo de origem industrial, em virtude da matéria-prima principal ser o couro animal e do tipo de processo de fabricação de gelatina, as concentrações de metais estão abaixo dos valores máximos estabelecidos. Estes resultados também foram observados por Guidi (2012), Taniguchi (2010), Guimarães (2009) e Ribeiro (2007) em seus estudos com lodos provenientes de indústria de gelatina.

Entretanto, a concentração de Níquel encontrada está bem próxima do limite máximo de 420 mg.kg^{-1} , chegando a 412 mg.kg^{-1} em algumas amostras. Araújo (2006) obteve uma concentração muito menor, de 90 mg.kg^{-1} , enquanto outros pesquisadores (GUIDI, 2012; TANIGUCHI, 2010; GUIMARÃES, 2009; RIBEIRO, 2007), não determinaram essas concentrações, assim como o boletim fornecido pela empresa Bioagri (2005). Não foi encontrada qualquer informação sobre o processo de produção da gelatina que possa justificar tais concentrações elevadas de Níquel.

Spinosa et al. (2011) afirmam que a aplicação de lodo no solo por tempo prolongado pode levar ao acúmulo de contaminação (isto é, metais pesados) no mesmo e afetar ecossistemas inteiros. Por esta razão, é de fundamental importância que os níveis de concentração destes componentes não excedam os valores atualmente permitidos.

4.1.4 Microrganismos patogênicos

Na Tabela 4.4 são mostradas as concentrações de microrganismos patogênicos presentes no lodo bruto e no lodo tratado sob condições mais brandas de vazão mássica do ar e temperatura ($0,3 \text{ kg.s}^{-1}$ e $80 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tabela 4.4. Concentração de microrganismos patogênicos presentes no lodo bruto e no lodo seco à temperatura de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e vazão de ar de $0,3 \text{ kg.s}^{-1}$.

Parâmetros	Lodo bruto	Lodo seco ($80 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,3 \text{ kg.s}^{-1}$)	Classe A (Conama, 2006)
Coliformes TT (<i>E. coli</i>) NMP. gST^{-1}	>1600	84	10^3
Ovos viáveis de helmintos ovo. gST^{-1}	<0,25	<0,25	0,25
Salmonella NMP. gST^{-1}	Ausente	Ausente	Ausente
Enterovírus UFP. gST^{-1}	<0,25	<0,25	0,25

Como se pode notar, mesmo na amostra de lodo bruto, os ovos viáveis de helmintos, salmonela e enterovírus encontram-se dentro dos limites estabelecidos. Porém, o teor de coliformes termotolerantes (TT) está acima do permitido para enquadrar o lodo na Classe A, classificando-o como B, cujo uso é mais restrito. O lodo Classe B só pode ser aplicado em grandes culturas e áreas de reflorestamento, pois ainda apresenta riscos de contaminação. Desta maneira, o objetivo principal da operação de secagem foi diminuir a concentração de coliformes TT a níveis menores de $1000 \text{ NMP. gST}^{-1}$.

Após a realização da secagem, esta concentração caiu para 84 NMP. g_{ST}^{-1} , garantindo uso seguro e sem restrições de acordo com a legislação brasileira vigente para lodos Classe A (CONAMA, 2006).

Serenotti et al. (2010) ao estudarem a secagem como método de inativação microbiológico de lodos de esgoto, utilizando o mesmo secador convectivo deste trabalho também obtiveram resultados satisfatórios para todas as condições testadas pelos autores. A concentração de *E. coli*, que inicialmente era, em média, de $7,9 \times 10^5$ NMP. g_{ST}^{-1} foi reduzida a 0 NMP. g_{ST}^{-1} .

Como explicado na metodologia, devido à impossibilidade de se realizar as análises microbiológicas para todas as condições, optou-se pela condição mais branda de secagem ($0,3 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ e $80 \text{ }^\circ\text{C}$). Desta maneira, sendo o resultado da desinfecção satisfatório, supõe-se que condições mais drásticas também asseguram tais características finais.

De acordo com Stern (1974), o tempo de destruição da *E. coli* para uma temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ deve ser de 60 min, porém aumentando a temperatura para $70 \text{ }^\circ\text{C}$, o tempo decresce para 5 min. Enquanto, para a *Salmonella thypi* o tempo de destruição à temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ é de 30 min, e aumentando para $70 \text{ }^\circ\text{C}$ decresce para 4 min. O autor determinou estes tempos para o processo de pasteurização do lodo.

Como a secagem desenvolvida foi convectiva direta com fluxo ascendente de ar, o processo não pode ser encarado como uma esterilização à calor seco convencional, pois esta esterilização precisa de um tempo muito maior quando comparado com a pasteurização.

A Figura 4.2 mostra o perfil de temperatura médio sob a condição de temperatura de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e vazão do ar de $0,3 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$, realizados em duplicata (ensaios 1 e 2), em que T_e representa a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem (fixada por meio do controlador), T_s representa a temperatura do ar na saída da câmara, após passar pelo leite, e T_{ap} representa a temperatura aparente do lodo, medida pelo termopar inserido na amostra.

Verifica-se que a temperatura aparente do lodo (T_{ap}) permanece acima de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ por um tempo de exposição suficiente para a inativação microbiológica, de acordo com Stern (1974) e Roediger (1979), atingindo $80 \text{ }^\circ\text{C}$, por pelo menos uma hora, satisfazendo também as condições estabelecidas pelo Conama nº 375 (CONAMA, 2006) e a norma EPA 40 CFR Part 503 (EPA, 2003). As demais condições de secagem também resultaram em temperaturas aparente do lodo (T_{ap}) maiores do que $80 \text{ }^\circ\text{C}$ durante tempos superiores a 60 minutos, como pode ser observado nos perfis de temperatura mostrados no item 4.2 e no Apêndice B.

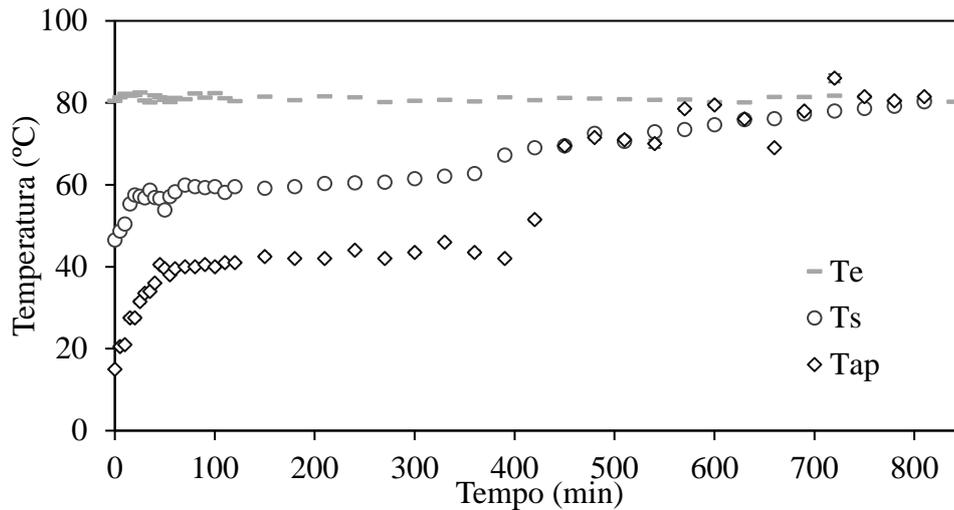


Figura 4.2. Perfil de temperatura da média dos ensaios 1 e 2 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

O comportamento do perfil de temperatura será discutido no tópico 4.2, juntamente com as curvas da cinética de secagem.

4.1.5 Composição centesimal do lodo

Na Tabela 4.5 é mostrada a composição centesimal do lodo decantado, onde nota-se que a maior parte dos sólidos é composta de proteínas, devido à matéria-prima utilizada na produção de gelatina (ossos e pele de animais).

Tabela 4.5. Composição centesimal do lodo.

Componente	% Base seca
Proteínas	$50,891 \pm 2,528$
Lipídeos	$0,595 \pm 0,299$
Cinzas	$34,407 \pm 11,208$
Fibras	$3,350 \pm 1,075$
Carboidratos	$8,458 \pm 3,775$

Avaliando as características do lodo obtido após as etapas de verificação verifica-se que o produto obtido atende às especificações para utilização agrícola de resíduos sólidos (CONAMA, 2006).

O teor de umidade inferior a 10 % e as concentrações de metais e microrganismos patogênicos estão abaixo dos limites máximos estabelecidos (CONAMA, 2006).

Além disso, a concentração de microrganismos patogênicos é suficientemente pequena para que este lodo se enquadre como um biossólido Classe A, de acordo com a norma 375 (CONAMA, 2006), que o torna apto a ser utilizado com segurança no solo sem restrições (CONAMA,2006; EPA 2003). Ou seja, diferentemente do lodo Classe B, que só pode ser utilizado em grandes áreas e áreas de reflorestamento, o produto final obtido pode ser utilizado até mesmo em horticulturas.

Entretanto, mesmo apresentando uma concentração de nutrientes interessante para o uso agrônômico e atendendo às especificações, caso o sólido obtido venha a ser utilizado no solo, é importante que seja realizada constantemente a avaliação das suas características, assim como o monitoramento dos solos nos quais ocorre sua aplicação (GUIMARÃES et al., 2009; TANIGUCHI, 2010).

4.2 Ensaios de Secagem

Os ensaios de secagem seguiram o planejamento experimental Fatorial 3^2 em duplicata, conforme Tabela 3.2, apresentada no item 3.6.1. Os perfis de temperatura, as curvas de cinéticas e de taxas de secagem relativas às condições de mínimo, médio e máximo do processo, estão apresentadas a seguir, nas Figuras 4.3 a 4.10. As demais condições encontram-se no Apêndice B. As taxas de secagem (Figuras 4.4, 4.7 e 4.10) foram plotadas em função do teor de umidade adimensional (X_R) e do teor de umidade (b.s.) simultaneamente para facilitar a comparação dos dados e interpretação dos resultados.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são apresentadas as curvas de cinéticas e de taxas de secagem para temperatura de 80 °C e vazão de 0,3 kg.min⁻¹. O perfil de temperatura pode ser visto na Figura 4.2 no item 4.1.4. No ensaio de secagem verificou-se por meio das taxas que houve um período inicial de aquecimento do material (adaptação), representado nas Figuras 4.3 e 4.4 pelos losangos. O teor de umidade do material inicialmente era $14,0 \pm 0,15$ (b.s.). O período inicial de adaptação durou 120 min, até que as amostras atingissem um conteúdo de umidade médio de aproximadamente $10,5 \pm 0,11$ (b.s.).

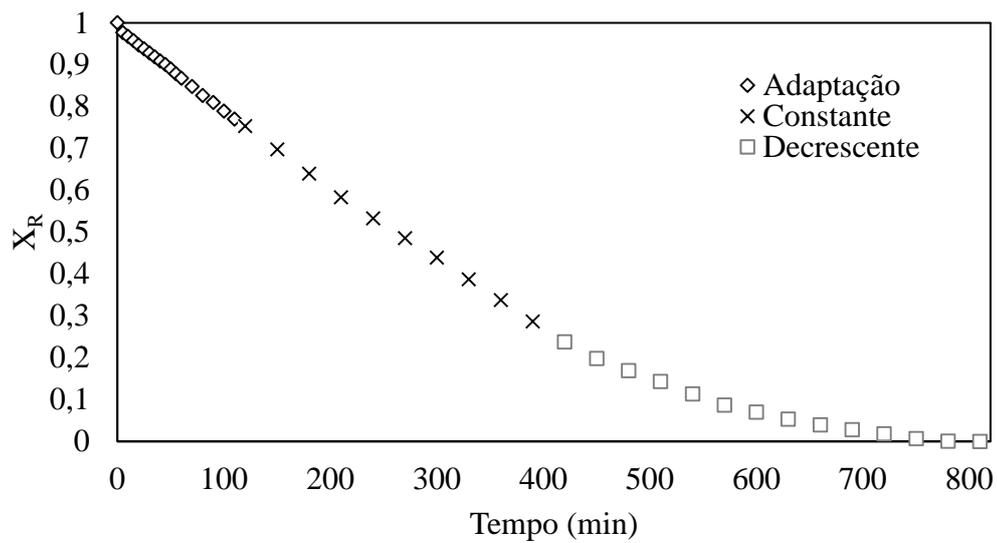


Figura 4.3. Cinética de secagem relativa aos ensaios 1 e 2 ($T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

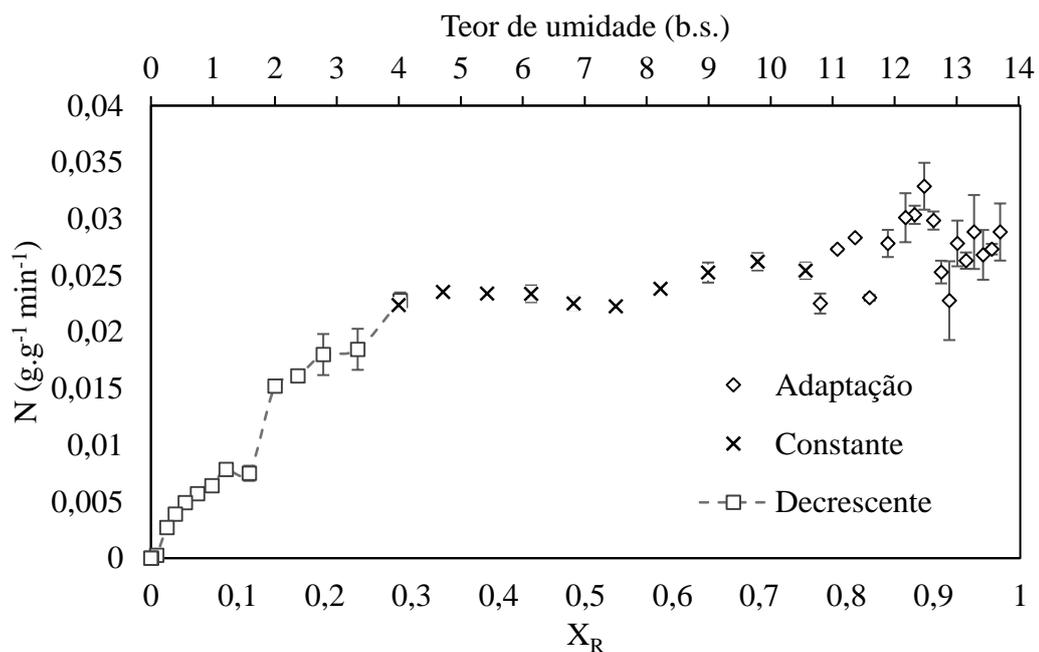


Figura 4.4. Taxa de secagem relativa aos ensaios 1 e 2 ($T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

Em seguida, iniciou-se o período à taxa constante, que durou até 390 min de secagem, (marcadores em \times). Quando a amostra atingiu X_C de $4,13 \pm 0,07$ (b.s.) iniciou-se o período de taxa decrescente (marcadores quadrados).

No período de taxa decrescente houve um momento de mudança de comportamento na curva, como pode ser visto na Figura 4.4. Este momento ocorreu quando $X_R = 0,11 \pm 0,003$ e o teor de umidade médio das amostras era $1,78 \pm 0,07$ (b.s.). Esta mudança no período de taxa decrescente também foi observada para a demais condições e foi denominada como o segundo

teor de umidade crítico parametrizado (X^*). Para evidenciar tal mudança nas taxas, foi acrescentada uma linha para ligar os pontos monitorados no período de taxa decrescente.

Analisando o perfil de temperatura do ensaio (Figura 4.2) é possível perceber a relação entre a temperatura aparente do lodo (T_{ap}) e as curvas de secagem. Nota-se que, nos 90 min iniciais de secagem (período de adaptação) houve um período aumento de T_{ap} .

A partir deste instante, tanto a temperatura aparente do lodo (T_{ap}), quanto as taxas de secagem permaneceram constantes até aproximadamente 390 min de secagem. Neste momento, a T_{ap} apresentou um rápido aumento, até atingir a temperatura do ar de entrada (T_e) (80 °C) e permanecer constante até o final da secagem (período de taxa decrescente).

Este mesmo comportamento foi observado para os demais ensaios realizados sob temperatura de 80 °C (ensaios 3 e 4, com $Q_{ar}=0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ e ensaios 5 e 6, com $Q_{ar} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$), como apresentado nas Figuras B.1 a B.6 (Apêndice B).

Kowalski et al. (2007) e Turker et al. (2006) também obtiveram em seus estudos temperaturas constantes do material durante o período de taxa de secagem constante. Porém, Bennamoun et al. (2014) obtiveram resultados diferentes na secagem do lodo. O perfil de temperatura apresentou três períodos diferentes: o primeiro, um curto período de aumento de temperatura; o segundo, um período de contínuo aumento de temperatura em que a energia é utilizada para a evaporação de água e também para o aumento de temperatura; período final, a energia fornecida é quase que exclusivamente utilizada para o aumento de temperatura, até que é atingida a temperatura do ar de aquecimento. O período inicial de aumento de T_{ap} é semelhante ao comportamento relatado por Bennamoun et al. (2014).

Como relatado por Park et al. (2007), no período de taxa constante de secagem, a transferência de massa e de calor são equivalentes e, portanto, a velocidade de secagem é constante, assim como a temperatura do material.

No período de taxas decrescentes, a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa. Nesta etapa da secagem, o fluxo de calor absorvido pelo sólido é utilizado para a evaporação da água na superfície e para o aumento da temperatura do sólido (PARK et al., 2007). Neste período da secagem observou-se que a torta começava a apresentar um enrijecimento da camada superficial e, posteriormente, apareceram fissuras e quebras na torta, além do início da redução do volume. As amostras atingiram o equilíbrio após 810 e 800 min de operação.

Este fenômeno de quebra ou fissura da torta durante a secagem de lodos foi observado por diversos autores (LI et al, 2015a; LI et al, 2015b; BENNAMOUN et al., 2014; BENNAMOUN et al., 2013c; HSU et al., 2010; TAO et al., 2005; LEONARD et al., 2004a;

LEONARD et al., 2004b; FOUST et al., 1982; STRUMILLO e KUDRA, 1986), os quais afirmaram que, em virtude da água presente fazer parte da sua estrutura, os mesmos são afetados pela remoção da umidade. As camadas superficiais tendem a secar mais rapidamente do que no seu interior, e quando a taxa de secagem decresce, é possível que se estabeleçam diferenças significativas no teor de umidade no interior da amostra, provocando fissuras ou deformação (encolhimento). Ou ainda, é possível que se forme um revestimento relativamente impermeável de material parcialmente seco inibindo o prosseguimento da secagem no interior do sólido. Para um estudo mais aprofundado sobre os fenômenos de encolhimento e endurecimento da camada superficial foi realizada uma etapa experimental de secagem do lodo somente no período decrescente (item 4.6).

As Figuras 4.5 a 4.7 mostram o perfil de temperatura, a cinética de secagem e taxa de secagem referentes aos ensaios de condição média do Planejamento, com temperatura de 110 °C e vazão mássica do ar de 0,4 kg.min⁻¹. No ensaio de secagem verificou-se por meio das taxas de secagem que houve um período inicial de aquecimento do material, representado nas Figuras 4.6 e 4.7 pelos losangos. Este período se iniciou quando o material se encontrava com teor de umidade de 12,2 ± 0,00 (b.s.) e durou 35 min, até que as amostras atingissem um conteúdo de umidade de 10,5 ± 0,02 (b.s.).

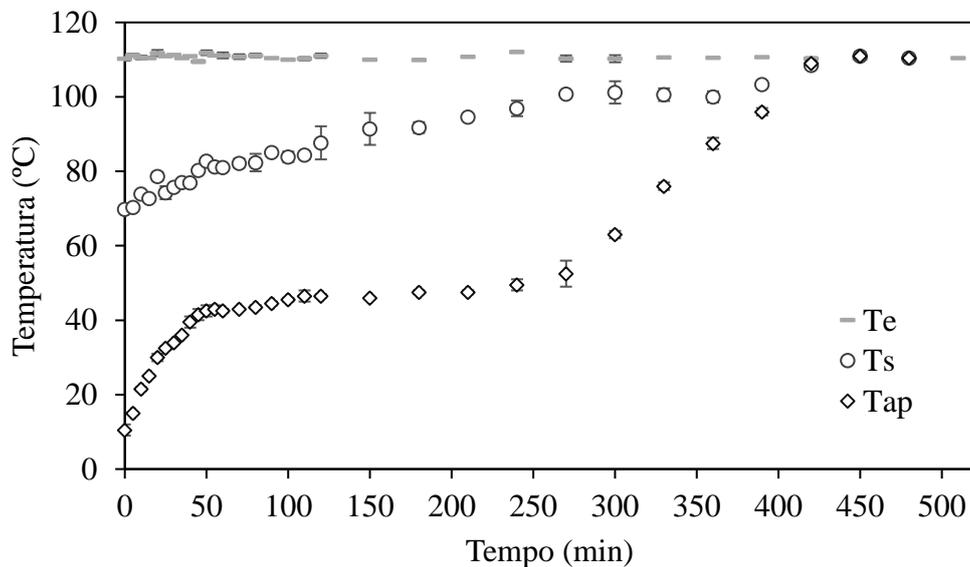


Figura 4.5. Perfil de temperatura dos ensaios 9 e 10 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

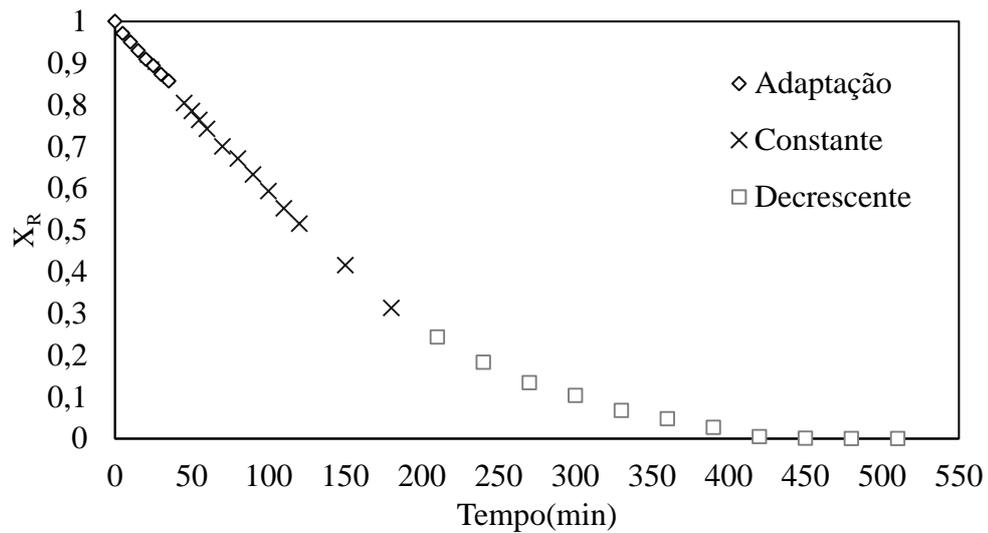


Figura 4.6. Cinética de secagem relativa aos ensaios 9 e 10 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

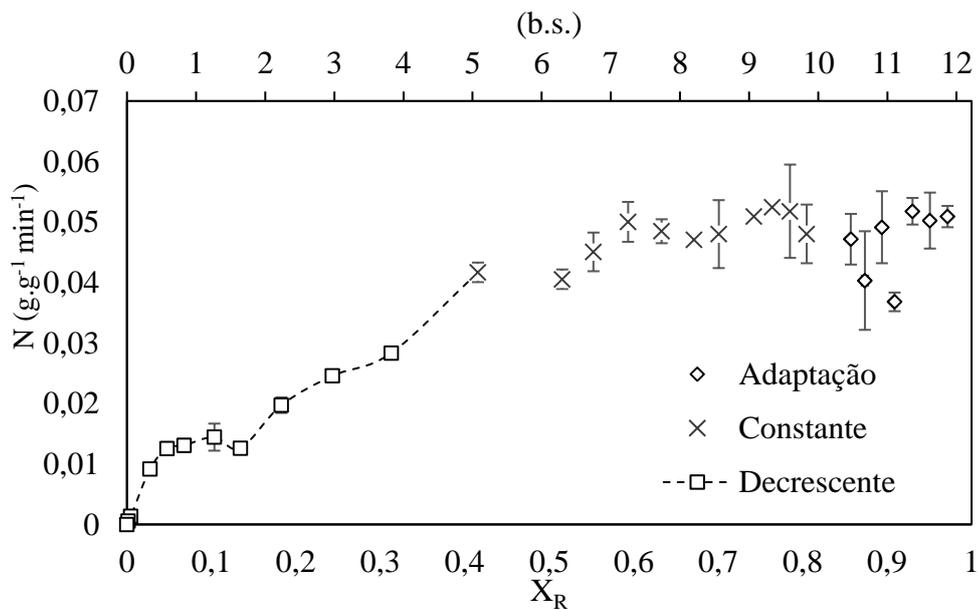


Figura 4.7. Taxa de secagem relativa aos ensaios 9 e 10 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

Em seguida, iniciou-se o período à taxa constante (marcadores em \times), que durou até a amostra atingir o teor de umidade crítico (X_C) de $5,09 \pm 0,02$ (b.s.), aos 180 min de secagem. A partir deste momento, iniciou-se o período de taxa decrescente (marcadores quadrados).

O período de secagem decrescente apresentou comportamento semelhante ao obtido nos ensaios 1 e 2, já descritos anteriormente, em que a torta apresentou um enrijecimento da camada superficial e, posteriormente, apareceram fissuras e quebras na torta, além do início da redução do volume. Além disso, no período de taxa decrescente de secagem, a curva também apresentou

uma mudança de comportamento, quando o teor de umidade médio da amostra era de $1,66 \pm 0,05$ (b.s.) e $X_R=0,13$. Os ensaios de secagem para essas condições duraram 480 e 470 min, respectivamente.

Relacionando o perfil de temperatura (Figura 4.5) com as curvas de secagem (Figuras 4.6 e 4.7) nota-se que novamente durante o período de adaptação das taxas, a temperatura aparente do lodo (T_{ap}) apresenta um rápido aumento. Depois, ambas permanecem constantes por um período. Porém, neste caso, T_{ap} permanece estável por um tempo maior, mesmo quando se inicia o período decrescente, e só volta a aumentar aos 280 minutos de secagem, quando atinge a temperatura do ar de entrada (T_e) (110 °C).

Desta maneira, diferentemente do que foi observado na condição mais branda, os períodos de taxa constante e T_{ap} constantes não se mostraram totalmente relacionados. O mesmo foi observado para a condição de temperatura de 110 °C e vazão mássica de $0,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ (ensaios 7 e 8), nas Figuras B.7 a B.9, no Apêndice B.

As Figuras 4.8 a 4.10 mostram o perfil de temperatura, a cinética de secagem e taxa de secagem referentes aos ensaios para a condição de maior temperatura (140°C) e vazão mássica do ar de ($0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

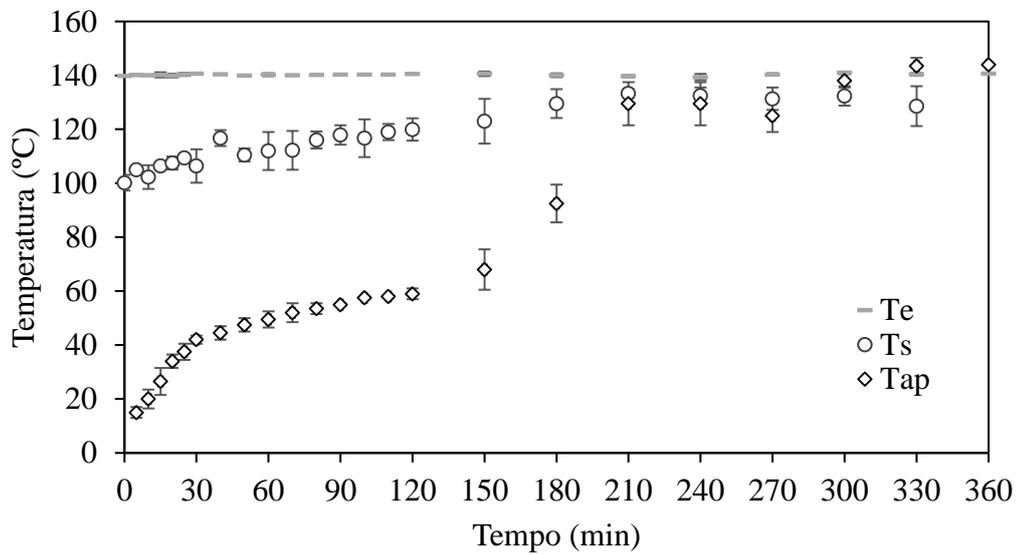


Figura 4.8. Perfil de temperatura dos ensaios ($T=140 \text{ °C}$ e $Q_{ar} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

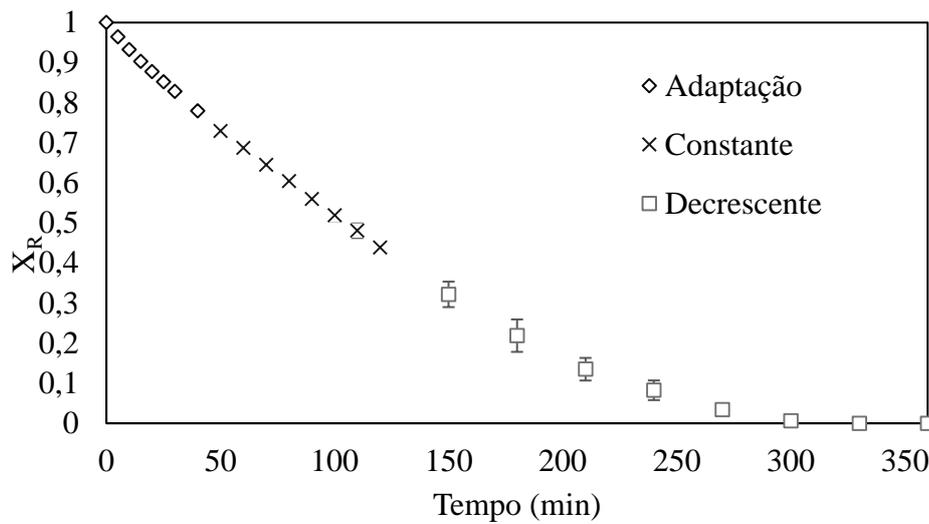


Figura 4.9. Cinética de secagem relativa aos ensaios ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

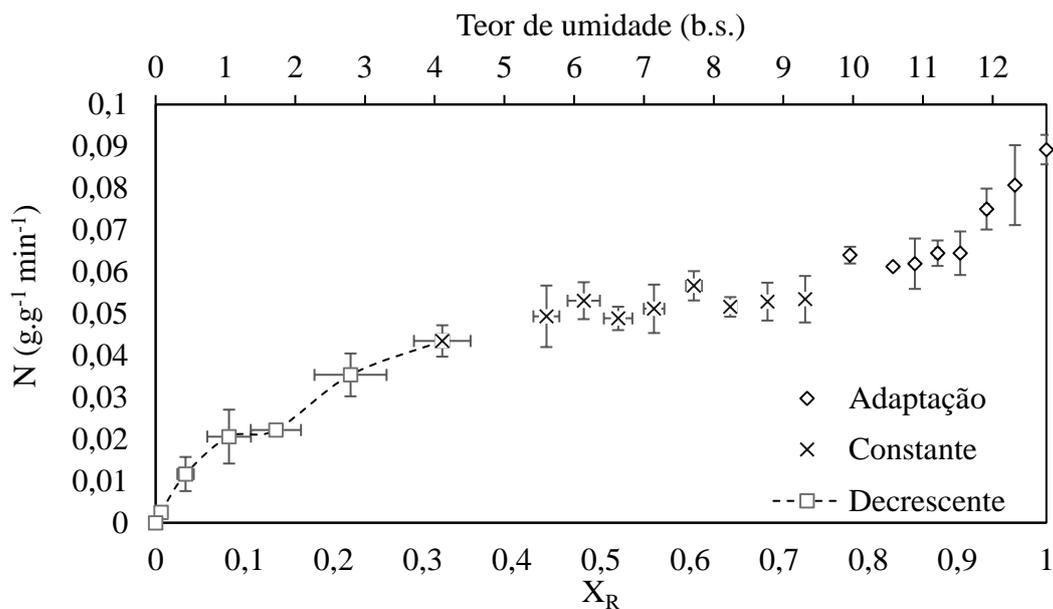


Figura 4.10. Taxa de secagem relativa aos ensaios ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

No início da secagem, o teor de umidade médio do lodo era de $12,7 \pm 0,02$ (b.s.). O período de adaptação das taxas de secagem (losangos), em que T_{ap} aumenta, durou 40 min, até as amostras atingirem um teor de umidade médio de $9,98 \pm 0,00$ (b.s.).

A partir deste momento as taxas permanecem constantes por 80 min (marcadores em \times). Após a amostra atingir o teor de umidade crítico (X_C) de $4,18 \pm 0,39$ (b.s.), as taxas passam a decrescer até atingir o equilíbrio, após 330 e 320 min de secagem. Durante o período de taxa decrescente observou-se a formação de uma camada superficial enrijecida e o encolhimento a

torta e novamente uma mudança de comportamento quando o teor de umidade médio das amostras era de $1,81 \pm 0,36$ (b.s.).

Analisando o perfil de temperatura (Figura 4.8), nota-se que o comportamento da temperatura aparente do lodo novamente apresenta o comportamento descrito por Kowalski et al. (2007) e Turker et al. (2006) em seus trabalhos. Ou seja, durante o período em que as taxas de secagem permaneceram constante, a temperatura aparente do lodo também foi praticamente constante, apresentando um sutil aumento. Este comportamento foi observado para as demais condições sob temperatura de 140 °C.

Cabe ressaltar que todas as amostras de lodo após os ensaios de secagem convectiva apresentaram teores de umidade entre 3 e 5 %, como apresentado no item 4.1.1.

Apesar das diferentes condições de secagem, que proporcionaram diferentes tempos de operação, foram observadas semelhanças no comportamento das amostras.

Nos pontos de início de secagem e transição dos períodos, os teores de umidade foram muito próximos em todos os ensaios. Isto pode ser confirmado observando-se a Tabela 4.6, na qual são especificados os valores dos teores de umidade (b.s.) no início da secagem (X_0), no ponto de transição do período de adaptação para o período de taxas constante (X_A) e o ponto crítico (X_C). O ponto de inflexão em que notou-se mudança de comportamento nas taxas decrescentes, ou seja, o teor de umidade que distinguiu o primeiro e segundo períodos de taxa decrescente, é designado por X^* .

Tabela 4.6. Teores de umidade das amostras nos pontos de início da secagem e transição dos períodos.

Ensaio	X_0	X_A	X_C	X^*
1 e 2 (80°C - 0,3 kg.min ⁻¹)	$14,0 \pm 0,15$	$10,5 \pm 0,11$	$4,13 \pm 0,07$	$1,78 \pm 0,07$
3 e 4 (80°C - 0,4 kg.min ⁻¹)	$13,38 \pm 0,34$	$10,0 \pm 0,11$	$4,54 \pm 0,33$	$1,41 \pm 0,07$
5 e 6 (80°C - 0,5 kg.min ⁻¹)	$12,31 \pm 0,02$	$9,02 \pm 0,24$	$5,45 \pm 0,64$	$2,15 \pm 0,64$
7 e 8 (110°C - 0,3 kg.min ⁻¹)	$14,68 \pm 0,00$	$9,57 \pm 0,00$	$4,51 \pm 0,64$	$2,78 \pm 0,05$
9 e 10 (110°C - 0,4 kg.min ⁻¹)	$12,2 \pm 0,00$	$10,5 \pm 0,02$	$5,09 \pm 0,02$	$1,66 \pm 0,05$
11 e 12 (110°C - 0,5 kg.min ⁻¹)	$13,19 \pm 0,36$	$10,14 \pm 0,19$	$4,49 \pm 0,12$	$1,72 \pm 0,36$
13 e 14 (140°C - 0,3 kg.min ⁻¹)	$13,41 \pm 0,00$	$9,90 \pm 0,08$	$4,24 \pm 0,15$	$2,39 \pm 0,15$
15 e 16 (140°C - 0,4 kg.min ⁻¹)	$12,9 \pm 0,02$	$8,88 \pm 0,11$	$4,39 \pm 0,01$	$1,63 \pm 0,15$
17 e 18 (140°C - 0,5 kg.min ⁻¹)	$12,7 \pm 0,02$	$9,98 \pm 0,00$	$4,18 \pm 0,39$	$1,81 \pm 0,36$

X_0 : teor de umidade inicial (b.s.); X_A : teor de umidade no final da fase de adaptação e início do período de taxas constantes (b.s.); X_C : teor de umidade crítico (b.s.); X^* : segundo teor de umidade crítico parametrizado (b.s.).

Zhang et al. (2016), Serenoti et al. (2010), Bennamoun et al. (2014) e Léonard et al. (2010), estudando a secagem do lodo de esgoto municipal obtiveram curvas com dois períodos de taxas decrescentes. A partir destes resultados, propõe-se a hipótese de que este ponto de inflexão, X^* , pode representar o segundo teor de umidade crítico da curva, que ocorre ao final do primeiro período de taxa decrescente, marcando o início do segundo período de taxa decrescente. O valor de X^* do lodo estudado encontra-se em uma faixa entre 1,41 e 2,78 (b.s.).

No estudo do encolhimento do lodo (fenômeno que reconhecidamente ocorre na etapa em que as taxas de secagem são decrescentes) no item 4.6, foi avaliado somente o período decrescente da curva de secagem. Dessa maneira, foi possível analisar com mais clareza esta etapa. Ao longo da apresentação e discussão dos próximos resultados será possível avaliar as demais informações que confirmem esta hipótese.

4.2.1 Influência da temperatura e da vazão mássica do ar na cinética de secagem

É evidente, por meio da análise das curvas e taxas de secagem do lodo que a temperatura e vazão mássica do ar influenciam na cinética de secagem do lodo. As taxas iniciais de secagem triplicam quando se comparam as condições mínimas e máximas do processo, sendo $0,3 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ para $T=80^\circ\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ (ensaios 1 e 2) e $0,9 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ para $T=140^\circ\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$, (ensaios 17 e 18) e aproximadamente $0,5 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ para a condição média (ensaios 9 e 10).

A influência da temperatura foi expressiva no tempo de secagem, pois quanto maior a temperatura das condições aplicadas, menor foi o tempo de secagem obtido. Este comportamento ocorreu em todas as condições estudadas. Por meio das Figuras 4.11 e 4.12 é possível avaliar a influência da temperatura sobre as curvas de secagem e taxas de secagem para a mesma vazão mássica de ar aplicada. A Figura 4.11 mostra a influência da temperatura para a vazão mássica de ar de $0,3 \text{ kg min}^{-1}$, comparando os ensaios 1 e 2 ($T=80^\circ\text{C}$), 7 e 8 ($T=110^\circ\text{C}$) e 13 e 14 ($T=140^\circ\text{C}$). A Figura 4.12 mostra a influência da temperatura para vazão mássica de ar de $0,5 \text{ kg min}^{-1}$, comparando os ensaios 5 e 6 ($T=80^\circ\text{C}$), 11 e 12 ($T=110^\circ\text{C}$) e 17 e 18 ($T=140^\circ\text{C}$).

Por meio das Figuras 4.11 e 4.12 pode-se observar que, de maneira geral, a influência da temperatura é mais pronunciada para as temperaturas mais baixas (80 e 110°C), independentemente das vazões aplicadas. Ou seja, quando se comparam as condições de 80 e 110°C , nota-se que as taxas de secagem aumentam expressivamente, praticamente dobrando

no início da secagem e ocorrendo uma maior variação do teor de umidade do lodo. Porém, o efeito de temperatura não é tão perceptível quando se comparam as condições de 110 e 140 °C.

Bennamoun et al. (2014) estudando a secagem do lodo de esgoto municipal sob as temperaturas de 80, 140 e 200 °C obtiveram resultados semelhantes. Os autores observaram que o aumento da temperatura de 80 para 140 °C aumentou significativamente as taxas de secagem, porém quando a temperatura foi aumentada para 200 °C não causou efeito no fluxo de secagem.

Mayor e Sereno (2004) observaram que, se forem utilizadas condições que proporcionem altas velocidades de secagem e gradientes de umidade intensos através do material, o baixo teor de umidade da superfície externa pode induzir uma transição de borracha-vidro e a formação de uma crosta rígida externa porosa. Esta casca superficial pode dificultar o transporte de umidade até a superfície, diminuindo a velocidade de secagem.

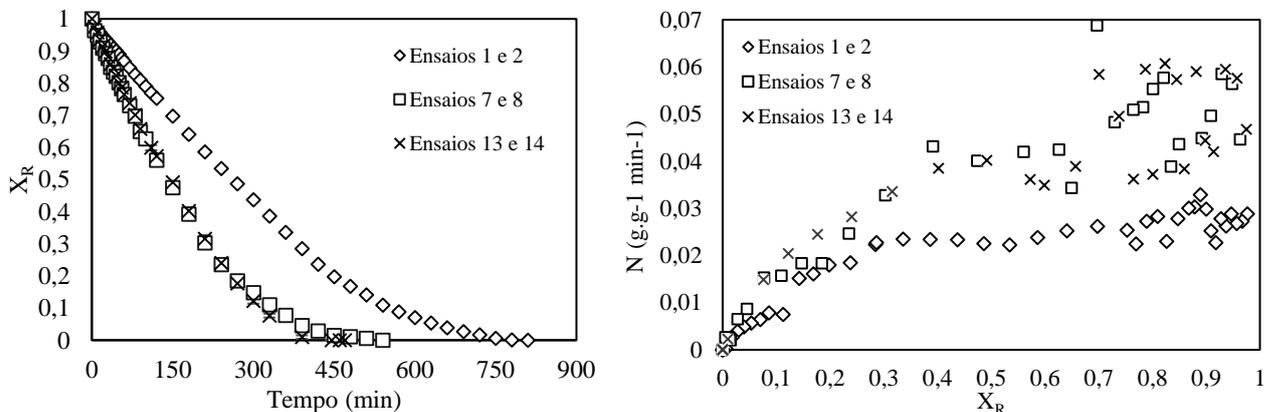


Figura 4.11. Curvas de secagem e taxas de secagem dos ensaios 1 e 2 ($T=80$ °C e $Q_{ar}=0,3$ kg min^{-1}), 7 e 8 ($T=110$ °C e $Q_{ar}=0,3$ kg min^{-1}) e 13 e 14 ($T=140$ °C e $Q_{ar}=0,3$ kg min^{-1}).

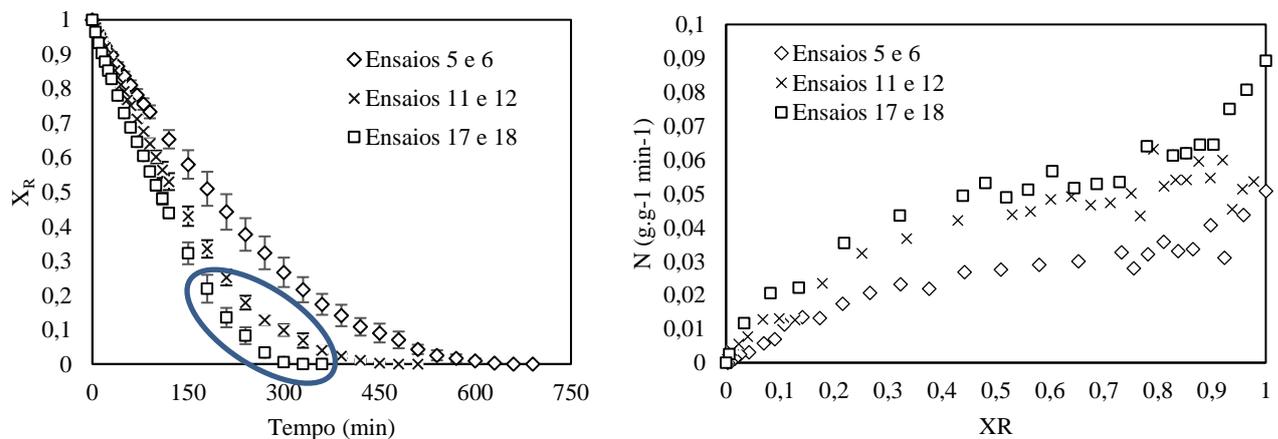


Figura 4.12. Curvas de secagem e taxas de secagem dos ensaios 5 e 6 ($T=80$ °C e $Q_{ar}=0,5$ kg min^{-1}), 11 e 12 ($T=110$ °C e $Q_{ar}=0,5$ kg min^{-1}) e 17 e 18 ($T=140$ °C e $Q_{ar}=0,5$ kg min^{-1}).

Observa-se que este comportamento é mais evidente para a vazão menor. Isto porque, no início, o processo pode ser limitado pela difusão externa (camada limite) Para a vazão maior, a camada limite diminui, pois a convecção forçada auxilia na transferência de massa.

Além disso, observa-se nas Figuras 4.11 e 4.12 que sob condições mais severas de temperatura (ensaios 7 e 8, 11 e 12, 13 e 14, 17 e 18) o período de taxa decrescente é maior, sendo assim, na operação predomina o transporte de massa por meio do mecanismo da difusão. Neste período as taxas são dependentes das características internas do material (BENNAMOUN et al., 2013; TAMER et al., 2016), apresentando menor dependência das condições do processo.

Influência da vazão mássica (Q_{ar}):

A vazão mássica também contribui para a diminuição do tempo de secagem. Entretanto, a sua influência foi mais sutil do que da temperatura, assim como relatado por Leonard et al. (2002; 2005a)

Por meio das Figuras 4.13 e 4.14 é possível avaliar a influência da vazão sobre as curvas de secagem e taxas de secagem. A Figura 4.13 mostra a influência da vazão mássica de ar para a temperatura de 80 °C, comparando os ensaios 1 e 2 ($Q_{ar}=0,3 \text{ kg min}^{-1}$), 3 e 4 ($Q_{ar}=0,4 \text{ kg min}^{-1}$) e 5 e 6 ($Q_{ar}=0,5 \text{ kg min}^{-1}$). A Figura 4.14 mostra a influência vazão mássica de ar para a temperatura de 140 °C, comparando os ensaios dos ensaios 13 e 14 ($Q_{ar}=0,3 \text{ kg min}^{-1}$), 15 e 16 ($Q_{ar}=0,4 \text{ kg min}^{-1}$) e 17 e 18 ($Q_{ar}=0,5 \text{ kg min}^{-1}$).

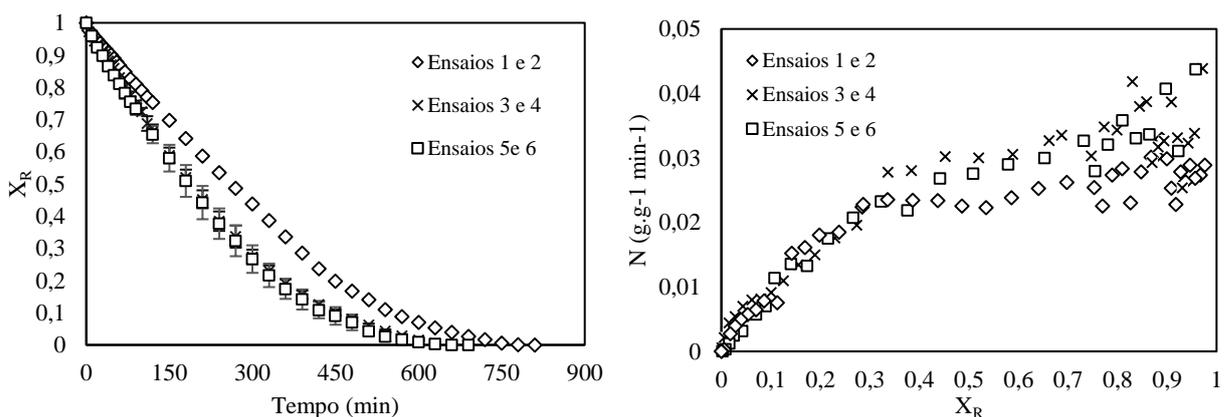


Figura 4.13. Curvas de secagem e taxas de secagem dos ensaios 1 e 2 ($T=80 \text{ °C}$ e $Q_{ar}=0,3 \text{ kg min}^{-1}$), 3 e 4 ($T=80 \text{ °C}$ e $Q_{ar}=0,4 \text{ kg min}^{-1}$) e 5 e 6 ($T=80 \text{ °C}$ e $Q_{ar}=0,5 \text{ kg min}^{-1}$)

O efeito da vazão também foi mais pronunciado para condições mais brandas dessa variável. Ou seja, comparando-se as vazões de $0,3 \text{ kg min}^{-1}$ e $0,4 \text{ kg min}^{-1}$ nota-se que a variação

da umidade e taxas de secagem aumentaram. Porém, quando se aumenta para $0,5 \text{ kg min}^{-1}$, praticamente não houveram mudanças de comportamento, principalmente para a temperatura de $140 \text{ }^\circ\text{C}$.

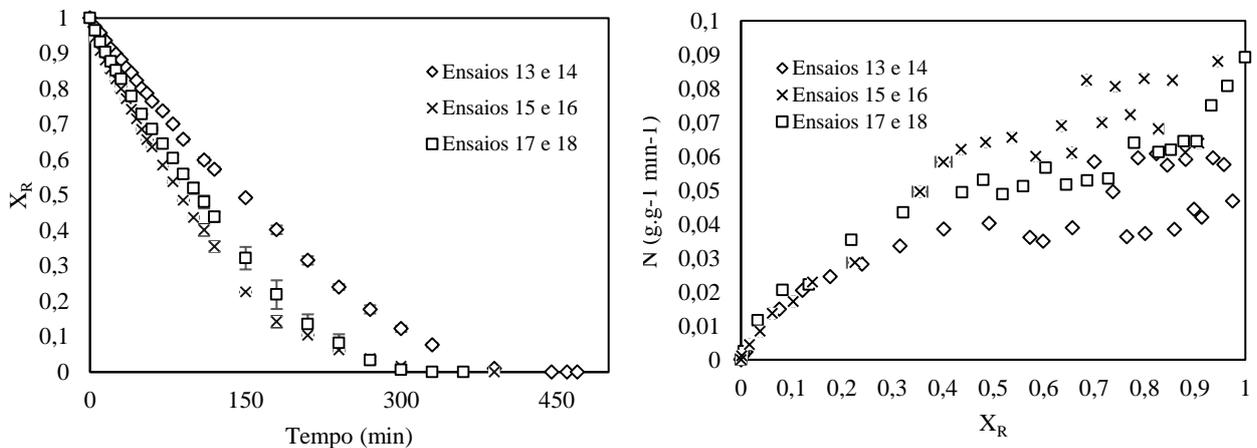


Figura 4.14. Curvas de secagem e taxas de secagem dos ensaios 13 e 14 ($T=140 \text{ }^\circ\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,3 \text{ kg min}^{-1}$), 15 e 16 ($T=140 \text{ }^\circ\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,4 \text{ kg min}^{-1}$) e 17 e 18 ($T=140 \text{ }^\circ\text{C}$ e $Q_{\text{ar}}=0,5 \text{ kg min}^{-1}$)

4.3 Análise Estatística do Planejamento Experimental

A partir do planejamento experimental proposto, foi definido como variável resposta o tempo de secagem necessário para que a amostra atingisse o equilíbrio. A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos para os ensaios.

Tabela 4.7. Tempo de equilíbrio das amostras nos ensaios, de acordo com o Planejamento Experimental proposto.

T_{ar} ($^\circ\text{C}$)	Q_{ar} ($\text{kg}.\text{min}^{-1}$)	Ensaio	t (min)	Ensaio	t (min)
80	0,3	1	810	2	800
80	0,4	3	690	4	660
80	0,5	5	630	6	690
110	0,3	7	540	8	550
110	0,4	9	480	10	470
110	0,5	11	480	12	510
140	0,3	13	450	14	460
140	0,4	15	360	16	350
140	0,5	17	330	18	320

Utilizando-se o Software Statistica 7.0, após a determinação dos tempos de secagem foi realizado um estudo do Planejamento Experimental 3^2 em duplicata, para uma confiabilidade de 95 %, em que foi possível avaliar a influência das variáveis temperatura do ar de entrada (T) e vazão mássica do ar de entrada (Q_{ar}) e sua interação sobre a variável resposta: o tempo de secagem (t).

A Figura 4.15 mostra a significância estatística dos efeitos individuais e interações das variáveis independentes por meio do Diagrama de Pareto. Na Figura 4.15, percebe-se que tanto a temperatura quanto a vazão são estatisticamente significativos, com um limite de confiança de 95 %. Entretanto, o efeito de maior influência é o termo linear da temperatura. Os efeitos são negativos porque aumentando-se qualquer uma das variáveis, ocorre uma diminuição da variável resposta (tempo de secagem). O efeito da interação entre as duas variáveis não se mostrou significativo.

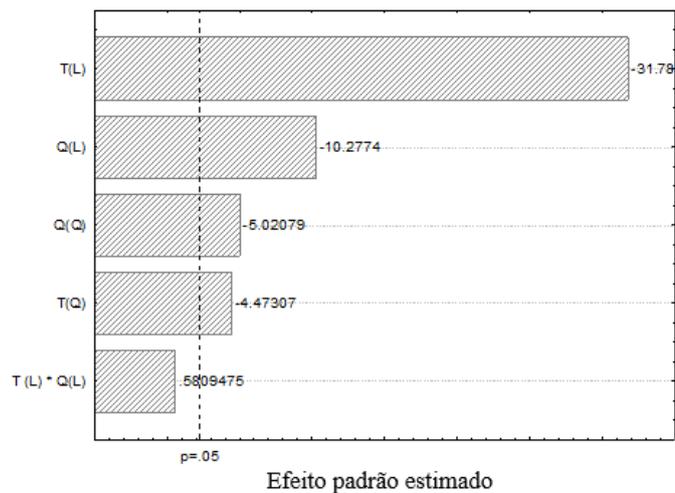


Figura 4.15. Diagrama de Pareto para os ensaios de secagem.

As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam os resultados obtidos da análise dos coeficientes de regressão do modelo matemático empírico codificado, com base no erro puro. O modelo estatístico obtido para o tempo de secagem, apenas com os termos estatisticamente significativos, é mostrado pela Equação 4.1. A Tabela 4.10 apresenta os valores obtidos para o teste-F para verificar se o modelo é válido.

Tabela 4.8. Coeficientes de regressão para a variável resposta.

Variáveis significativas	Coefficiente	Desvio padrão	p	- 95%	+ 95%
Média	532,222	4,303315	0,000000	522,487	541,957
T (L)	-167,500	5,270463	0,000000	-179,423	-155,577
T (Q)	-20,417	4,564355	0,001548	-30,742	-10,091
Q (L)	-54,167	5,270463	0,000003	-66,089	-42,244
Q (Q)	-22,917	4,564355	0,000718	-33,242	-12,591

R²= 0,97171

Tabela 4.9. Análise de variância para a variável resposta.

	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média Quadrática
Regressão	386955,6	4	96738,89
Resíduos	8555,6	13	658,1197
Falta de ajuste	5555,6	4	1388,889
Erro puro	3000,0	9	400
Total	395511,1	17	

R²=0,97837

$$t = 532,222 - 167,500 \cdot T - 20,417 \cdot T^2 - 54,167 \cdot Q - 22,917 \cdot Q^2 \quad (4.1)$$

Tabela 4.10. Valores para o teste F para a variável resposta.

	F_{calculado}	F_{tabelado}
Modelo	146,9929	3,18
Falta de ajuste	3,472222	3,63

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_{calculado} (quadrado do erro médio da regressão/quadrado do erro médio do resíduo) deve ser no mínimo quatro a cinco vezes o valor de F_{tabelado}, portanto, o modelo obtido é válido

no nível de significância de 95%, pois $F_{\text{calculado}}=46,22.F_{\text{tabelado}}$. O teste F também confirma que o modelo não apresenta falta de ajuste, pois não está na região crítica ($3,47 < 3,63$).

A Figura 4.16 representa a superfície de resposta obtida por meio do modelo matemático codificado. Pode-se observar a interação desses fatores e determinar o tempo ótimo de secagem em cada um deles, representado pela região verde, onde são encontradas as melhores condições de secagem. Dessa maneira, do ponto de vista de tempo de secagem, as regiões vermelhas nos gráficos representam as condições menos favoráveis à secagem e, conseqüentemente, que demoram mais para atingir o equilíbrio.

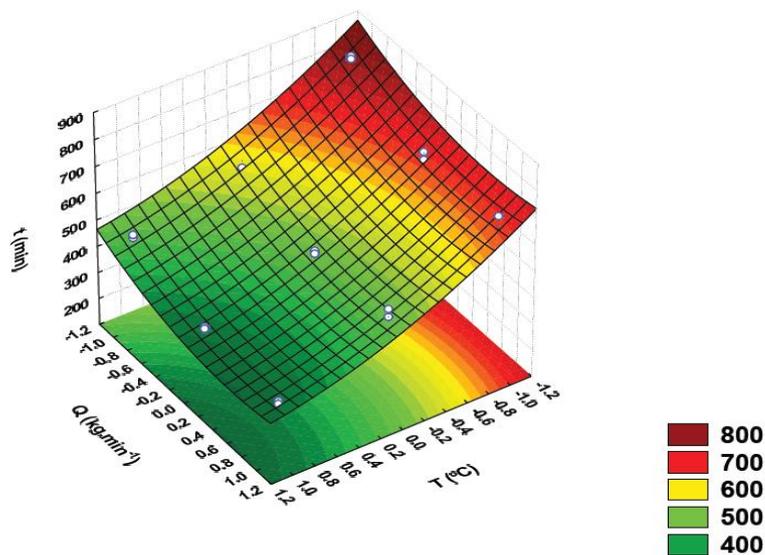


Figura 4.16. Superfície de resposta obtida a partir do modelo codificado baseado no erro puro.

A Figura 4.17 apresenta a relação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores preditos pelo modelo. Nota-se uma distribuição dos pontos normal e aleatória em torno da reta do modelo, logo, o teste F é aplicável. A Figura 4.18 relaciona os valores preditos e seus respectivos resíduos em função do modelo. Observa-se que não há uma distribuição tendenciosa dos resíduos.

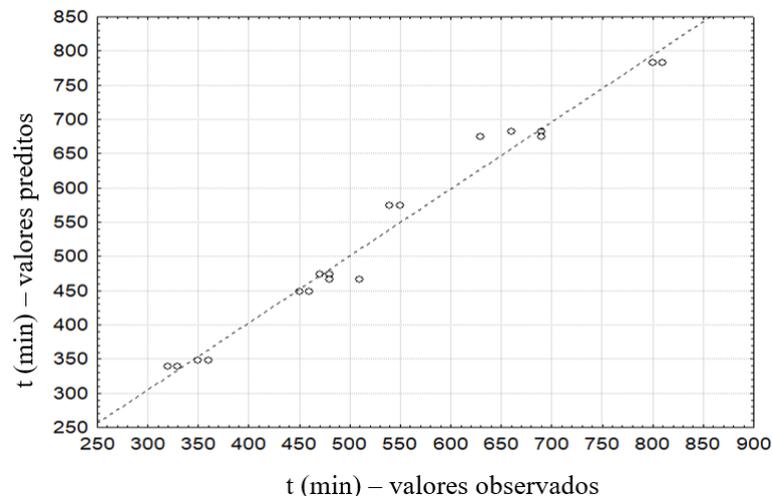


Figura 4.17. Valores preditos em função dos valores observados.

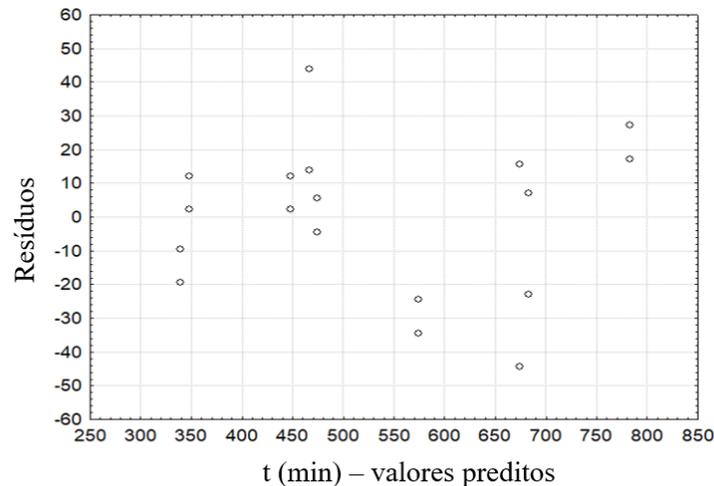


Figura 4.18. Distribuição dos resíduos em função do modelo.

4.4 Modelagem matemática da cinética de secagem

Para os ajustes aos dados experimentais nas diversas condições de secagem, foram testados os modelos de Lewis (1921), Page (1949), Henderson e Pabis (1921), Logarítmico (2003), Danish et al. (2016) e Crank (1975). Destes, os modelos que melhor se ajustaram aos dados, para todas as condições foram os modelos de Page (1949), Logarítmico (2003), Danish et al. (2016) e por esta razão só estes últimos são apresentados no trabalho.

Para cilindros de altura pequena em relação ao diâmetro, como as bandejas usadas no secador convectivo, pode-se aplicar o modelo baseado na solução analítica de Crank para placa plana (1975). Entretanto, o mesmo não representou bem os dados experimentais da secagem

convectiva. Este resultado é justificado pelo fato de que as condições do modelo não são atendidas na secagem do lodo, uma vez que o modelo assume difusividade efetiva constante, uniformidade da umidade em todo o material, e despreza o encolhimento do material.

A Tabela 4.11 mostra os valores dos coeficientes dos modelos, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2), erro quadrado médio (MSE) e Critério de Informação de Akaike (AIC) obtidos para os modelos. Os melhores ajustes foram determinados para os maiores valores de R^2 ajustado e menores valores dos demais critérios. Nota-se, pela Tabela 4.11, que os ajustes dos modelos apresentados foram satisfatórios. O AIC pode ser entendido como um critério que dá uma pontuação para o modelo, baseado em sua adequação aos dados e na ordem do modelo (AKAIKE, 1973). Este critério é uma medida da qualidade do ajuste do modelo estimado, fornecendo uma medida relativa da perda de informações quando um determinado modelo é usado para descrever dados experimentais, buscando minimizar esta perda. O modelo com o menor valor de AIC é considerado como a melhor escolha. Em todos os critérios avaliados, o modelo de Danish et al. (2016) foi o mais eficiente. As Figuras 4.19 a 4.21 mostram as curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as três condições ponto mínimo, médio e máximo do planejamento experimental.

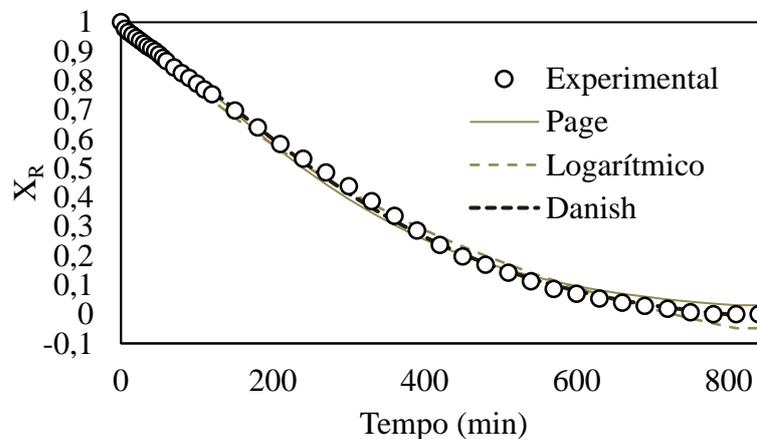


Figura 4.19. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as condições de temperaturas de 80 °C e vazão mássica do ar de 0,3 kg min⁻¹.

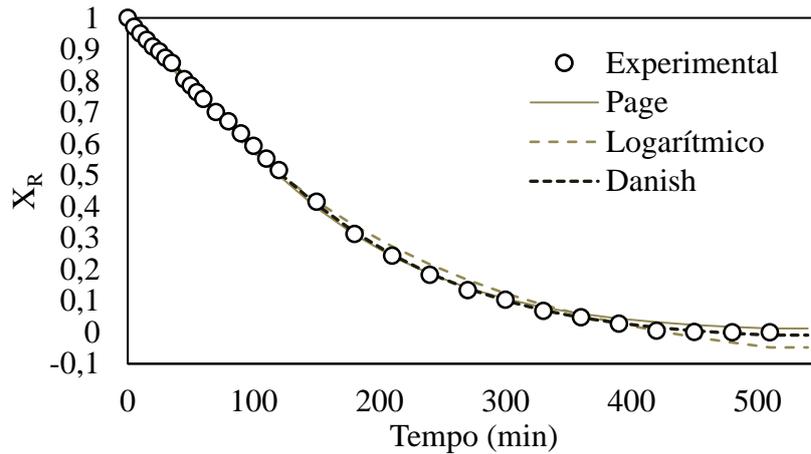


Figura 4.20. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as condições de temperaturas de 110 °C e vazão mássica do ar de 0,4 kg min⁻¹.

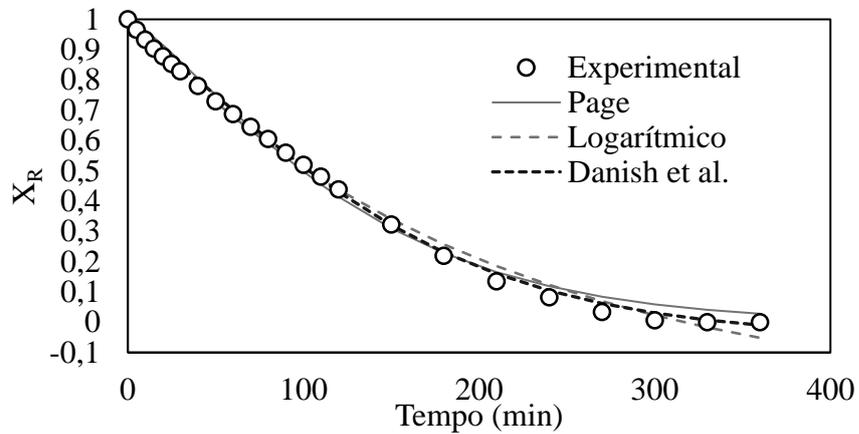


Figura 4.21. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as condições de temperaturas de 140 °C e vazão mássica do ar de 0,5 kg min⁻¹.

Apesar de a secagem do lodo ser predominantemente por difusão, sendo o secador convectivo direto, outros efeitos fluidodinâmicos podem também influenciar a secagem. Os parâmetros n e k do modelo de Page refletem o efeito das condições externas durante a secagem e a resistência interna à secagem, respectivamente (VIEIRA, 2006a).

Tabela 4.11. Parâmetros dos modelos matemáticas utilizados no ajuste dos dados.

Condição	Modelo	Coefficientes	R ²	χ ²	MSE	AIC
T=80 °C Q _{ar} =0,3 kg m ⁻¹	Page	k= 1,05 × 10 ⁻³ ± 4,33 × 10 ⁻⁵ n= 1,33 ± 2,25 × 10 ⁻²	0,9959 ± 2,4 × 10 ⁻²	7,31×10 ⁻⁴	6,97 × 10 ⁻⁴	-306,58
	Logarítmico	a=1,33 ± 2,40 × 10 ⁻² k=1,95 × 10 ⁻³ ± 7,24 × 10 ⁻⁵ c= - 3,22×10 ⁻¹ ± 2,61 × 10 ⁻²	0,9969 ± 2,08×10 ⁻²	4,50×10 ⁻⁴	4,18×10 ⁻⁴	-286,24
	Danish et al.	k=7,98×10 ⁻² ± 2,42 × 10 ⁻³ n=1,42 ± 1,36 × 10 ⁻² c=- 4,39×10 ⁻² ± 2,78 × 10 ⁻³	0,9987± 1,3 × 10 ⁻²	1,15×10 ⁻³	1,07×10 ⁻⁴	-326,52
T=80 °C Q _{ar} =0,4 kg m ⁻¹	Page	k= 1,02 × 10 ⁻³ ± 9,89 × 10 ⁻⁵ n= 1,26 ± 1,80 × 10 ⁻²	0,9983 ± 1,57 × 10 ⁻²	3,12×10 ⁻⁴	2,97 × 10 ⁻⁴	-318,92
	Logarítmico	a=1,16 ± 1,32 × 10 ⁻² k=3,29 × 10 ⁻³ ± 1,07 × 10 ⁻⁴ c=-1,40×10 ⁻¹ ± 1,50 × 10 ⁻²	0,9971 ± 2,03×10 ⁻²	4,27×10 ⁻⁴	3,95×10 ⁻⁴	-305,44
	Danish et al.	k=7,25×10 ⁻⁴ ± 5,87 × 10 ⁻⁵ n=1,30 ± 1,37 × 10 ⁻² c=-3,02×10 ⁻² ± 3,39 × 10 ⁻³	0,9984± 1,52 × 10 ⁻²	3,33×10 ⁻³	3,08×10 ⁻⁴	-315,36
T=80 °C Q _{ar} =0,5 kg m ⁻¹	Page	k= 1,05 × 10 ⁻³ ± 1,92 × 10 ⁻⁴ n= 1,25 ± 3,24 × 10 ⁻²	0,9969 ± 2,02 × 10 ⁻²	4,93×10 ⁻⁴	4,60 × 10 ⁻⁴	-224,53
	Logarítmico	a=1,17 ± 2,13 × 10 ⁻² k=3,32 × 10 ⁻³ ± 1,71 × 10 ⁻⁴ c=-1,57×10 ⁻¹ ± 2,45 × 10 ⁻²	0,9975 ± 1,78×10 ⁻²	3,30×10 ⁻⁴	2,97×10 ⁻⁴	-235,68
	Danish et al.	k=7,66×10 ⁻⁴ ± 1,31 × 10 ⁻⁴ n=1,29 ± 2,89 × 10 ⁻² c=-3,90×10 ⁻² ± 8,16 × 10 ⁻³	0,9991± 1,1 × 10 ⁻²	1,29×10 ⁻⁴	1,17×10 ⁻⁴	-263,71

Continuação da Tabela 4.11. Parâmetros dos modelos matemáticas utilizados no ajuste dos dados

Condição	Modelo	Coefficientes	R ²	χ ²	MSE	AIC
T=110 °C Q _{ar} =0,3 kg m ⁻¹	Page	k= 1,66 × 10 ⁻³ ± 1,33 × 10 ⁻⁴ n= 1,24 ± 1,58 × 10 ⁻²	0,9977 ± 1,75 × 10 ⁻²	3,59×10 ⁻⁴	3,37 × 10 ⁻⁴	-385,69
	Logarítmico	a=1,15 ± 1,13 × 10 ⁻² k=4,43 × 10 ⁻³ ± 1,27 × 10 ⁻⁴ c=-1,34×10 ⁻¹ ± 1,30 × 10 ⁻²	0,9970 ± 1,99×10 ⁻²	4,11×10 ⁻⁴	3,75×10 ⁻⁴	-380,10
	Danish et al.	k=1,22×10 ⁻³ ± 5,71 × 10 ⁻⁵ n=1,27 ± 8,38 × 10 ⁻² c=-3,22×10 ⁻² ± 2,31 × 10 ⁻³	0,9993± 9,4 × 10 ⁻³	9,35×10 ⁻⁵	8,52×10 ⁻⁵	-430,47
T=110 °C Q _{ar} =0,4 kg m ⁻¹	Page	k= 1,55 × 10 ⁻³ ± 1,03 × 10 ⁻⁴ n= 1,28 ± 1,35 × 10 ⁻²	0,9986 ± 1,36 × 10 ⁻²	2,20×10 ⁻⁴	2,06 × 10 ⁻⁴	-265,55
	Logarítmico	a=1,17 ± 1,29 × 10 ⁻² k=4,93 × 10 ⁻³ ± 1,54 × 10 ⁻⁴ c=-1,43×10 ⁻¹ ± 1,49 × 10 ⁻²	0,9965 ± 2,14×10 ⁻²	4,79×10 ⁻⁴	4,34×10 ⁻⁴	-239,73
	Danish et al.	k=2,55×10 ⁻¹ ± 3,24 × 10 ⁻³ n=1,30 ± 7,69 × 10 ⁻³ c=-2,47×10 ⁻² ± 2,04 × 10 ⁻³	0,9995 ± 7,64 × 10 ⁻³	6,11×10 ⁻⁴	5,54×10 ⁻⁴	-305,65
T=110 °C Q _{ar} =0,5 kg m ⁻¹	Page	k= 1,37 × 10 ⁻³ ± 1,87 × 10 ⁻⁴ n= 1,30 ± 2,75×10 ⁻²	0,9984 ± 1,47 × 10 ⁻²	2,62×10 ⁻⁴	2,46 × 10 ⁻⁴	-259,96
	Logarítmico	a=1,18 ± 2,04×10 ⁻² k=4,87 × 10 ⁻³ ± 2,42×10 ⁻² c=-1,44×10 ⁻¹ ± 2,34× 10 ⁻²	0,9960 ± 2,29×10 ⁻²	5,45×10 ⁻⁴	4,94×10 ⁻⁴	-235,64
	Danish et al.	k=1,08×10 ⁻³ ± 1,51×10 ⁻⁴ n=1,32 ± 2,61×10 ⁻⁴ c=-2,50×10 ⁻² ± 6,62×10 ⁻³	0,9993 ± 9,30×10 ⁻³	9,17×10 ⁻⁵	8,31×10 ⁻⁵	-292,66

Continuação da Tabela 4.11. Parâmetros dos modelos matemáticas utilizados no ajuste dos dados

Condição	Modelo	Coefficientes	R ²	χ^2	MSE	AIC
T=140 °C Q _{ar} =0,3 kg m ⁻¹	Page	k= $1,33 \times 10^{-3} \pm 1,65 \times 10^{-4}$ n= $1,28 \pm 2,46 \times 10^{-2}$	$0,9953 \pm 2,39 \times 10^{-2}$	$6,77 \times 10^{-4}$	$6,30 \times 10^{-4}$	-207,72
	Logarítmico	a= $1,27 \pm 2,17 \times 10^{-2}$ k= $3,76 \times 10^{-3} \pm 1,47 \times 10^{-4}$ c= $-2,54 \times 10^{-1} \pm 2,42 \times 10^{-2}$	$0,9970 \pm 1,92 \times 10^{-2}$	$3,83 \times 10^{-4}$	$3,43 \times 10^{-4}$	-223,33
	Danish et al,	k= $7,77 \times 10^{-2} \pm 8,17 \times 10^{-5}$ n= $1,35 \pm 1,88 \times 10^{-2}$ c= $-4,04 \times 10^{-2} \pm 4,49 \times 10^{-3}$	$0,998 \pm 1,55 \times 10^{-2}$	$2,69 \times 10^{-4}$	$2,41 \times 10^{-4}$	-233,54
T=140 °C Q _{ar} =0,4 kg m ⁻¹	Page	k= $1,66 \times 10^{-1} \pm 1,15 \times 10^{-4}$ n= $1,22 \pm 2,08 \times 10^{-2}$	$0,9972 \pm 1,81 \times 10^{-2}$	$4,19 \times 10^{-4}$	$3,89 \times 10^{-4}$	-178,55
	Logarítmico	a= $1,13 \pm 1,39 \times 10^{-2}$ k= $7,06 \times 10^{-3} \pm 2,38 \times 10^{-4}$ c= $-1,26 \times 10^{-1} \pm 1,58 \times 10^{-2}$	$0,9973 \pm 1,75 \times 10^{-2}$	$4,73 \times 10^{-4}$	$4,22 \times 10^{-4}$	-190,77
	Danish et al.	k= $2,53 \times 10^{-3} \pm 1,17 \times 10^{-4}$ n= $1,25 \pm 9,28 \times 10^{-3}$ c= $-2,95 \times 10^{-2} \pm 2,69 \times 10^{-3}$	$0,9987 \pm 1,3 \times 10^{-2}$	$1,64 \times 10^{-4}$	$1,46 \times 10^{-4}$	-202,02
T=140 °C Q _{ar} =0,5 kg m ⁻¹	Page	k= $1,83 \times 10^{-3} \pm 3,13 \times 10^{-4}$ n= $1,28 \pm 3,36 \times 10^{-2}$	$0,9948 \pm 2,47 \times 10^{-2}$	$9,02 \times 10^{-4}$	$8,26 \times 10^{-4}$	-164,36
	Logarítmico	a= $1,27 \pm 2,55 \times 10^{-2}$ k= $4,89 \times 10^{-3} \pm 2,16 \times 10^{-4}$ c= $-2,70 \times 10^{-1} \pm 2,83 \times 10^{-2}$	$0,9959 \pm 2,20 \times 10^{-2}$	$5,47 \times 10^{-4}$	$4,78 \times 10^{-4}$	-175,48
	Danish et al.	k= $1,13 \times 10^{-3} \pm 1,60 \times 10^{-4}$ n= $1,36 \pm 2,730 \times 10^{-2}$ c= $-4,61 \times 10^{-2} \pm 6,61 \times 10^{-3}$	$0,9977 \pm 1,63 \times 10^{-2}$	$3,55 \times 10^{-4}$	$3,10 \times 10^{-4}$	-185,86

O parâmetro k , que representa a constante da taxa de secagem, foi influenciado positivamente pela temperatura e vazão mássica do ar. Analisando os parâmetros do modelo de Page, verifica-se que a constante k foi maior nas amostras submetidas à secagem sob maiores temperaturas e vazões mássicas. Conforme verificado nas Figuras 4.22 e 4.23, para o ajuste do modelo de Page aos dados de secagem de lodo o parâmetro k é influenciado positivamente pela temperatura e vazão mássica do ar. O parâmetro n , foi influenciado apenas pela vazão mássica do ar e pela sua interação com a temperatura.

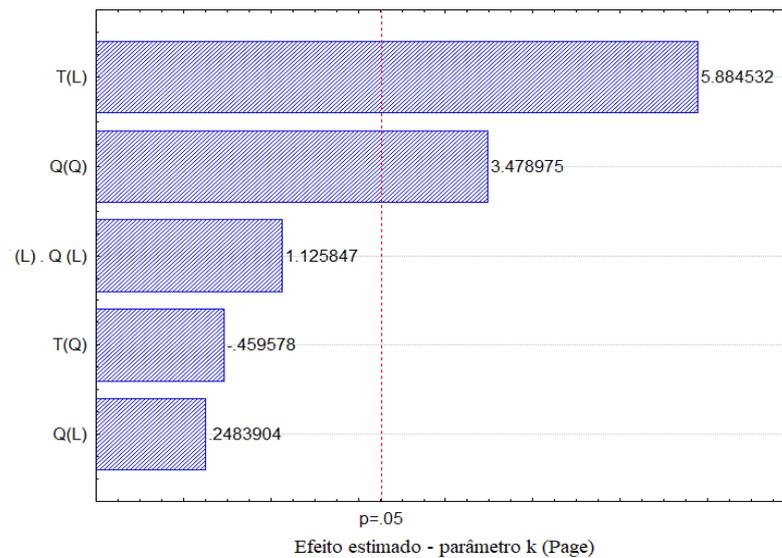


Figura 4.22. Diagrama de Pareto para o parâmetro k obtido pelo ajuste do modelo de Page.

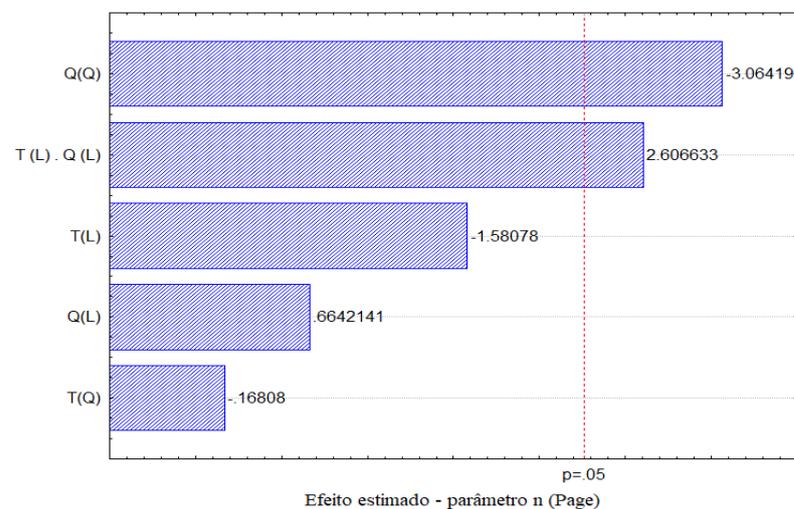


Figura 4.23. Diagrama de Pareto para o parâmetro n obtido pelo ajuste do modelo de Page.

Os modelos estatísticos obtidos para os parâmetros n e k do modelos de Page são representados, respectivamente, pelas Equação 4.2 e 4.3, considerando apenas os termos significativos.

$$k = 0,00155 + 0,001084 \cdot T + 0,000555 \cdot Q^2 \quad (4.2)$$

$$n = -0.034059 \cdot Q + 0.040974 \cdot T \cdot Q \quad (4.3)$$

4.5 Isotermas de dessorção

Devido às limitações de operação do equipamento (DVS), não foi possível realizar as isotermas sob as mesmas temperaturas utilizadas nos ensaios de secagem. Por esta razão, as isotermas foram realizadas nas temperaturas de 20, 35 e 50 °C, como mostra a Figura 4.24.

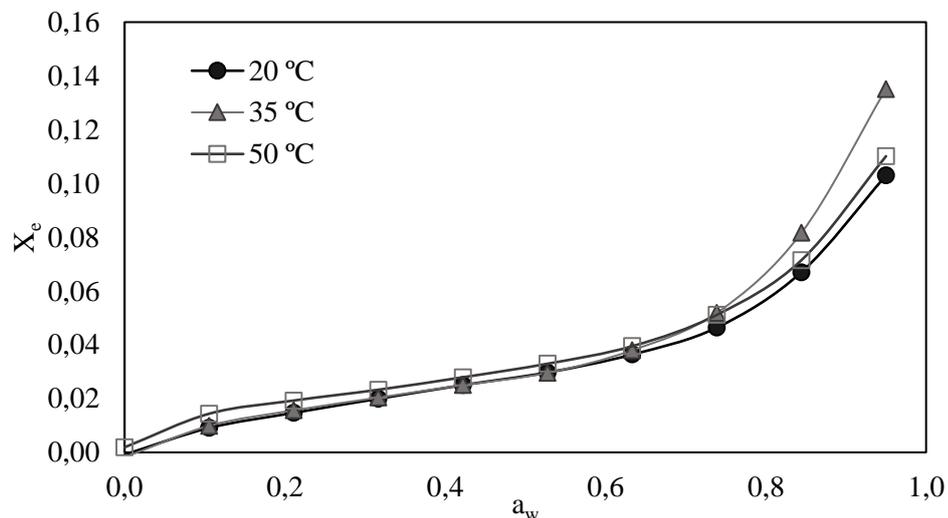


Figura 4.24. Isotermas de equilíbrio para as temperaturas de 20, 35 e 50 °C.

Analisando a Figura 4.24, pode-se classificar as isotermas obtidas como isotermas do Tipo II ou isoterma sigmoidal (ou forma de S), característica de formação de multicamadas de moléculas adsorvidas sobre a superfície do sólido.

As isotermas de sorção na forma sigmoidal, são características de sistemas com alto teor protéico, que se apresentam mais sensíveis à variação da umidade relativa (GONTARD; GUILBERT; CUQ, 1993). Este resultado é condizente com a composição do lodo, cujo teor de proteína é de $50,891 \pm 2,528$ % (b.s.).

Observa-se que para atividade da água, $a_w < 0,6$, a temperatura não influencia nos valores de umidade de equilíbrio, cujos valores são muito próximos para as três temperaturas, com um ligeiro aumento para a temperatura de 50 °C. Esta região de atividade da água é

referente à faixa em que a umidade se encontra ligada (LABUZA, 1968). Neste intervalo, umidade apresentou comportamento linear.

Na região de condensação capilar, em que a água encontra-se não ligada ($a_w > 0,6$), ocorreu um aumento exponencial do teor de umidade de equilíbrio com o aumento da atividade da água. Este aumento é mais significativo para a temperatura de 35 °C. O experimento foi repetido para a confirmação deste comportamento. Esta é uma característica de materiais amorfos ricos em componentes hidrofílicos.

Segundo Muzaffar e Kumar (2016), que estudou as isotermas de sorção da polpa de tamarindo, esse comportamento pode ser atribuído à natureza hidrofílica de carboidratos e proteínas presentes no material. Nas atividades de água baixa e intermediária ($a_w < 0,6$), a chamada região de sorção multicamada, o teor de umidade de equilíbrio aumenta linearmente com a atividade da água, enquanto que em altas atividades de água, a chamada região de condensação capilar, observa-se um aumento acentuado do teor de umidade de equilíbrio (YANG et al., 2012; GOULA et al., 2008).

Labuza et al. (1968) afirmam que valores de atividade de água menores do que 0,6 são suficientes para inibir o crescimento biológico e ainda manter as condições de umidade desejáveis no produto. A isoterma de adsorção mostra que o produto será estável microbiologicamente ($a_w < 0,6$), quando apresentar umidade inferior a 0,035 (b.s.). Desta forma o produto necessita de maiores cuidados quando armazenado em ambientes com umidade relativa superior a 60 %.

Quando se comparam as curvas de 35 e 50 °C na região de água não ligada, a um valor de atividade de água constante, o aumento de temperatura reduz o teor de umidade de equilíbrio. Esta é a tendência normal prevista pela teoria da adsorção física.

Palipane e Driscoll (1992) atribuem esse comportamento à diminuição do número total de sítios ativos para a ligação da água, resultante de transformações físicas e/ou químicas induzidas pela temperatura. Sob maiores temperaturas, as moléculas de água são ativadas para níveis de energia mais elevados, sua capacidade de ligação diminui, decrescendo assim o teor de umidade de equilíbrio.

Entretanto, quando se analisa a umidade de equilíbrio para a temperaturas de 20 °C nota-se uma inversão de comportamento, que pode ser justificada por alguma propriedade ou característica específica do material.

Fiorentin et al. (2010), no estudo do bagaço de laranja, também observaram este comportamento, em virtude da presença da casca de laranja no bagaço, cuja finalidade é a de

proteger e evitar a perda de umidade do interior do fruto para o ambiente sob condições ambientais de baixa umidade.

Molina-Filho et al. (2006) e Labuza (1994) afirmam que fatores como crescimento microbiano e/ou a presença de solutos dissolvidos, como sais e açúcares podem afetar as características de sorção dos materiais. No presente estudo não foi observado o crescimento microbiano e, portanto, o comportamento é atribuído a solutos presentes no lodo.

Assim que a temperatura sobe há um aumento na dissolução dos mesmos. Então, mais água é absorvida pelo o material (LABUZA, 1994), aumentando sua umidade de equilíbrio. Dessa maneira, o que pode justificar o comportamento das curvas é que, para as temperaturas de 35 e 50 °C, ocorre dissolução de solutos presentes no lodo, que aumentam o teor de umidade, o que não é observado à temperatura de 20 °C.

A Tabela 4.12 mostra os parâmetros obtidos para os modelos, o coeficiente de determinação e o erro quadrado médio (MSE). Foram utilizados para os ajustes os modelos de Smith, Henderson modificado, Henderson-Thompson e Oswin modificado. Nestes modelos, a temperatura é uma variável, então os parâmetros são os mesmos para todas as temperaturas. Esse tipo de ajuste é vantajoso pois diminui o número de parâmetros e viabiliza a modelagem em temperaturas diferentes das experimentais. A Figuras 4.25 a 4.27 apresentam os ajustes dos modelos Smith e Oswin modificado às isotermas de dessecção a 20, 35 e 50 °C.

Tabela 4.12. Parâmetros dos os modelos dependentes de temperatura ajustados para as isotermas.

	Smith	Henderson Modificado	Henderson- Thompson	Oswin modificado
a	$-5,04 \times 10^{-4}$	$9,56 \times 10^{-5}$	$-7,86 \times 10^{-2}$	$4,36 \times 10^{-2}$
b	$-1,38 \times 10^{-4}$	$3,41 \times 10^5$	$3,55 \times 10^{-1}$	$1,16 \times 10^{-5}$
c	$3,67 \times 10^{-2}$	1,10	1,10	$3,13 \times 10^{-1}$
R ²	0,9718	0,9653	0,9671	0,9678
MSE	$3,06 \times 10^{-5}$	$3,77 \times 10^{-5}$	$5,64 \times 10^{-5}$	$3,49 \times 10^{-5}$
χ^2	$3,40 \times 10^{-5}$	$4,19 \times 10^{-5}$	$6,27 \times 10^{-5}$	$3,88 \times 10^{-5}$
AIC	-301,86	-295,58	-297,23	-297,86

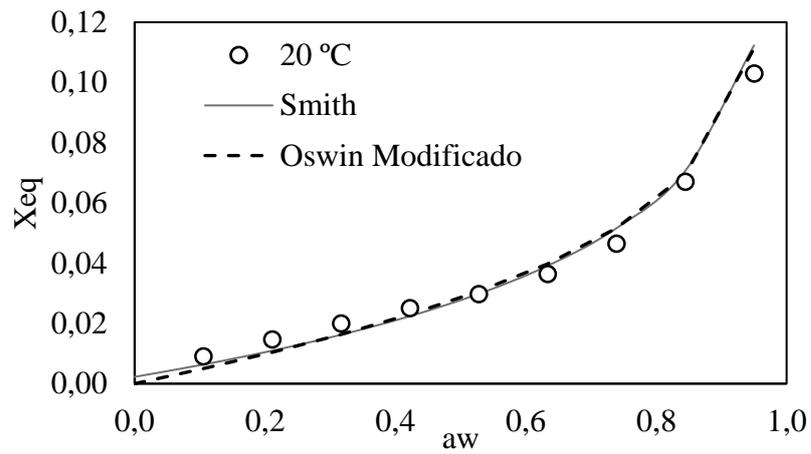


Figura 4.25. Ajuste dos modelos de Smith e Oswin modificado à isoterma de dessecção a 20 °C.

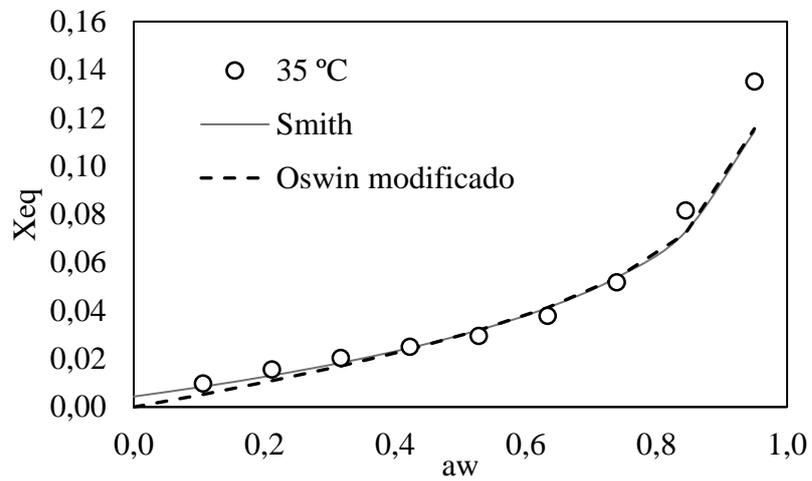


Figura 4.26. Ajuste dos modelos de Smith e Oswin modificado à isoterma de dessecção a 35 °C.

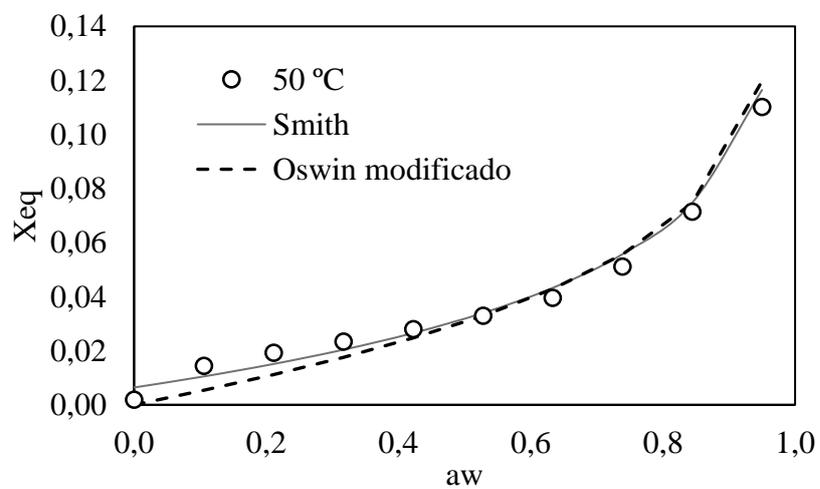


Figura 4.27. Ajuste dos modelos de Smith e Oswin modificado à isoterma de dessecção a 50 °C.

Foram testados também os modelos de Brunauer, Emmett e Teller (BET), Guggenheim, Anderson e de Bôer (GAB), Generalised D'Arcy e Watt (GDW), Oswin e Henderson, que não dependem da temperatura. A Tabela 4.13 mostra os parâmetros e coeficientes de correlação obtidos para cada temperatura.

Conforme verificado na Tabela 4.13, os modelos que melhor representaram os dados foram GAB e GDW. Por apresentar três parâmetros a serem estimados, e sendo uma equação de grau maior que 2, o modelo de GAB na sua forma original apresenta uma maior possibilidade de ajuste dos dados experimentais.

Com base na classificação Brunauer (1938), a constante K do modelo GAB para material biológico deve ser $0 \leq K \leq 1$ e as amostras com $C > 2$ são classificadas como tipo II, portanto, os parâmetros do modelo estão condizentes com as características do material. O modelo GAB baseia-se no conceito de umidade de monocamada (X_m) e fornece o teor de umidade de monocamada do material. Zhang et al. (2010) e Hazaveh et al. (2015) afirmam que este é um parâmetro muito utilizado no estudo da secagem de alimentos, pois é considerado como a umidade segura para sua preservação.

O teor de umidade em monocamada (X_m) representa o menor teor de água contido em um produto, correspondendo à quantidade de água que é ligada diretamente às suas moléculas constituintes. Portanto, é considerado como o teor de umidade que proporciona um maior tempo de armazenamento, com perda mínima da qualidade a uma determinada temperatura e pode ser usado para estimar o teor de umidade ótimo para estabilidade e preservação de alimentos, produtos farmacêuticos e outros materiais (ZHANG et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2009). O modelo de GAB forneceu os valores de X_m de 0,0180 (b.s.) para 20 °C e 0,0186 (b.s.) para 35 e 50 °C. Com base no valor médio de X_m para a dessorção, recomenda-se que o processo de secagem do lodo não se estenda a níveis de umidades inferiores a 0,01844,3 (b.s.). A redução da umidade abaixo de X_m provoca um aumento exponencial na quantidade de energia envolvida no processo de secagem (PENA et al., 2010).

Ambos os modelos GAB e GDW assumem a existência de locais de adsorção primários (tipo Langmuir) na superfície do material. Cada sítio adsorve uma molécula de água, que pode ser o local de adsorção secundário para a próxima molécula. Segundo Vieira et al. (2007), os modelos diferem pelo pressuposto do número de sítios secundários criados a partir dos primários. O modelo GDW pressupõe que nem todas as moléculas de água adsorvidas em sítios primários serão centros secundários. Além disso, o modelo considera a possibilidade de que uma molécula de água anexada a um sítio primário possa dar origem a mais de um sítio de adsorção secundário.

Tabela 4.13. Parâmetros dos os modelos independentes de temperatura ajustados para as isotermas.

Modelo	Parâmetro	Temperatura (°C)		
		20	35	50
BET	X_m	2,8402	2,4519	2,7377
	C	0,0066	0,0053	0,0086
	n	2,9280	4,3790	2,6399
	R ²	0,9745	0,9785	0,9619
	MSE	4,27×10 ⁻⁵	6,33×10 ⁻⁵	6,75×10 ⁻⁵
	χ^2	6,10×10 ⁻⁵	9,05×10 ⁻⁵	9,64E×10 ⁻⁵
	AIC	-88,67	-88,67	-88,03
GAB	X_m	0,0180	0,0186	0,0186
	C	9,2591	7,5145	23,5061
	K	0,8733	0,9114	0,8770
	R ²	0,9996	0,9989	0,9997
	MSE	5,96×10 ⁻⁷	3,16×10 ⁻⁶	5,68×10 ⁻⁷
	χ^2	8,51×10 ⁻⁷	4,51×10 ⁻⁶	8,12×10 ⁻⁷
	AIC	-135,33	-118,66	-135,80
Oswin	A	0,0309	0,0309	0,0330
	B	0,5077	0,5077	0,4141
	R ²	0,9968	0,9964	0,9978
	MSE	5,36×10 ⁻⁶	1,06×10 ⁻⁵	3,92×10 ⁻⁶
	χ^2	6,70×10 ⁻⁶	1,32×10 ⁻⁵	4,90×10 ⁻⁶
	AIC	-115,36	-108,55	-118,50
Henderson	b	42,6840	20,4498	47,4800
	a	1,1587	0,9528	1,2345
	R ²	0,9962	0,9945	0,9916
	MSE	6,37×10 ⁻⁶	1,64×10 ⁻⁵	1,52×10 ⁻⁵
	χ^2	7,96×10 ⁻⁶	2,05×10 ⁻⁵	1,90×10 ⁻⁵
	AIC	-113,63	-104,20	-104,95
GDW	X_m	0,0218	0,0124	0,0189
	K	6,1749	24,8390	21,6008
	k	0,8779	0,8949	0,8750
	w	0,9021	1,0270	1,0371
	R ²	0,9997	0,9993	0,9925
	MSE	5,80×10 ⁻⁷	2,23×10 ⁻⁶	5,64×10 ⁻⁷
	χ^2	9,67×10 ⁻⁷	3,72×10 ⁻⁶	9,40×10 ⁻⁷
	AIC	-133,59	-120,12	-133,88

O parâmetro que determina a proporção de moléculas de água adsorvidas em sítios primários que são convertidos em sítios secundários é o parâmetro w . Quando $w = 1$, cada sítio de adsorção primário converte-se exatamente em um sítio secundário e a equação GDW torna-se igual à equação GAB. Os resultados na Tabela 4.13 mostram valores de w de 0,90 para 25 °C e praticamente 1 para 35 e 50 °C.

A Figuras 4.28 a 4.30 apresentam os ajustes dos modelos GAB e GDW às isotermas de dessorção a 20, 35 e 50 °C, onde pode-se observar que os modelos se sobrepõem, confirmando que a equação do modelo GDW se aproxima do modelo GAB.

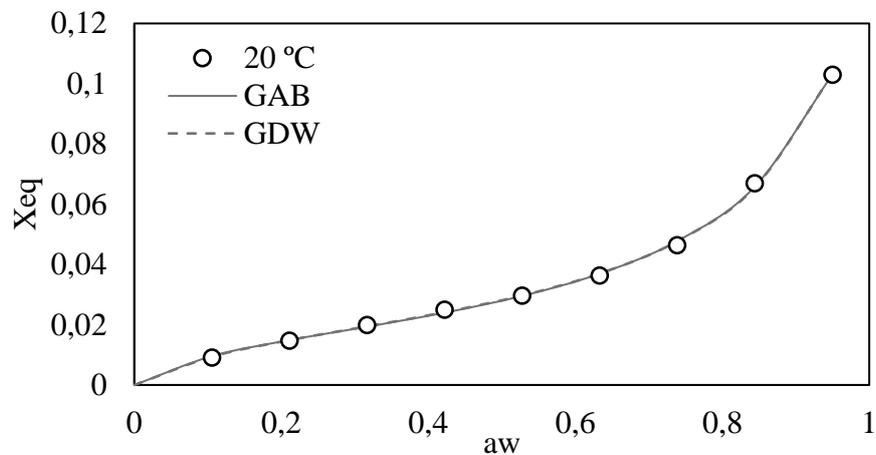


Figura 4.28. Ajuste dos modelos de GAB e GDW à isoterma de dessorção a 20 °C.

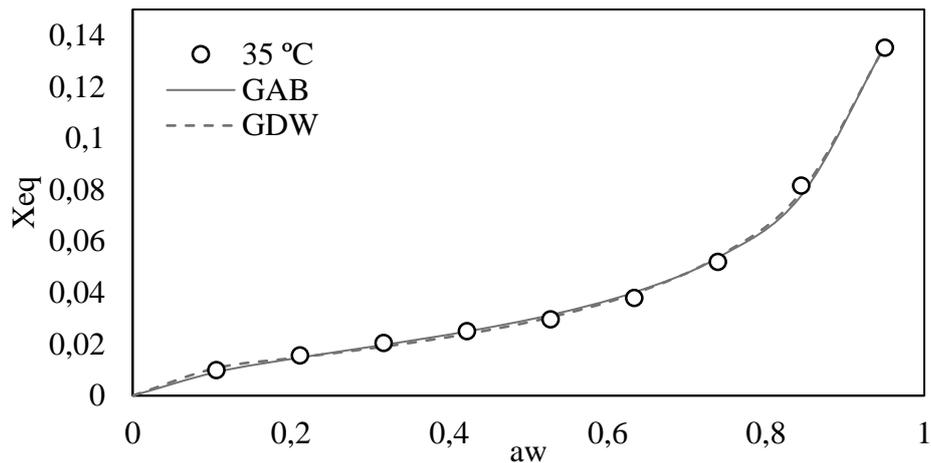


Figura 4.29. Ajuste dos modelos de GAB e GDW à isoterma de dessorção a 35 °C

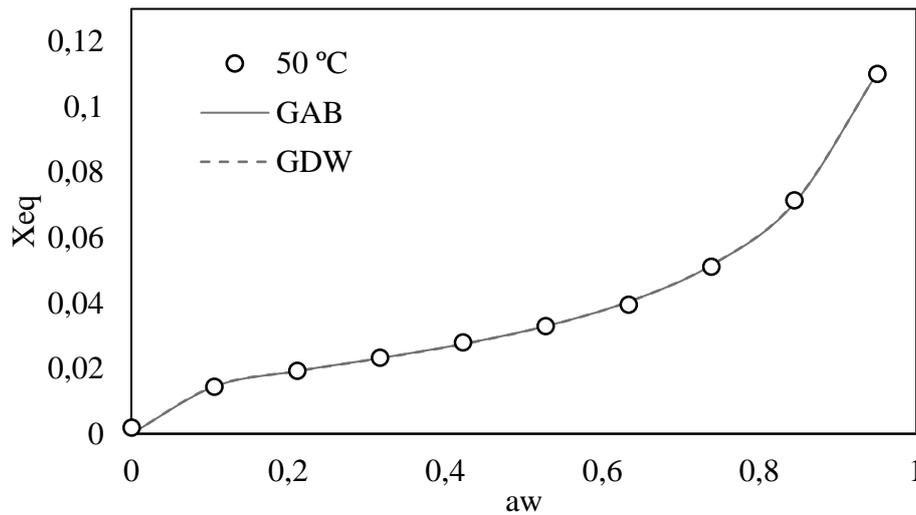


Figura 4.30. Ajuste dos modelos de GAB e GDW à isoterma de dessorção a 50 °C.

Observa-se quando se comparam os modelos que utilizam ou não a temperatura como um dos parâmetros, nas Tabelas 4.12 e 4.13, respectivamente, o coeficiente de determinação (R^2) é maior para estes últimos. Entretanto, ao se analisar o AIC, nota-se que este parâmetro é bem menor para os modelos que utilizam a temperatura como parâmetro do modelo. Isto porque, o modelo se ajusta simultaneamente aos dados de dessorção das três temperaturas testadas, desta maneira, o número de dados experimentais triplica, aumentando a eficiência do modelos e possibilitando que se extrapole o modelos para outras temperaturas. Assim sendo, de todos os modelos testado, o que representou melhor os dados foi o modelo de Smith, com $R^2 = 0,9718$ e $AIC = -301,86$.

4.6 Encolhimento

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram a cinética de secagem e a taxa de secagem referentes aos ensaios realizados na estufa para o estudo do encolhimento. Nota-se que o comportamento está de acordo com a literatura clássica, ou seja, o aumento da temperatura tem efeito favorável à secagem. Por meio da Figura 4.31 percebe-se que, quando se aumenta a temperatura de secagem, a variação do teor de umidade é maior. Isto é evidenciado quando se comparam as curvas de 80 e 110 °C. Entretanto, para as temperaturas de 110 e 140 °C o comportamento das curvas foi muito semelhante, com uma brusca redução nos primeiros 50 min de secagem. Assim como nos ensaios de secagem convectiva, o efeito da temperatura foi menos pronunciado para as condições mais severas.

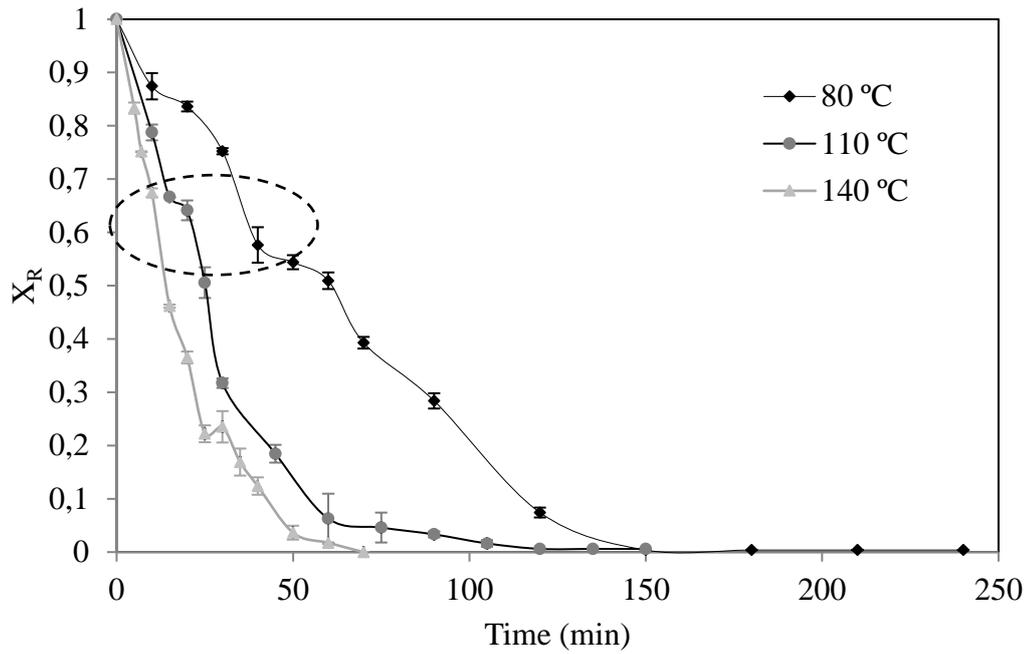


Figura 4.31. Cinética de secagem dos experimentos de secagem em estufa.

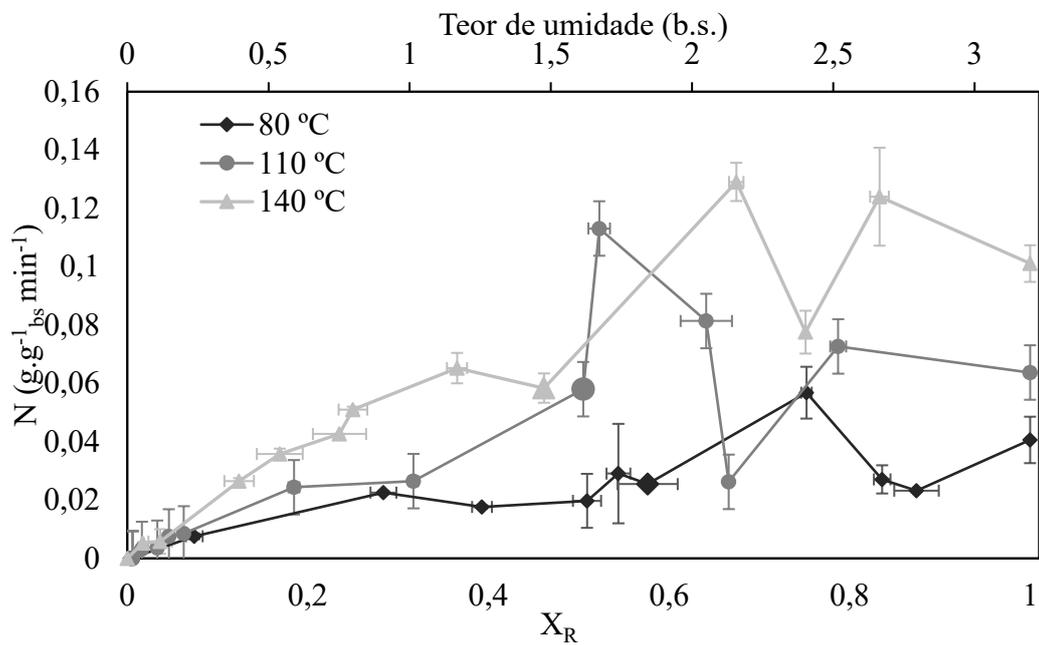


Figura 4.32. Taxas de secagem para os ensaios de secagem em estufa.

Uma análise mais detalhada pode ser feita investigando individualmente as curvas de secagem da Figura 4.31, em que se nota, um sutil ponto de inflexão entre os teores de adimensionais de umidade de $X_R=0,55$ e $X_R=0,65$ (destacado por uma elipse). Esta mudança de comportamento foi observada também nos ensaios de secagem convectiva do lodo, item 4.2, onde o ponto foi denominado como o segundo teor de umidade crítica do lodo (X^*), que marca a transição entre o primeiro e segundo períodos de taxa decrescente.

Esta afirmação é corroborada pelo fato de que o lodo usado na secagem em estufa já havia sido previamente seco até atingir um teor de umidade crítico pré-determinado (como explicado na metodologia). Assim, pode-se afirmar que a curva de secagem apresentou dois períodos de taxa decrescente, resultados semelhantes aos observados por Serenoti et al. (2010), Bennamoun et al. (2014) e Léonard et al. (2010).

Estendendo a análise da cinética para a Figura 4.32, nota-se que não houve nenhum período de taxa de secagem constante para nenhuma das condições analisadas, visto que o lodo já havia atingido o primeiro teor de umidade crítica (X_C). Entretanto, novamente de maneira sutil, percebe-se uma mudança no comportamento. A partir de $X_R=0,60$, quando o teor de umidade das amostras encontra-se entre 1,5 e 2 (b.s.), as taxas passam a decrescer de maneira mais “organizada” e linear.

Esses valores, já previamente denominados de segundo teor de umidade crítica, X^* , estão dentro da faixa obtida nos ensaios de secagem convectiva, mostrados na Tabela 4.6. Os pontos X^* , estão destacados na Figura 4.32 com os marcadores de tamanho maior. Para facilitar a referência a esta faixa de valores, será utilizado um valor médio de $\bar{X}^*=1,75$ (b.s.).

Os resultados obtidos na avaliação da densidade aparente e porosidade, apresentados e discutidos a seguir, corroboram esta interpretação. Para os ajustes dos dados experimentais, foram utilizados os modelos de Lewis (1921), Page (1949), Henderson e Pabis (H-P) (1921), Logarítmico (2003), Danish et al. (2016) e Crank (1975) para as três temperaturas de secagem (80, 110 e 140 °C). A Tabela 4.14 mostra os valores dos parâmetros, coeficientes de determinação (R^2), qui-quadrado (χ^2) e AIC obtidos para os modelos.

Os modelos que apresentaram melhores ajustes foram Page (1949) e Danish et al. (2016), com resultados iguais até a terceira casa decimal em praticamente todos os parâmetros avaliados na Tabela 4.14, sendo os maiores valores de R^2 e os menores valores de χ^2 e AIC.

Tabela 4.14. Parâmetros dos modelos ajustados nos ensaios de secagem em estufa.

Modelo	T (°C)	Coeficientes			R ²	χ ²	AIC
Lewis (1921)	80	k= 0,0139 ± 6,73×10 ⁻⁴			0,9763 ± 4,76×10 ⁻²	0,0044 ± 4,07×10 ⁻⁵	-73,00
	110	k= 0,3168 ± 1,44×10 ⁻³			0,9773 ± 4,67×10 ⁻²	0,0035 ± 1,09×10 ⁻⁴	-72,39
	140	k= 0,0500 ± 1,41×10 ⁻³			0,9901 ± 3,06×10 ⁻²	0,0016 ± 1,27×10 ⁻⁴	-87,66
Page (1949)	80	k=0,7955 ± 2,64×10 ⁻²	n=1,3983 ± 6,99×10 ⁻²		0,9877 ± 3,92×10 ⁻²	0,0011 ± 6,80×10 ⁻⁵	-91,78
	110	k=2,5253 ± 1,62×10 ⁻¹	n=1,3856 ± 7,02×10 ⁻¹		0,9892 ± 3,54×10 ⁻²	0,0012 ± 1,56×10 ⁻⁵	-107,58
	140	k=3,6524 ± 1,52×10 ⁻¹	n=1,1823 ± 3,42×10 ⁻²		0,9932 ± 2,72×10 ⁻²	0,0007 ± 1,09×10 ⁻⁵	-140,10
Henderson e Pabis (1921)	80	a=1,0652 ± 3,23×10 ⁻²	k= 0,015 ± 8,74×10 ⁻⁴		0,9720 ± 5,56×10 ⁻²	0,0044 ± 6,12×10 ⁻⁵	-74,13
	110	a=1,0607 ± 3,34×10 ⁻² ³	k= 0,0339 ± 1,89×10 ⁻³		0,9764 ± 5,03×10 ⁻²	0,0034 ± 9,99×10 ⁻⁵	-72,46
	140	a=1,0504 ± 1,91×10 ⁻²	k= 0,0528 ± 1,72×10 ⁻³		0,9893 ± 3,34×10 ⁻²	0,0015 ± 3,37×10 ⁻⁵	-88,35
Logarithmic (2003)	80	a=1,1645 ± 3,69×10 ⁻²	k=0,0116±1,06×10 ⁻³	c=-0,1273±3,93×10 ⁻²	0,9804 ± 4,93×10 ⁻²	0,0028 ± 6,75×10 ⁻⁵	-80,92
	110	a=1,0785 ± 3,48×10 ⁻²	k=0,0320±2,52×10 ⁻³	c=-0,0230±2,14×10 ⁻²	0,9873 ± 5,04×10 ⁻²	0,0034 ± 1,05×10 ⁻⁴	-71,08
	140	a=1,0692 ± 2,10×10 ⁻²	k=0,0493±2,64×10 ⁻³	c=-0,0281±1,72×10 ⁻²	0,9901 ± 3,27×10 ⁻²	0,0013 ± 3,33×10 ⁻⁵	-88,18
Danish et al. (2016)	80	k=0,7175 ±4,11×10 ⁻²	n= 1,4158±6,41×10 ⁻²	c=-0,0287±1,31×10 ⁻²	0,9892 ± 3,69×10 ⁻²	0,0015± 6,60×10 ⁻⁵	-93,10
	110	k=2,6516 ±2,01×10 ⁻¹	n= 1,3991±7,21×10 ⁻²	c= 0,0105± 8,27×10 ⁻³	0,9893 ± 3,53×10 ⁻²	0,0012 ± 1,52×10 ⁻⁵	-106,44
	140	k=3,8612 ±1,77×10 ⁻¹	n= 1,1885±3,24×10 ⁻²	c= 0,0134± 5,21×10 ⁻³	0,9932 ± 2,72×10 ⁻²	0,0007 ± 2,97×10 ⁻⁵	-140,37

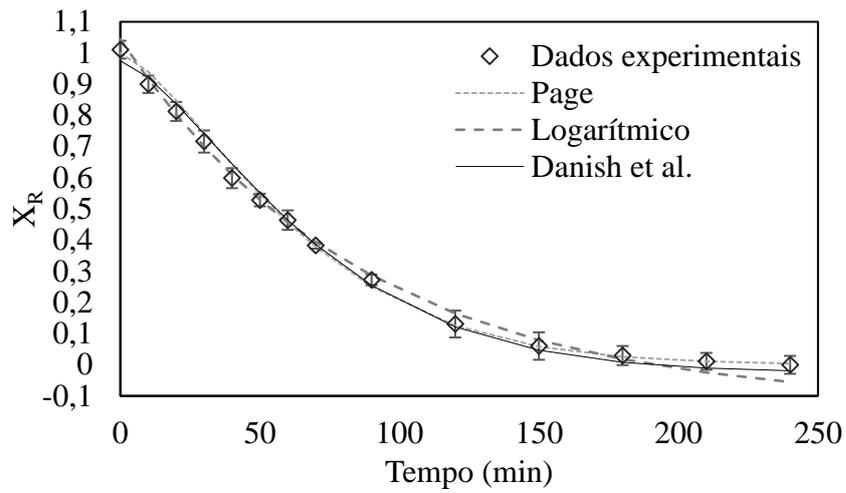


Figura 4.33. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as temperaturas de 80 °C.

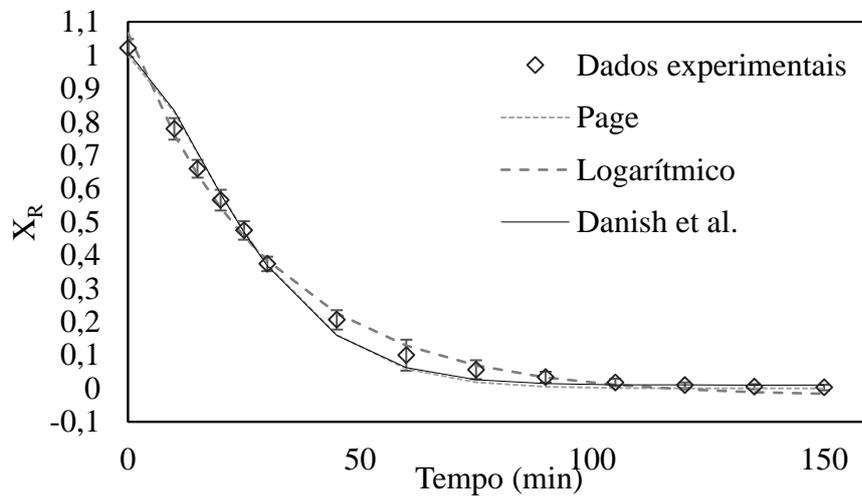


Figura 4.34. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as temperaturas de 110 °C.

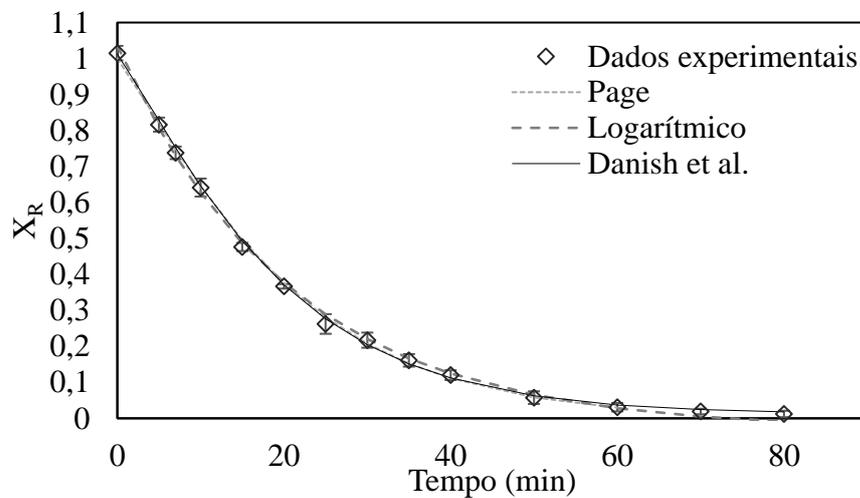


Figura 4.35. Curvas obtidas para os modelos e dados experimentais para as temperaturas de 140 °C.

Para os ensaios em estufa, foi possível ajustar o modelo de Crank (1975) (Equação 2.15) com coeficientes de determinação (R^2) satisfatórios, entre $0,9689 \pm 4,56 \times 10^{-2}$ e $0,9845 \pm 3,10 \times 10^{-2}$ e com qui-quadrado reduzido (χ^2) de $2,63 \times 10^{-4}$.

Os resultados estatísticos obtidos pela solução analítica de Crank (1975) são mostrados na Tabela 4.15. Pode-se observar a dependência da difusividade efetiva como função da temperatura, em que aumentando-se a temperatura aumenta-se a difusividade efetiva. Para os ensaios de secagem em estufa, portanto, o modelo proposto descreve adequadamente os dados e é provado que a hipótese de que a transferência de massa é controlada por uma etapa difusiva é adequada para este estudo. Isto porque, como o lodo já iniciou a secagem em estufa com o teor de umidade crítico, prevaleceu ao longo do processo o período de taxa de secagem decrescente. Nesta fase da secagem, a transferência de massa é controlada por mecanismos de difusão interna, fenômeno que é considerado pelo modelo de Crank (1975). Já na secagem em secador convectivo os períodos de taxa constante são consideráveis, o que explica porque nesta situação, o modelo não apresentou bons ajustes.

Tabela 4.15. Difusividade Efetiva (D_{eff}), coeficientes de obtidos para a Equação de Crank (1975).

T (°C)	D_{eff} ($m^2 s^{-1}$)	R^2	χ^2
80	$4,6339 \times 10^{-10} \pm 2,31 \times 10^{-11}$	$0,9801 \pm 3,42 \times 10^{-2}$	$0,0044 \pm 4,07 \times 10^{-5}$
110	$1,0741 \times 10^{-9} \pm 1,13 \times 10^{-10}$	$0,9688 \pm 4,56 \times 10^{-2}$	$0,0035 \pm 1,09 \times 10^{-4}$
140	$1,68193 \times 10^{-9} \pm 1,29 \times 10^{-10}$	$0,9845 \pm 3,10 \times 10^{-2}$	$0,0016 \pm 1,27 \times 10^{-4}$

Os valores de difusividade efetiva que variaram entre $4,6339 \times 10^{-10} \pm 2,31 \times 10^{-11}$ e $1,0741 \times 10^{-9} \pm 1,13 \times 10^{-10}$, são próximos dos valores encontrados por outros autores: $4,17 \times 10^{-9}$ e $8,47 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$ (ZHANG, et al., 2016) $8,56 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$ (NIETO, et al., 2004), $7,77 \times 10^{-9}$ e $7,01 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$ (LI et al., 2014) e valores entre $28,45 \times 10^{-9}$ até $99,12 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$ (BENAMOUN, et al., 2014). De acordo com Li et al. (2014) os resultados estão dentro da faixa normalmente esperada de D_{eff} (entre 10^{-11} e $10^{-9} m^2 s^{-1}$).

A dependência da difusividade efetiva em relação à temperatura pode ser representada por uma expressão tipo Arrhenius para obter energia de ativação (Equação 4.4). A energia de ativação (E_a) representa a energia mínima necessária para difundir e evaporar moléculas de água durante o processo de secagem (RAYNAUD et al., 2010):

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.4)$$

Em que: D_0 : constante de difusividade em temperaturas infinitas ($\text{m}^2 \text{min}^{-1}$), E_a é a energia de ativação (kJ kmol^{-1}), R é a constante de gás universal ($8.314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$) e T é a temperatura absoluta (K).

Por meio da Equação 4.4 calculou-se D_0 e E_a , cujos valores são $1,6492 \times 10^{-6} \pm 1,33 \times 10^9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $23610,45 \text{ kJ kmol}^{-1}$, respectivamente, com um coeficiente de determinação de (R^2) de $0,9924 \pm 6,065 \times 10^{-9}$ e χ^2 reduzido de $1,56 \times 10^{-4}$.

4.6.1 Encolhimento volumétrico, superficial e de espessura

A análise dos dados experimentais de encolhimento de dimensões mostrou que as mudanças no volume (V/V_0) e na área (S/S_0) durante a secagem das amostras de lodo podem ser ajustadas às funções lineares em relação ao seu teor de umidade. O encolhimento na espessura (L/L_0) foi melhor correlacionado com um polinômio de segundo grau. As Equações 4.5 a 4.7 representam os modelos aplicados neste trabalho para os ajustes superficial, volumétrico e linear do encolhimento:

$$\frac{S}{S_0} = A \cdot X_R + B \quad (4.5)$$

$$\frac{V}{V_0} = A' \cdot X_R + B' \quad (4.6)$$

$$\frac{L}{L_0} = A'' \cdot (X_R)^2 + B'' \cdot X_R + C'' \quad (4.7)$$

A Tabela 4.16 mostra os resultados obtidos para os parâmetros dos modelos empíricos e os respectivos coeficientes de correlação (R^2).

As Figuras 4.36 a 4.38 representam, respectivamente, a variação da superfície, do volume e da espessura das amostras de lodo em função do teor de umidade adimensional durante a secagem.

Tabela 4.16. Parâmetros característicos calculados pelas Equações 4.2 a 4.4.

	<i>S/S0</i>			<i>V/V0</i>			<i>L/L0</i>			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R²</i>	<i>A'</i>	<i>B'</i>	<i>R²</i>	<i>A''</i>	<i>B''</i>	<i>C''</i>	<i>R²</i>
<i>T</i> (°C)	80									
Coefficiente	0,5765	0,3942	0,9724	0,7706	0,1816	0,9711	-0,3889	0,9340	0,4417	0,9683
Desvio Padrão	$8,43 \times 10^{-3}$	$2,36 \times 10^{-3}$	$7,59 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-2}$	$4,34 \times 10^{-3}$	$1,16 \times 10^{-2}$	$5,32 \times 10^{-2}$	$4,91 \times 10^{-2}$	$1,10 \times 10^{-3}$	$1,12 \times 10^{-2}$
<i>T</i> (°C)	110									
Coefficiente	0,6288	0,3431	0,9573	0,8111	0,1366	0,9727	-0,4272	1,0401	0,3997	0,9788
Desvio Padrão	$8,77 \times 10^{-3}$	$4,92 \times 10^{-3}$	$8,77 \times 10^{-4}$	$1,84 \times 10^{-2}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$4,72 \times 10^{-3}$	$5,26 \times 10^{-2}$	$4,79 \times 10^{-2}$	$7,00 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-3}$
<i>T</i> (°C)	140									
Coefficiente	0,5211	0,6304	0,9753	0,7319	0,2799	0,9840	-0,3780	0,8377	0,5396	0,9729
Desvio Padrão	$4,11 \times 10^{-2}$	$4,32 \times 10^{-2}$	$4,59 \times 10^{-2}$	$4,39 \times 10^{-2}$	$4,33 \times 10^{-2}$	$4,35 \times 10^{-2}$	$4,19 \times 10^{-2}$	$2,34 \times 10^{-2}$	$2,48 \times 10^{-2}$	$4,49 \times 10^{-2}$

Da Tabela 4.16 e das Figuras 4.36 a 4.38, nota-se um pequeno aumento nos coeficientes angulares (A e A') das variações da área e do volume quando a temperatura passa de 80 a 110 °C. Esse fato pode ser confirmado observando a inclinação da reta nas Figuras 4.36 e 4.38, que é ligeiramente mais acentuada para a temperatura de 110 °C.

Este aumento nos coeficientes angulares (A e A') significa que o aumento de temperatura causou um aumento no encolhimento, isto é, a diminuição do volume e da superfície é maior quando a temperatura é aumentada de 80 para 110 °C. No entanto, quando a temperatura é novamente aumentada (140 °C), este comportamento é revertido, isto é, o encolhimento é menor.

Outros autores, estudando o fenômeno de encolhimento, também obtiveram ajustes lineares para a redução volumétrica na secagem de lodo (LI et al., 2015a; LI et al., 2015b; LI et al., 2014; RUIZ et al., 2007) papel reciclado (VIEIRA et al., 2006b) e alimentos, tais como: banana (KATEKAWA e SILVA, 2007; MADIOULI et al., 2012), abóbora (MAYOR e SERENO, 2011), cenoura (KROKIDA e MAROULIS, 1997), casca de laranja (TAMER et al., 2016), maçã (NIETO et al., 2004) sementes de cacau (KOUA et al. 2017).

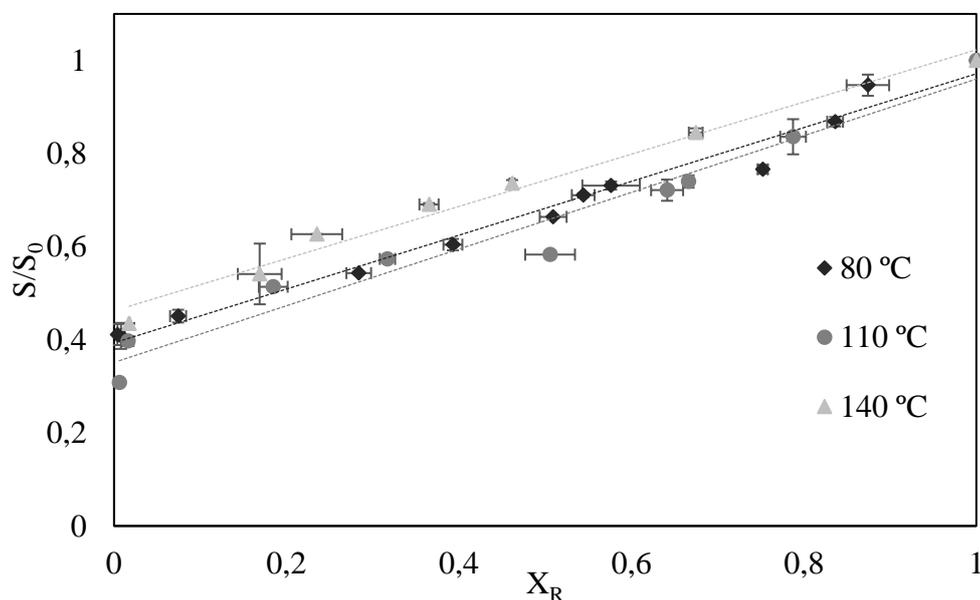


Figura 4.36. Redução superficial do lodo em função da razão do teor de umidade (b.s.). As linhas representam as curvas ajustadas pela Equação 4.2.

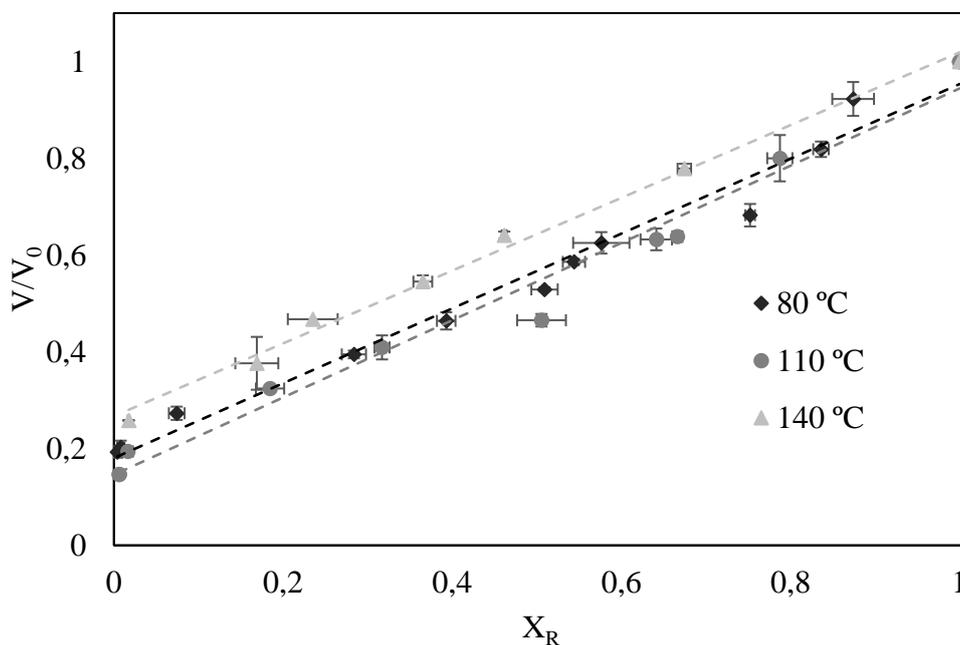


Figura 4.37. Redução volumétrica do lodo em função da razão do teor de umidade (b.s.). As linhas representam as curvas ajustadas pela Equação 4.3.

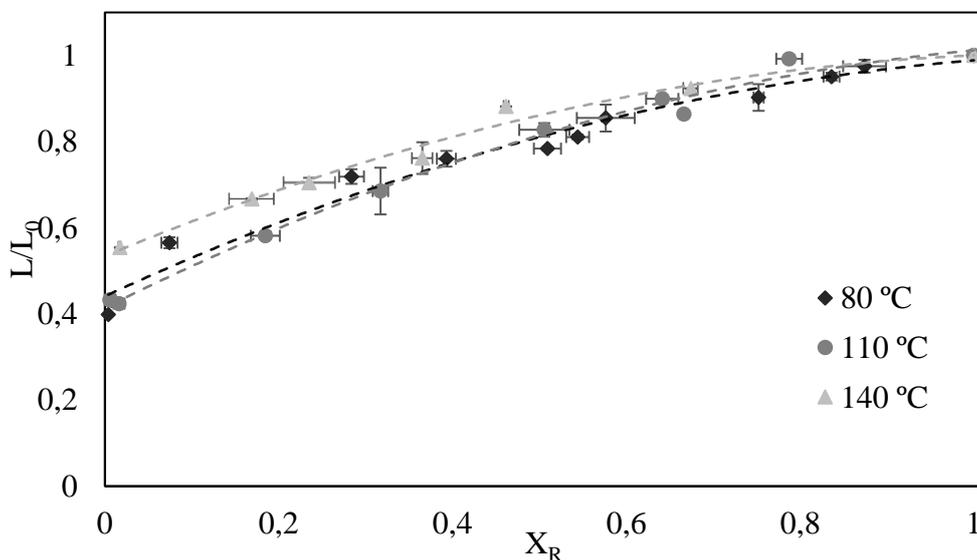


Figura 4.38. Redução da espessura do lodo em função da razão do teor de umidade (b.s.). As linhas representam as curvas ajustadas pela Equação 4.3.

Mayor e Sereno (2004) argumentam que, durante o processo de secagem, os materiais biológicos encontram-se basicamente no estado de borracha, e a contração quase totalmente compensa a perda de umidade. Assim, o volume do material diminui linearmente com o teor de umidade. O modelo fundamental proposto por Perez e Calvelo (1984), modificado por Mayor

e Sereno (2004) também foi usado para o ajuste de dados, como mostrado nas Figuras 4.39.a, 4.39.b e 4.39.

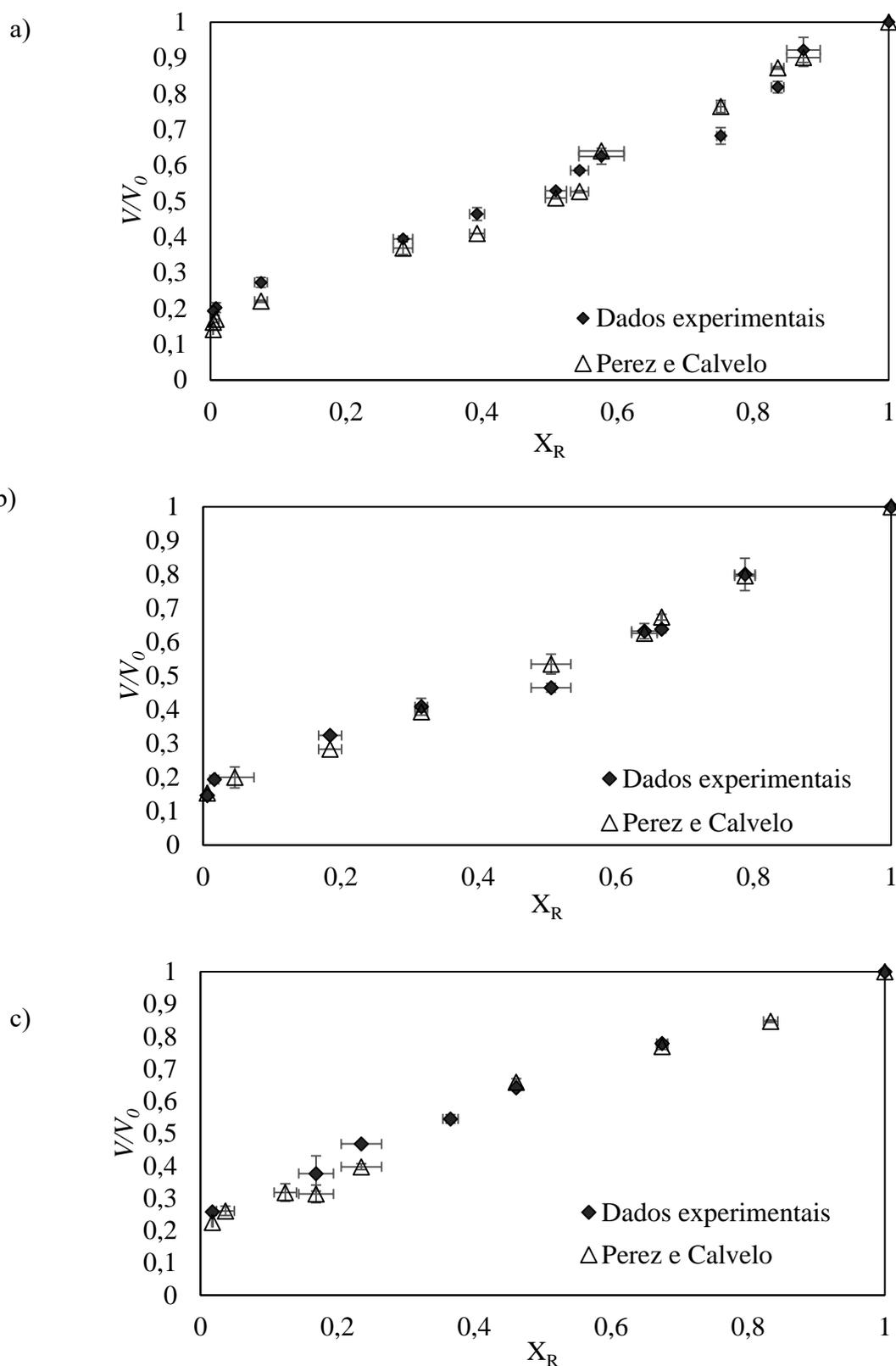


Figura 4.39. Dados experimentais e valores preditos pelo modelo Perez e Calvelo (1984) para a redução volumétrica para as temperaturas de (a) 80 °C, (b) 110 °C e (c) 140 °C.

Quando ocorrem variações na porosidade do material durante a secagem, esta propriedade deve ser incluída no modelo para levar em conta esse fenômeno. O modelo modificado Perez e Cavelo é uma maneira eficiente de representar fisicamente o encolhimento nos alimentos e também na secagem de lodo (KOYA et al., 2017). Os modelos empíricos apresentaram bons ajustes ados dados experimentais, entretanto Mayor e Sereno (2004) afirmam que modelos fundamentais permitem a predição do teor de umidade e/ou mudanças no volume de maneira simples. Além disso, não é absolutamente necessário obter dados experimentais de secagem para cada condição do processo, como no caso dos modelos empíricos.

Os valores preditos pelo modelo Perez e Cavelo, mostrados nas Figuras 4.39.a, 4.39.b e 4.39, são muito próximos dos dados experimentais e o comportamento linear é novamente notado. Os coeficientes de determinação foram $0,9844 \pm 3,76 \times 10^{-2}$, $0,9854 \pm 2,61 \times 10^{-2}$ e $0,9869 \pm 4,17 \times 10^{-2}$ para as temperaturas de 80, 110 e 140 °C, respectivamente.

Para o caso das reduções na espessura, nas quais foram ajustados modelos polinomiais de segundo grau, o comportamento foi semelhante para as temperaturas de 80 e 110 °C e, para a temperatura de 140 °C, novamente a redução foi menos pronunciada.

Comparando estes resultados com outros encontrados na literatura, a explicação se fundamenta na diferença de comportamento do encolhimento, de acordo com a faixa de temperatura estudada. Quando a temperatura aumentou de 80 a 110 °C (para simplificar será denominada neste trabalho como etapa I), ocorreu o aumento do encolhimento em função da temperatura. Quando a temperatura aumentou de 110 a 140 °C (etapa II), houve a diminuição do encolhimento com o aumento temperatura.

Vieira et al. (2006b), ao estudarem o encolhimento na secagem de papel a temperaturas mais amenas (70, 80 e 90 °C), observaram que as reduções na espessura e no volume foram mais pronunciadas para a temperatura mais elevada, comportamento semelhante à etapa I deste estudo.

Outros pesquisadores estudando o encolhimento de batata (WANG e BRENNAN, 1995), maçã (LEWICKI e JAKUBCZYK, 2004) e banana (KATEKAWA e SILVA, 2004) durante a secagem, obtiveram resultados diferentes. Nestes trabalhos, os objetos de estudo eram alimentos que, conhecidamente apresentam o fenômeno de endurecimento da camada superficial, ou seja, o encolhimento torna-se menos pronunciado com o aumento da temperatura do ar, porque a alta taxa inicial de evaporação de umidade provoca o endurecimento da superfície externa do material, que se torna impermeável ao movimento de umidade. Com este

fenômeno, a remoção da água está reduzida e o encolhimento retardado. Assim, este fenômeno pode explicar o comportamento da etapa II deste trabalho. Sabe-se que o lodo, como a maioria dos materiais biológicos, também apresenta este comportamento de endurecimento superficial da camada externa (BENNAMOUN et al., 2014; BENNAMOUN, 2012; TAO et al, 2006), e esse efeito é mais evidente e ocorre mais rapidamente quando o lodo é submetido a altas temperaturas.

Bennammoun et al. (2014) ao estudarem o encolhimento de lodo de esgoto sob três temperaturas diferentes (80, 140 e 200 °C) observaram também que a temperatura influencia no tempo de reação do material. Os autores obtiveram diferentes percentuais de redução volumétrica para cada temperatura: para 80 °C, a redução foi de 45% após 130 min; e para as temperaturas de 140 e 200 °C, essa redução foi de 40 e 30%, respectivamente, após 50 minutos. A partir deste tempo, não se verificou mais encolhimento do lodo. Nos experimentos realizados neste trabalho os volumes finais do lodo também variaram de acordo com a temperatura, como ilustra a Figura 4.40.

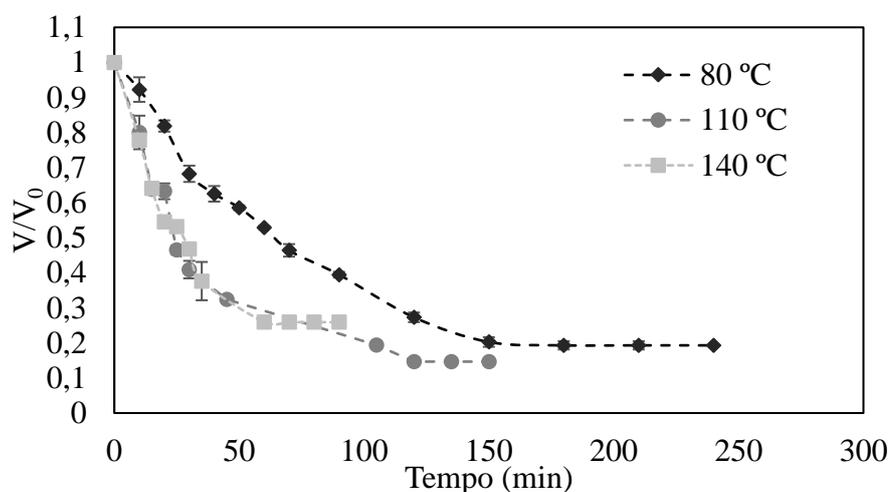


Figura 4.40. Redução volumétrica do lodo em função do tempo.

Neste trabalho, a redução volumétrica média foi de 80 % para a temperatura de 80 °C (180 minutos de secagem), 85 % para a temperatura de 110 °C (120 minutos de secagem), e 76 % para a temperatura de 140 °C (70 minutos de secagem). Analisando-se apenas o volume final, percebe-se novamente que o aumento da temperatura para temperaturas amenas (etapa I) proporciona maior encolhimento, enquanto que o aumento da temperatura, para temperaturas mais drásticas (etapa II) ocasiona a diminuição da taxa de encolhimento.

Quando se analisa a variação volumétrica da Figura 4.40 nota-se que as temperaturas de 110 e 140 °C apresentaram comportamentos mais próximos, com uma brusca redução no início da secagem. Bennammoun et al. (2014) argumentam que o aumento da temperatura de secagem diminui o tempo de reação do produto às condições aplicadas e, conseqüentemente, as taxas de encolhimento diminuem. Entretanto, cabe salientar que as faixas de temperaturas estudadas pelos autores não foram as mesmas deste estudo.

Analisando os resultados obtidos neste trabalho em conjunto com os resultados de Bennammoun et al. (2014) percebe-se que o lodo apresenta comportamentos diferentes, dependendo da faixa de temperatura de secagem, podendo ser dividido nas seguintes faixas de temperatura:

- até 110 °C: neste intervalo, o tempo de reação das amostras é maior, e o aumento da temperatura causa um aumento no grau de encolhimento, e ao final do processo, maiores percentuais de redução volumétrica;
- acima de 110 °C: para temperaturas maiores do que 110 °C o aumento da temperatura provoca uma diminuição no grau de encolhimento e também na redução volumétrica final, devido ao menor tempo de reação e endurecimento da camada superficial.

O comportamento do lodo foi semelhante ao sugerido por Mayor e Sereno (2004) no estudo da secagem de alimentos. Os autores sugerem que o tipo e a extensão do encolhimento são determinados pelo efeito combinado das condições do processo quando se facilita a formação de uma crosta ou casca na superfície externa do produto durante a fase inicial da secagem. O fenômeno de endurecimento da superfície fixa o volume do material, dificultando o subsequente encolhimento da parte interior ainda emborrachada do material. Assim, as taxas de secagem desempenham um papel significativo na formação da crosta superficial (MAYOR e SERENO, 2004).

Ratti (1994) afirmou que, sob baixas taxa de secagem, as tensões dentro dos alimentos são mínimas e o encolhimento é pronunciado, mas uniforme. Sob altas taxas de secagem, a umidade da superfície diminuiu muito rapidamente, de modo que a superfície torna-se rígida (fenômeno de endurecimento da superfície ou *case hardening phenomenon*), comportamento também relatado por Tao et al. (2006).

Se forem utilizadas condições de baixa taxa de secagem, a velocidade de difusão de água (do interior do material para a superfície) é igual à velocidade de evaporação de umidade na superfície. Portanto, não são formados gradientes de umidade acentuados no material que encolhe uniformemente até às últimas fases de secagem.

Desta maneira, apesar de altas temperaturas fornecerem condições favoráveis para a secagem, se forem muito elevadas, as taxas de secagem inibem a perda de umidade do material (GULLATI e DATA, 2015) devido ao endurecimento da camada superficial. Este fenômeno explica o comportamento diferente nas dimensões do lodo dependendo da faixa de temperatura de secagem (I e II). Tal comportamento também pode ser verificado na Figura 4.41.

Nota-se que para a temperatura mais baixa (80 °C) as taxas de encolhimento foram praticamente constantes, decrescendo ao final da secagem. Quando a temperatura aumentou para 110 °C (etapa I), as taxas iniciais de encolhimento são mais altas. Entretanto, o decréscimo nas taxas sob altas temperaturas também é mais pronunciado.

Quando a temperatura é aumentada novamente (140 °C, etapa II), as taxas de secagem são muito altas e, no início da secagem, ocorre a formação de uma camada fina e extremamente seca na superfície do material reduzindo o encolhimento, que é praticamente constante durante todo o processo. As linhas tracejadas foram acrescentadas à Figura 4.41 para uma melhor visualização da tendência das taxas de secagem.

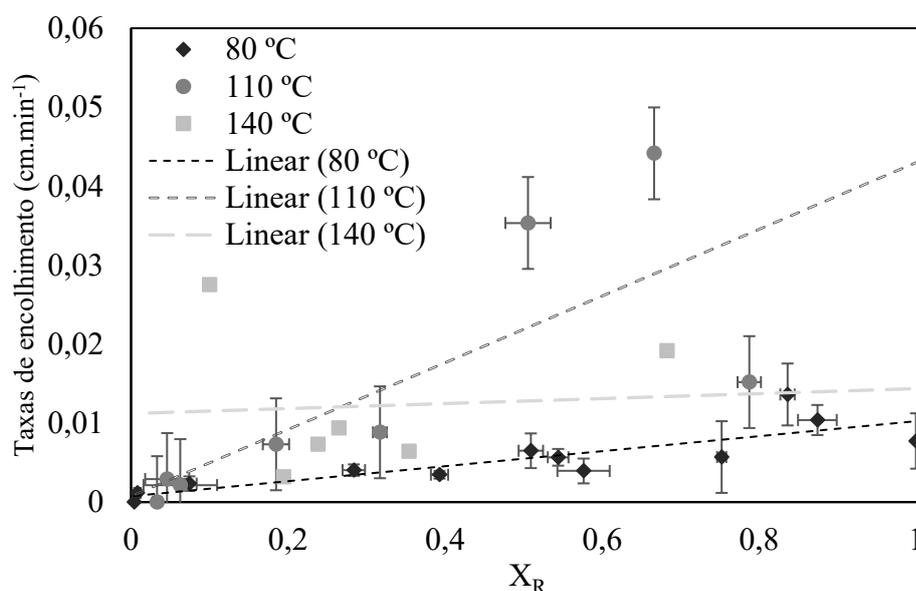


Figura 4.41. Taxas de encolhimento do lodo em função da razão de umidade (b.s.). As linhas representam a tendência de decréscimo das taxas.

4.6.2 Avaliação das propriedades físicas durante o encolhimento

O valor da densidade real dos sólidos, obtido para as amostras após a secagem em cada temperatura foi: 1942,1 kg.m⁻³, 1922,7 kg m⁻³ e 1960,9 kg.m⁻³, para 80, 110 °C e 140 °C,

respectivamente. A Figura 4.42 apresenta os resultados da variação da densidade aparente do lodo em função do teor de umidade do material para as três condições de secagem.

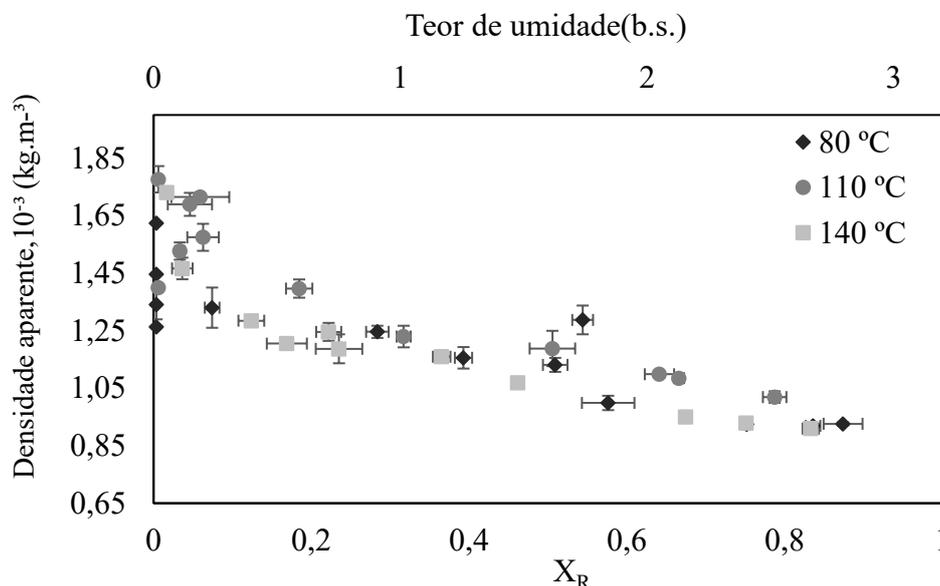


Figura 4.42. Densidade aparente em função da razão de umidade (b.s.).

Os valores de densidade aparente no início da secagem até o segundo teor de umidade crítico médio ($\bar{X}^* = 1,75$ b.s.) praticamente não variam. Vieira et al. (2006b) explicam que este comportamento ocorre porque a redução volumétrica do material é proporcional à perda de umidade evaporada durante este período da secagem.

Para o segundo período de taxa decrescente (a partir de $\bar{X}^* = 1,75$) a densidade aparente aumentou com o decorrer de secagem. Nos últimos pontos de medição, quando as amostras atingiram o teor de umidade de equilíbrio, a densidade aparente diminuiu. Resultados semelhantes foram obtidos na secagem de banana (KATEKAWA e SILVA, 2004) e maçã (LEWICKI e JAKUBCZYK, 2004) e podem ser atribuídos ao aumento drástico da porosidade na mesma faixa dos teores de umidade. A Figura 4.43 apresenta evolução da porosidade no decorrer da secagem.

A porosidade tem um efeito direto em outras propriedades físicas, incluindo a densidade aparente. Quanto menor a porosidade ou, em outras palavras, quanto maior for a densidade aparente aglomerada, mais fortes são os aglomerados (RAHMAN, 2001). Nota-se, pela Figura 4.43 que em $X_R < 0,2$, a porosidade aumenta drasticamente, diminuindo a força de aglomeração de partículas. Quando as amostras atingiram o teor de umidade de equilíbrio, não há mais perda de umidade para compensar a redução volumétrica, de modo que a densidade aparente diminui.

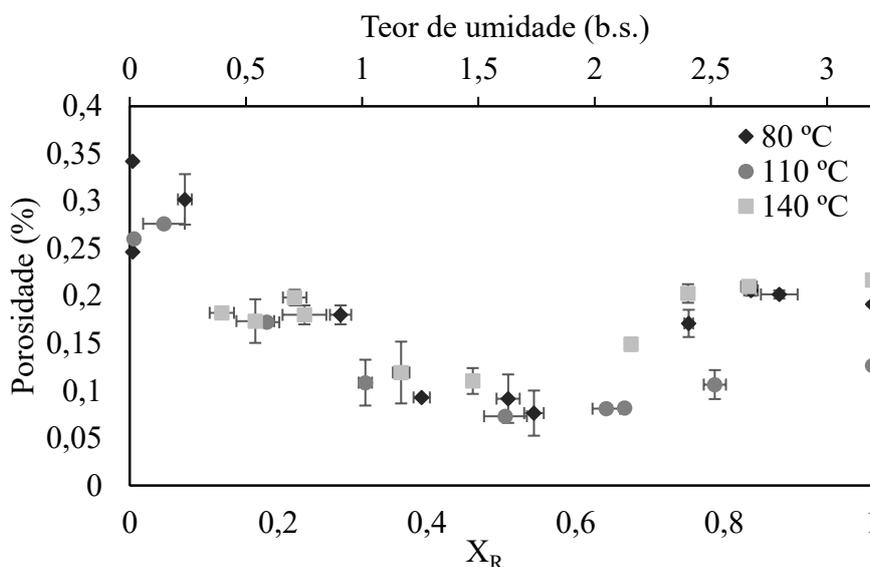


Figura 4.43. Porosidade em função da razão de umidade (b.s.).

No início da secagem, pela Figura 4.43 percebe-se que a porosidade permanece constante, assim como reportado por Krokida e Maroulis (1997) e Katekawa (2007). No entanto, pode-se observar que a porosidade é menor para a temperatura de 110 °C. Gulatti e Data (2015) afirmam que quando o encolhimento é restrito, ocorre um aumento na porosidade. Neste caso, relacionando as Figuras 4.41 e 4.43 observa-se que para as temperaturas de 80 e 140 °C, em que o encolhimento é menor e mais constante desde o início da secagem, a porosidade é maior. Para a temperatura de 110 °C as taxas de encolhimento são maiores e, conseqüentemente, a porosidade é menor.

Durante o intervalo $0,6 < X_R < 0,8$, a porosidade diminui, e em seguida ($X_R < 0,6$ e $\bar{X}^* = 1,75$ b.s.) aumenta drasticamente, assim como na secagem de pêras, batatas e batatas-doces (LOZANO et al, 1983) e diferentemente do que acontece na secagem convectiva de polpa de celulose (VIEIRA et al., 2006b), banana (KATEKAWA e SILVA, 2004; RAHMAN, 2001), alho (LOZANO et al., 1980), maçãs (ZOGZAS et al., 1994) em que a porosidade aumentou continuamente até o fim do processo.

Rahman (2001) relatou que, de acordo com a evidência experimental publicada na literatura, a formação de poros em produtos alimentares pode ser classificada em quatro comportamentos genéricos: (1) diminuição contínua da porosidade em função do teor de umidade; (2) aumento contínuo da porosidade em função do teor de umidade; (3) diminuição da porosidade até uma concentração crítica de umidade, após o que a porosidade começa a

aumentar em função do teor de umidade; (4) aumento da porosidade até uma concentração crítica de umidade, após o que a porosidade começa a diminuir em função do teor de umidade.

A curva de porosidade do lodo apresenta um típico comportamento descrito pelo item (3) da classificação de Rahman (2001), sendo este, mais um indício de que o teor de umidade de $\bar{X}^*=1,75$ (b.s.) é o segundo ponto crítico das amostras, que divide o período de secagem decrescente em dois.

Avaliando em conjuntos os resultados da secagem em estufa e secagem convectiva (item 4.2), acredita-se que a hipótese de que este tipo de lodo apresenta dois períodos de taxa decrescente é válida, sendo que o segundo teor de umidade crítico (X^*), que distingue estes períodos encontra-se uma faixa entre 1,41 e 2,78 (b.s.). Este intervalo foi determinado considerando-se o maior e menor valor encontrados no ensaio de secagem convectiva, e contém os valores encontrados na secagem em estufa, que foram representados por um valor médio $\bar{X}^*=1,75$ (b.s.).

Analisando-se as propriedades físicas do lodo, densidade aparente e de porosidade (Figuras 4.42 e 4.43, respectivamente) pode ser observadas mudanças de comportamento relacionadas ao segundo teor de umidade crítico, X^* . A densidade aparente, que permanecia constante, passa a aumentar. E a porosidade, que estava decrescendo, passou a aumentar.

Em relação à influência da temperatura, para uma análise mais aprofundada, as curvas de densidade aparente e porosidade foram divididas em intervalos, onde foram calculados valores médios de cada uma das propriedades. Apesar de bem próximos em cada intervalo, foi possível delinear uma tendência de comportamento. Novamente, este foi diferente para cada faixa de temperatura.

Para a faixa de temperaturas amenas (80 a 110 °C) quando a temperatura foi aumentada, ocorreu o aumento da densidade aparente. Porém, para a faixa de temperaturas elevadas (110 a 140 °C) a densidade aparente e a temperatura têm comportamentos inversos, ou seja, a secagem a temperaturas mais elevadas resulta em amostras com menores valores de densidade aparente, assim como observaram Vieira et al. (2006b) e Katekawa e Silva (2007) na secagem de papel reciclado e banana. Este comportamento foi verificado durante toda a curva da Figura 4.42.

Para a porosidade, durante a maior parte do processo, o comportamento também foi distinto de acordo com a faixa de temperatura. Para a faixa de temperaturas amenas (80 a 110 °C) o aumento da temperatura acarretou a diminuição da porosidade; para a faixa de temperaturas elevadas (110 °C a 140 °C) a porosidade cresceu com a temperatura. Isso é esperado, pois a porosidade possui efeito direto na densidade aparente do material e para valores menores de porosidade, obtém-se maiores valores de densidade aparente (VIEIRA et al., 2007).

Entretanto, já no final da secagem, quando as amostras estavam próximas do teor de umidade de equilíbrio, a porosidade aumentou de tal maneira para as três condições que o valor final obtido foi semelhante, aproximadamente 23%.

A Figura 4.44 mostra a superfície do lodo seco às temperaturas de 80, 110 e 140 °C analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Pode-se notar que a superfície porosa das amostras não apresentou diferenças significativas devido à diferença de temperatura de secagem, concordando com os resultados da Figura 4.43 que apresentaram os mesmos percentuais de porosidade de umidade ao final da secagem.

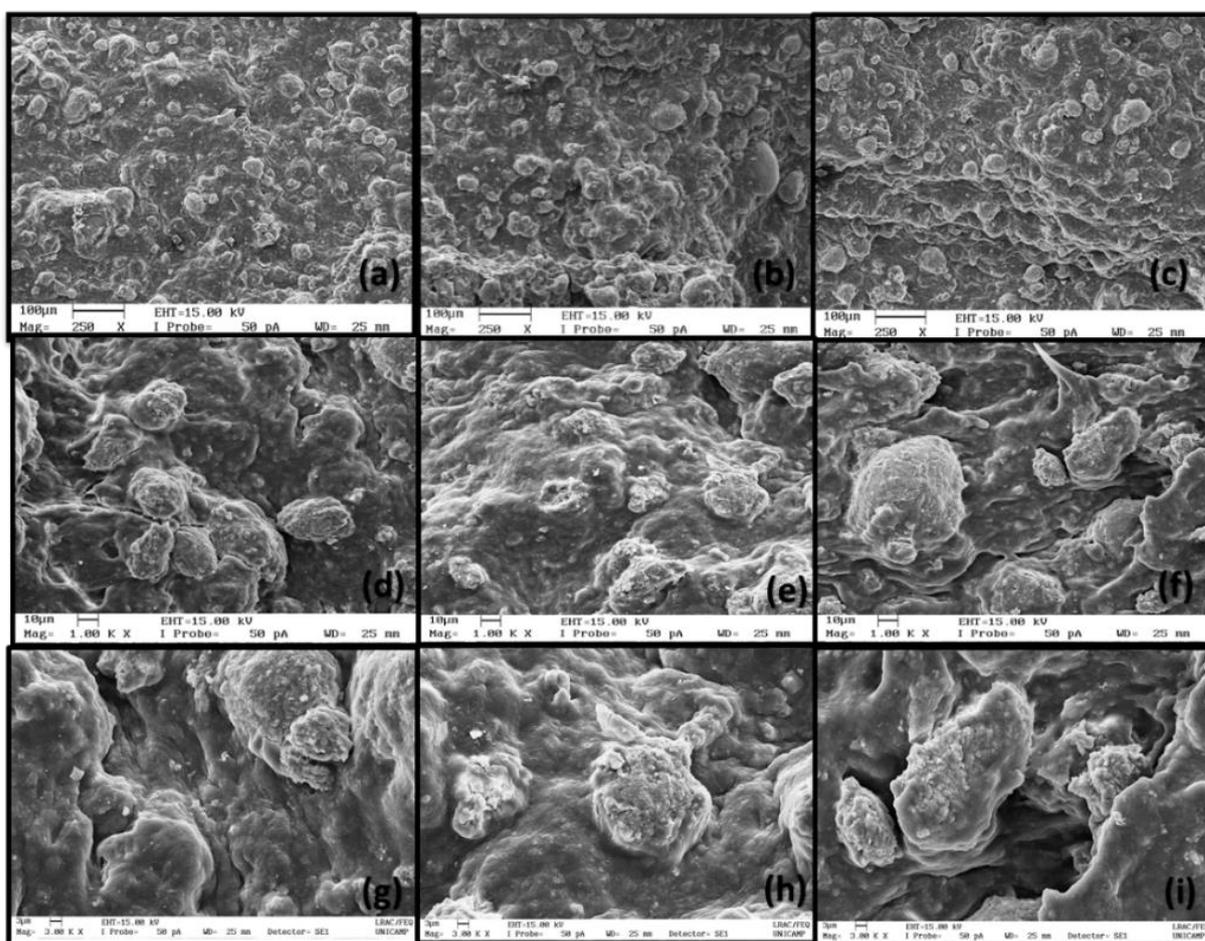


Figura 4.44. Fotos do lodo seco analisado por MEV: (a) 80 °C (250x); (b) 110 °C (250x); (c) 140 °C (250x); (d) 80 °C (1000x); (e) 110 °C (1000x); (f) 140 °C (1000x); (g) 80 °C (3000x); (h) 110 °C (3000x); (i) 140 °C (3000x).

4.7 Secagem solar do lodo

Os ensaios de secagem foram realizados em janeiro de 2017. Os dias apresentavam altas temperaturas (T_{amb}), próximos ao secador solar, que variaram entre 22,1 a 42,5 °C.

A temperatura no interior do secador (T_i) também era frequentemente medida e atingiu picos de até 57,8 °C. A umidade relativa do ar variou entre 32 e 65 %, com exceção do quinto dia de secagem, em que houve chuvas. A Figura 4.45 mostra as condições climáticas de temperatura ambiente (T_{amb}), umidade relativa do ar (UR) e temperatura no interior do secador (T_i) monitoradas durante a secagem.

O comportamento das temperaturas é coerente com resultados encontrados pelo autor em trabalhos anteriores e outros pesquisadores na área da secagem solar (SCALCON, et al., 2014; BENNAMOUN, 2013a; BENNAMOUN, 2012), com picos em horários perto do meio dia e à tarde e diminuição das temperaturas menores ao entardecer, que perduram até o início das manhãs. A umidade relativa do ar, por sua vez foi menor em períodos de maiores temperaturas, e à noite e pela manhã eram maiores.

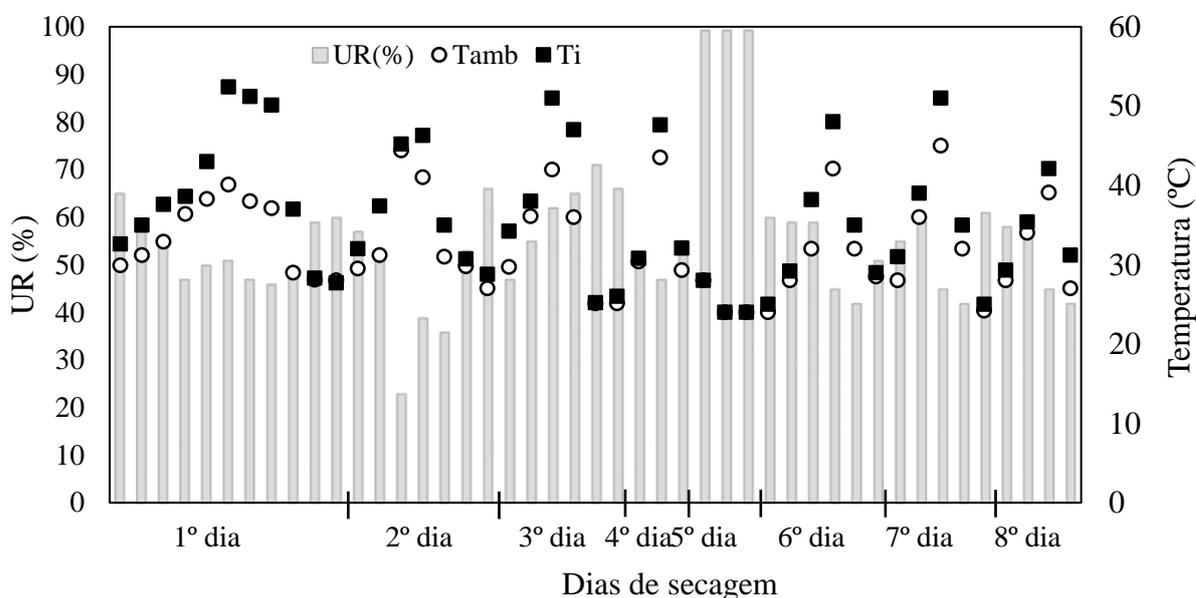


Figura 4.45. Condições climáticas de temperatura ambiente (T_{amb}), umidade relativa do ar (UR) e temperatura no interior do secador (T_i) durante a secagem solar.

As amostras atingiram o equilíbrio no início do oitavo dia de secagem, porém foram mantidas no secador até o entardecer para garantir que não houvesse variação de massa, totalizando 178 horas de residência no secador solar. Após a secagem, foi determinado o teor

de umidade das amostras de lodo, que variou entre 8 e 12 %, acima do percentual permitido pela legislação (CONAMA, 2006).

Com exceção do 5º dia, as condições climáticas apresentaram comportamentos semelhantes. Apesar da ocorrência de chuvas neste dia, não houve aumento variação da massa de lodo, e considerou-se assim apenas uma pausa no processo. Portanto, pode-se afirmar que não houve nenhuma alteração climática significativa no decorrer da secagem, que possa ter influenciado nas taxas de secagem.

As condições climáticas observadas durante o ensaio podem ser consideradas favoráveis à secagem, pois apresentaram altas temperaturas em relação à média anual do Paraná, que situa-se entre 20 e 22 °C (INMET, 2016) e pouco ocorrência de chuvas, neste mesmo período.

A Figura 4.46 mostra a variação do teor de umidade do lodo em função do tempo de secagem e as Figura 4.47 e 4.48 mostram as taxas de secagem em função do adimensional de umidade e do teor de umidade das amostras (b.s.) durante todos os dias e as taxas de secagem em função do adimensional de umidade e do teor de umidade das amostras (b.s.) somente a partir do terceiro dia de secagem, respectivamente.

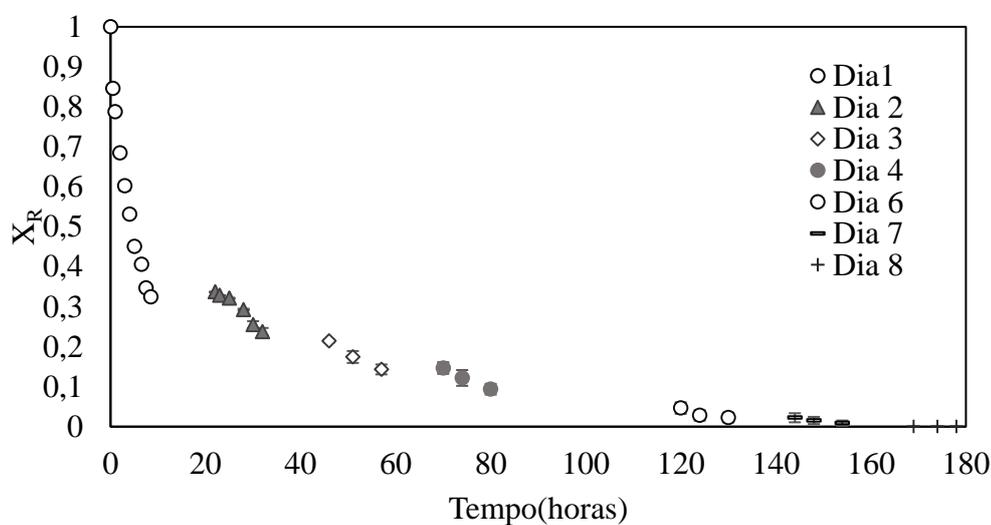


Figura 4.46. Teor de umidade adimensional do lodo em função do tempo de secagem solar.

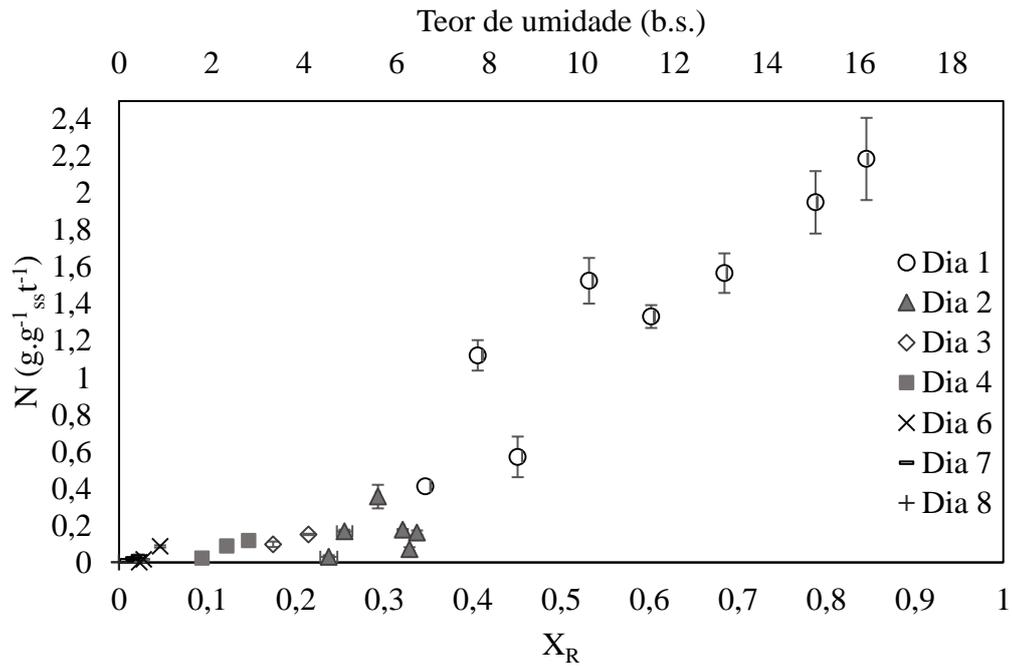


Figura 4.47. Taxas de secagem em função do adimensional de umidade (X_R) e teor de umidade médio das amostras.

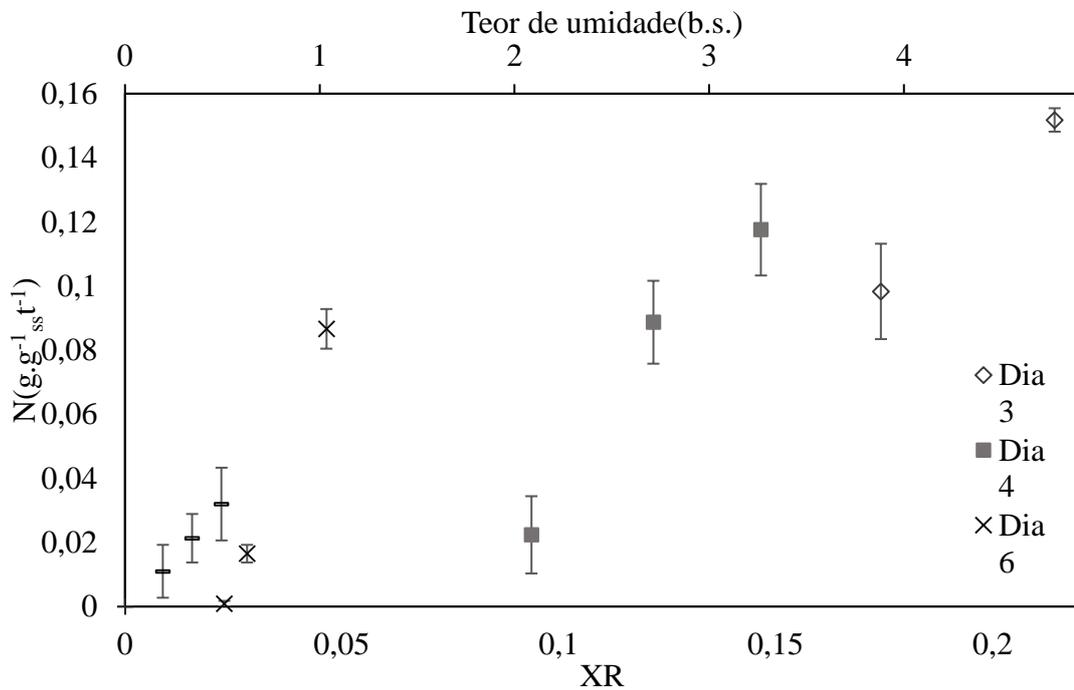


Figura 4.48. Taxas de secagem em função do adimensional de umidade (X_R) e teor de umidade médio das amostras a partir do terceiro dia de secagem.

O teor de umidade inicial das amostras na secagem solar, X_0 era de 19,11 (b.s.). Este valor foi maior do que o teor de umidade inicial do lodo nos ensaios de secagem convectiva pois na preparação das amostras para os ensaios de secagem solar o lodo não passou pela operação de filtração à vácuo.

Esta etapa não foi realizada devido às características construtivas deste equipamento, que possibilitam a ocorrência das operações de filtração por gravidade e secagem solar simultaneamente. A desidratação do lodo por meio de filtração foi observada somente nos dois primeiros dias. Nota-se, por meio da Figura 4.47 que neste período, os teores de umidade eram maiores do que $4,66 \pm 0,19$ (b.s.). A Figura 4.49 representa a redução simultânea da massa do lodo e o acúmulo da massa de água retirada por filtração durante os dois primeiros dias do processo. A faixa de intervalo sem pontos representa o período noturno.

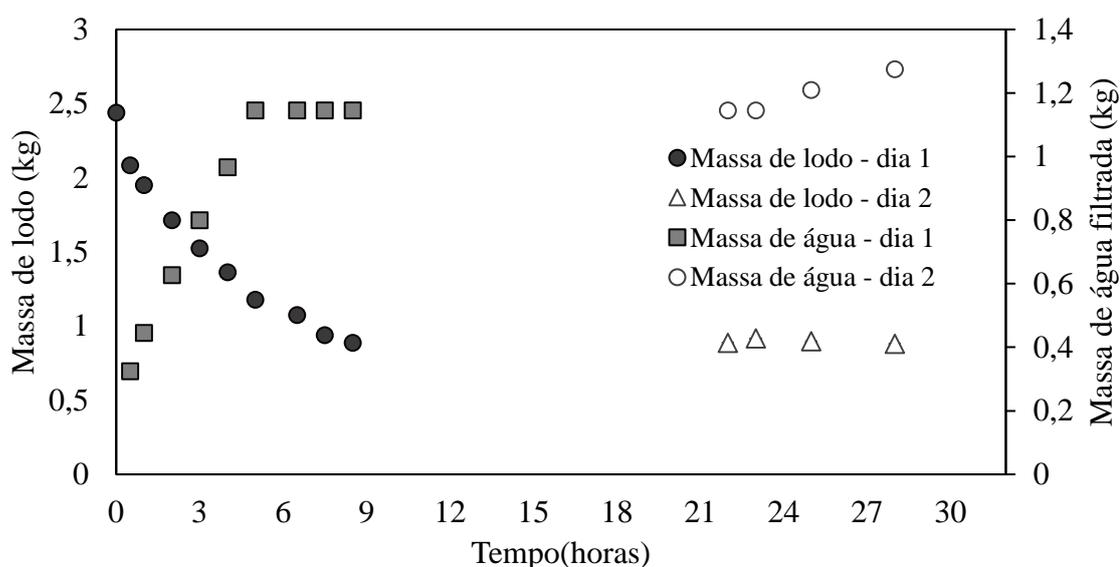


Figura 4.49. Variação das massas de lodo e água retirada por filtração nos dois primeiros dias de secagem solar.

As maiores taxas de secagem e a redução mais significativa de umidade foram obtidas no primeiro dia de secagem. Quando se analisa as Figuras 4.46, 4.47 e 4.49 fica evidente que a filtração teve uma grande influência na diminuição do teor de umidade e nas altas taxas de desidratação. Isto também pode ser confirmado quando se faz um balanço de massa da operação, como mostra a Figura 4.50 Na Figura $X_{LB,A}$ e $X_{LB,S}$ representam a fração mássica de água e sólidos, respectivamente, no lodo bruto e $X_{LS,A}$ e $X_{LS,S}$ representam a fração mássica de água e sólidos, respectivamente, no lodo seco.

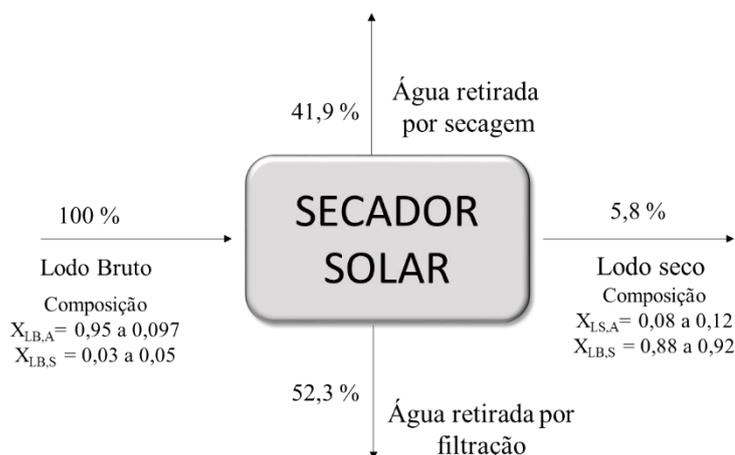


Figura 4.50. Balanço de massa da operação de secagem solar testada.

Analisando as taxas de secagem, nota-se que, apesar do alto teor de umidade do lodo, não houve período de secagem constante. Diferentemente do que houve nos ensaios de secagem convectiva, as taxas de secagem foram decrescentes desde o início da secagem. A maior taxa de desidratação ocorreu nos primeiros trinta minutos de operação, com um valor médio de $5,86 \pm 0,29 \text{ g.g}^{-1}_{\text{bs}} \text{ min}^{-1}$. Este ponto não foi apresentado na Figura 4.47 devido à escala do gráfico, que prejudicaria a visualização dos demais pontos.

Ao final do segundo dia de secagem, o teor de umidade das amostras era de $4,66 \pm 0,19$ (b.s.), as variações na massa eram muito pequenas e as taxas de secagem eram menores do que $0,15 \pm 0,04 \text{ g.g}^{-1}_{\text{bs}} \text{ min}^{-1}$. Não é possível afirmar que este teor de umidade ($4,66 \pm 0,19$ b.s.) represente o ponto crítico do material, já que as curvas de secagem não apresentaram período de taxas constantes. Entretanto, pode-se notar que, a partir deste ponto, as taxas de secagem caem significativamente, a operação de filtração não ocorre mais e o lodo começa a apresentar rachaduras, como ilustrado na Figura 4.51.

Este é um fenômeno típico de períodos de secagem decrescente (LI et al., 2014; LEONARD et al., 2014; LI et al., 2015). Além disso, este valor está contido na faixa entre $4,13 \pm 0,07$ e $5,45 \pm 0,64$ (b.s.), em que foram encontrados os pontos críticos (X_C) do lodo nos ensaios de secagem convectiva. Portanto, é perceptível que este teor de umidade, de $4,66 \pm 0,19$ (b.s.), representa um importante ponto de mudança de comportamento na secagem solar, representando o momento em que o lodo já perdeu sua água não ligada (STRUMILLO e KUDRA, 1986).



Figura 4.51. Aparecimento rachaduras ao final do segundo dia de secagem solar.

4.8 Eficiência das operações

Neste trabalho foram avaliadas as eficiências energéticas das operações de secagem convectiva e secagem solar. Para tanto, foram calculados os parâmetros de desempenho descritos pelas equações apresentadas no item 2.8 de acordo com a metodologia descrita no item 3.6.5 utilizando os dados experimentais dos ensaios de secagem apresentados nos itens 4.2 e 4.7.

4.8.1 Eficiência energética da secagem convectiva

A Tabela 4.17 mostra os fatores de desempenho médios calculados para os ensaios. Enquanto que a Figura 4.52 mostra a eficiência energética (EE) e consumo específico de energia (SEC) para os ensaios.

De acordo com a Figura 4.52 a máxima eficiência energética (12,09 %) e o menor consumo específico de energia ($19,103 \text{ MJ kg}^{-1}$) foram alcançados nos ensaios 5 e 6, sob condições de $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,5 \text{ kg m}^{-1}$, enquanto a mínima eficiência energética (4,49 %) e máximo consumo específico de energia ($47,664 \text{ MJ kg}^{-1}$) foram alcançados nos ensaios 13 e 14 sob as condições de $140 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,3 \text{ kg m}^{-1}$.

Tabela 4.17. Fatores de desempenho para avaliação energética dos ensaios de acordo com o planejamento experimental proposto.

Fatores de desempenho	Ensaio									
	1 e 2	3 e 4	5 e 6	7 e 8	9 e 10	11 e 12	13 e 14	15 e 16	17 e 18	
Eficiência energética (EE) (%)	9,91	11,82	12,09	6,67	7,65	7,42	4,50	5,77	6,30	
Eficiência de secagem (ES) (%)	10,03	11,96	12,23	6,78	7,78	7,54	4,61	5,91	6,45	
Eficiência térmica (ET) (kg MJ ⁻¹)	0,045	0,054	0,055	0,031	0,036	0,035	0,022	0,028	0,030	
Consumo específico de calor (SHC)	22,136	18,562	18,149	32,229	28,089	28,976	46,009	35,897	32,863	
Consumo específico de energia (SEC) (MJ kg ⁻¹)	23,300	19,537	19,103	33,470	29,171	30,093	47,664	37,188	34,046	

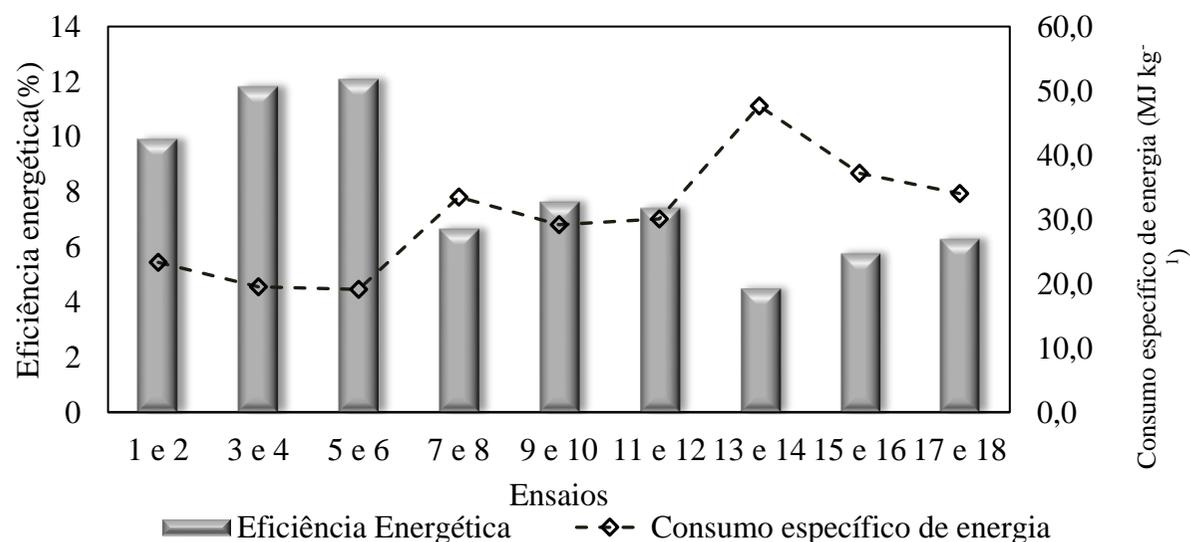


Figura 4.52. Eficiência energética e consumo específico de energia para os ensaios de acordo com o planejamento experimental proposto.

Percebe-se que a eficiência energética aumenta à medida que a temperatura diminui e à medida em que a vazão mássica de ar aumenta. Desta maneira, pode-se afirmar que, apesar de o aumento da temperatura ocasionar diminuição significativa no tempo de secagem (como mostrado no item 4.2), esta redução de consumo energético devido ao menor tempo de funcionamento do secador não é suficiente para compensar o gasto energético para o aquecimento até a temperatura de 140 °C. Já para o caso da vazão mássica do ar, pode-se afirmar que o seu aumento acelera a remoção de umidade do ambiente de secagem e previne a saturação do ar dentro da câmara de secagem, aumentando a eficiência da secagem

Os baixos valores de eficiência energética para secadores convectivos também foram relatados por outros pesquisadores na secagem de vários produtos agrícolas, que obtiveram valores entre 1,91 e 6,76 %, chegando a níveis máximos de 17,65 % em secagem híbrida em secador infra-vermelho convectivo (MOTÉVALI et al., 2014a; MOTÉVALI et al., 2011; CATTON et al., 2011; SAMI et al., 2011). Normalmente, a secagem de materiais agrícolas apresenta apenas taxas decrescentes de secagem, enquanto o produto perde a maior parte da sua umidade durante as fases iniciais de secagem, exigindo mais tempo para perder a umidade restante. Portanto, o secador deve operar mais tempo para remover uma quantidade menor de umidade, o que pode justificar a baixa eficiência energética e alto consumo específico de energia de secadores convectivos.

Apesar dos ensaios apresentarem também os períodos de taxas de adaptação e constantes, o período de taxa de secagem decrescente foi predominante e responsável pelos baixos valores de eficiência energética.

A relação entre baixa eficiência e período de taxa decrescente pode ser reafirmada quando se comparam as três condições de secagem discutidas no item 4.2, em que se avaliou as cinéticas de secagem convectiva do lodo. A Tabela 4.18 mostra a porcentagem que o período decrescente representa em relação ao tempo total ($(t_{decrecente}/t_{total}) \cdot 100$ %).

Tabela 4.18. Percentual de período decrescente em relação ao período total de secagem.

Condição de secagem	% de período decrescente
T= 80 °C e $Q_{ar} = 0,3 \text{ kg min}^{-1}$	47,5
T= 110 °C e $Q_{ar} = 0,4 \text{ kg min}^{-1}$	62,1
T= 140 °C e $Q_{ar} = 0,5 \text{ kg min}^{-1}$	63,0

Nota-se que, para as condições de temperatura de 110 e 140 °C, a maior parte do processo ocorre com taxas de secagem decrescente e mesmo proporcionando condições mais favoráveis à secagem, do ponto de vista da rapidez do processo, estas condições mais severas são menos eficientes do ponto de vista energético.

Além disso, deve-se considerar também o fato de que altas velocidades de secagem e gradientes de umidade intensos através do material ocasionam o endurecimento da camada superficial, que dificulta a secagem (MAYOR e SERENO, 2004; GULLATI e DATA, 2015).

Semelhantemente ao que foi observado na avaliação do encolhimento do lodo, apesar de fornecerem condições favoráveis para a secagem, as altas temperaturas podem inibir a perda de umidade e a secagem se torna menos eficiente.

Em condições mais brandas, a difusão da água e a evaporação de umidade permanecem equivalentes por mais tempo, não são formados gradientes de umidade acentuados no material, assim são evitados ou diminuídos o endurecimento da camada superficial e o encolhimento.

Os valores obtidos de eficiência térmica estão próximos aos obtidos por Lima (1998) na secagem de grãos em leito fixo, que foram de 0,015 a 0,049 kg MJ⁻¹. O consumo específico de calor (SHC) foi mais alto do que os valores obtidos por VIEIRA et al (2007) na secagem de polpa de celulose, que obtiveram valores entre 9,761 e 21,075 MJ kg⁻¹ e menores do que os valores obtidos por Tulasidas et al.(1995) na secagem de uvas em um secador convectivo, cujos valores variaram entre 81,15 e 90,35 MJ kg⁻¹.

De maneira geral, todos os fatores de desempenho analisados levam à percepção de que as condições mais brandas de temperatura e condições mais elevadas de vazão mássica do ar apresentam maior eficiência de secagem convectiva. Desta maneira, de todas as condições estudadas, a mais eficiente do ponto de vista energético foi a condição de ensaios 5 e 6, em que foram aplicadas a menor temperatura (80 °C) e maior vazão mássica de ar (0,5 kg s⁻¹).

4.8.2 Eficiência de desidratação da secagem solar

Por meio das metodologias propostas por Leon et al (2002) e Banout et al. (2011), avaliou-se a eficiência global do secador solar (η_d) (Equação 2.34). Por meio da Equação 2.35, foram calculadas as eficiências do primeiro dia e dos dois primeiros dias de secagem em que, notadamente, a redução de umidade foi maior. A Tabela 4.19 apresenta os resultados descritos.

Tabela 4.19. Eficiência global da secagem solar (η_d).

	Tempo total	Primeiro dia	2 primeiros dias
Eficiência (%)	17,35	70,88	41,16

A eficiência global do processo de secagem solar foi de 17,35 %. Porém, quando se compara o processo para o primeiro dia de secagem ou para os dois primeiros dias de secagem as eficiências aumentam consideravelmente, atingindo percentuais de 70,88 % e 41,16%.

Observa-se que a maior remoção de umidade na secagem solar, que já foi discutida no tópico 4.7, ocorreu nos dois primeiros dias proporcionando maiores eficiências para esses dias em comparação com a eficiência global.

Os valores de eficiência encontrados na literatura variam entre 7 % e 17 % (MOTEBALI et. 2001; ALTOBELLI et al., 2004). Segundo Altobelli et al. (2004), a eficiência máxima de um secador solar sem a presença de convecção forçada é de 20 %. Porém, a utilização de sistema de convecção forçada pode aumentar consideravelmente a eficiência do processo, chegando a até 60 %, para fluxos mássicos de $0,1 \text{ kg s}^{-1}$. A partir deste ponto, os autores não observaram influência da vazão mássica de ar sobre a eficiência.

Nota-se que, para este estudo, em que não se utilizou a convecção forçada, quando considera-se somente os dois primeiros dias de secagem, a filtração se mostrou uma alternativa para aumentar a eficiência da operação, com a vantagem de não demandar de energia. Para avaliar mais detalhadamente a eficiência do secador solar, foi calculada a eficiência energética para cada um dos dias de operação do secador, levando em consideração apenas o fluxo mássico de água removido no dia em questão (Figura 4.52).

A Figura 4.53 mostra que, do ponto de vista da eficiência de desidratação, é mais viável utilizar o secador apenas no primeiro dia, cujas eficiências são 70,88 % e 11,42 %, respectivamente, resultando em uma eficiência combinada de 41,16 % (Tabela 4.19).

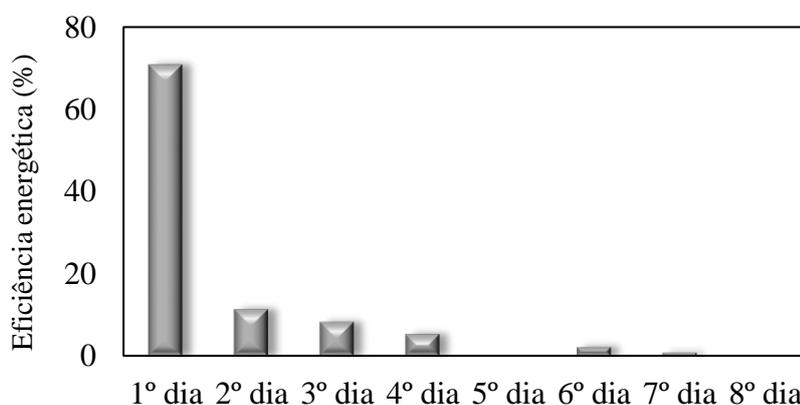


Figura 4.53. Eficiência energética do secador em cada dia de operação.

No terceiro dia, a eficiência foi de 8,34 %, já muito próxima dos menores valores encontrados na literatura. Nos dias seguintes, as eficiências são ainda menores. É válido recordar que, ao final do segundo dia de secagem, o lodo havia atingido o teor de umidade de $4,66 \pm 0,19$ (b.s.), estando dentro da faixa do teor de umidade crítico (X_C), determinado nos ensaios de secagem convectiva.

A relação entre a baixa eficiência da secagem e período de taxa decrescente já foi reportada por alguns autores (MOTÉVALI et al., 2014a; MOTÉVALI et al., 2011; CATTON et al., 2011; SAMI et al., 2011) e também observada neste trabalho, na avaliação da eficiência da secagem convectiva. Apesar da ausência do período de taxas constantes, o que pode justificar as baixas eficiências a partir do terceiro dia é que, a água restante no lodo é a água ligada, que é mais difícil de ser removida (FOUST et al., 1982), por esta razão, apesar de as condições climáticas não apresentarem grandes variações e continuarem favoráveis à secagem, a remoção de umidade é significativamente reduzida.

Deve-se ressaltar que não se pode comparar as eficiências calculadas na secagem convectiva e na secagem solar, visto que as condições operacionais e o teor de umidade inicial do lodo nas operações eram diferentes. Além disso, grande parte da umidade retirada no secador solar se deve à filtração, que não foi considerada nas equações utilizadas no trabalho.

4.9 Avaliação das condições e do produto obtido

Por meio da avaliação dos resultados obtidos nas etapas experimentais, foram feitas algumas considerações a respeito das condições de secagem, do produto obtido e dos objetivos do trabalho.

Em relação à redução da quantidade de resíduos, os resultados foram excelentes, já que a operação de secagem reduziu entre 76 e 85 % o volume total do resíduo. Quando se estende a comparação ao processo total, incluindo a desidratação mecânica, a redução total em massa foi 99,3 %, como mostra balanço de massa na Figura 4.55.

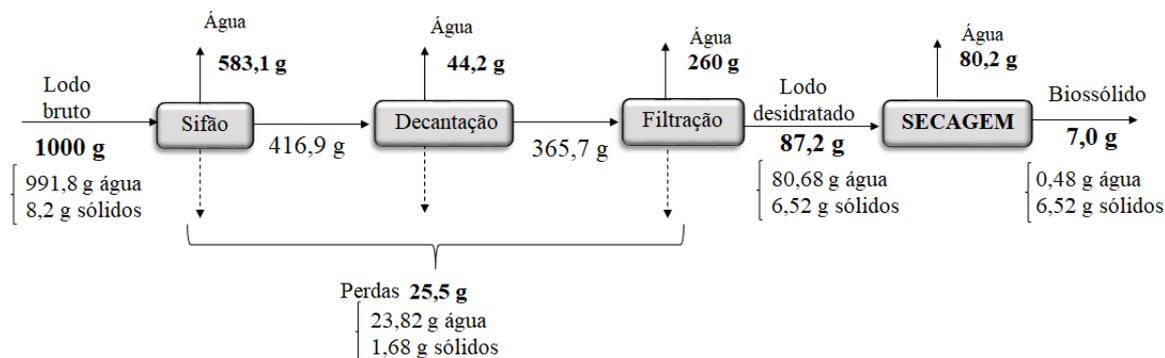


Figura 4.54. Balanço de massa das etapas de desidratação mecânica e secagem convectiva.

Diferentemente do que ocorre com alimentos, por exemplo, a característica visual não é um fator decisivo para a comercialização de biossólidos. Inclusive, as Normas que estabelecem as exigências físico-químicas e microbiológicas para sua utilização agrícola não estabelecem qualquer padrão forma física ou aparência para comercialização de biossólidos e biofertilizantes (CONAMA, 2006).

Entretanto, buscou-se acrescentar ao produto final atributos que o conferissem atratividade comercial. No que se refere à características, exigências e especificações dos fertilizantes minerais destinados à agricultura, a Norma nº 46 do Ministro da Agricultura, Pecuária e Abastecimento define algumas especificações para os fertilizantes de natureza sólida. Os fertilizantes sólidos podem ser: granulado, mistura de grânulos, microgranulado, farelado, pó ou pastilha (MAPA, 2016).

Os fertilizantes em forma de bastões ou pastilhas são colocados diretamente na terra e têm a vantagem de apresentar uma ação lenta e gradativa, pois vão liberando os nutrientes aos poucos. Por outro lado, eles tendem a concentrar os sais minerais na área de terra em que foram fixados, podendo queimar as raízes mais próximas.

O biossólido proveniente da secagem convectiva foi obtido na forma de grânulos. Por meio da trituração e de uma prensa hidráulica, foi possível transformá-lo em pastilhas, como mostra a Figura 4.54.



Figura 4.55. Pastilhas de biossólido.

Desta maneira, o produto final obtido pode ser apresentado e aplicado de duas formas distintas: na formula de grânulos ou na forma de pastilhas, ampliando sua abrangência de utilização.

Os resultados mostraram o método proposto neste trabalho para o tratamento de lodo de indústria de gelatina, por meio da secagem convectiva de fluxo ascendente, se mostrou eficiente na obtenção do biossólido, pois as características requeridas pela legislação brasileira vigente foram atendidas (CONAMA, 2006). O produto final apresentou características físico-químicas adequadas e sua concentração microbiológica o qualifica como biossólido Classe A, ou seja, de aplicação irrestrita.

A secagem térmica é um dos onze processos de tratamento de lodo para a redução adicional de agentes patogênicos. De acordo com a legislação, para ser considerado um processo eficiente na redução de agentes patogênicos do lodo a um nível Classe A, a secagem térmica deve garantir que a umidade do lodo seja menor ou igual a 10%, e que a temperatura das partículas de lodo ou a temperatura de bulbo úmido do gás em contato com o lodo deve ser superior a 80 °C (CONAMA, 2006). Neste estudo, as duas condições foram atendidas.

No que se refere à secagem solar, apesar de não resultar em um produto que atenda às especificações, pois apresentou teor de umidade acima de 10 %, verificou-se uma redução significativa de umidade no processo, com altos níveis de eficiência energética nos dois primeiros dias.

Por esta razão, uma secagem combinada entre secagem solar e secagem convectiva pode se tornar um método eficaz no tratamento do lodo estudado e obtenção de um biossólido. A secagem combinada alia a eficiência da secagem solar e significativa redução mássica do teor de umidade inicial, com a capacidade da secagem convectiva de desinfecção microbiológica e

redução da umidade a níveis menores de 10%. Assim, atendendo simultaneamente às características de condições do processo e produto final e levando em consideração fatores econômicos como eficiência energética e redução do volume, que diminuem custos com fornecimento de energia, e transporte e armazenamento, respectivamente.

Segundo Kacprzak et al. (2017), as novas estratégias para uma solução de gerenciamento destes resíduos devem enquadrar-se na tendência da eco-inovação, a fim de cumprir o conceito principal da Comissão Européia "reduzir, reutilizar, reciclar". Esta estratégia também é adotada pelo governo brasileiro, que instituiu em 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), cujos objetivos são a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Esta é entendida como a hierarquia de gestão de resíduos mais preferível.

Segundo LeBlanc et al. (2009), nos últimos anos, as principais tendências no desenvolvimento de comunidades humanas sustentáveis incluem a investigação das melhores estratégias para a reutilização destes materiais.

Estas estratégias no gerenciamento de resíduos sólidos vão ao encontro do objetivo deste trabalho e resultados obtidos. O trabalho possibilitou avaliar a secagem como método de tratamento de lodos digeridos de indústria de gelatina. Por meio de objetivos específicos foram avaliadas a influência de diversos fatores na operação e na qualidade do produto final.

Como resultado alcançou-se um método eficiente no tratamento destes resíduos que, de início, reduziu drasticamente a quantidade de resíduos e posteriormente possibilitou sua reutilização. Além disso, foram trazidas novas informações que podem contribuir na solução de problemas ambientais, na área de disposição de resíduos sólidos, tratamento e reaproveitamento.

5 CONCLUSÕES

A temperatura e velocidade do ar influenciaram as curvas de secagem e as propriedades físicas do lodo, sendo a influência da temperatura maior do que a influência da vazão mássica do ar. Os comportamentos resultantes dessas mudanças dependem da faixa de temperatura, devido a mudanças estruturais no material, como fenômeno de encolhimento, rachaduras e endurecimento da camada superficial.

As curvas de secagem convectiva obtidas na secagem de lodo deste estudo apresentaram quatro períodos distintos: o primeiro, de adaptação; seguido de um período de taxas constantes, e dois períodos distintos de taxa de secagem decrescente, tendo sido observado o teor de umidade crítico do lodo (X_C), entre $4,13 \pm 0,07$ e $5,45 \pm 0,64$ (b.s.). O ponto que distingue o primeiro e segundo período de taxa decrescente, denominado segundo teor de umidade crítica parametrizado, X^* , variou entre $1,41 \pm 0,07$ e $2,78 \pm 0,05$ (b.s.). Este ponto também foi observado nas curvas de secagem em estufa, na faixa entre 1,5 e 2 (b.s.). Os experimentos de secagem convectiva e em estufa confirmaram a ocorrência do fenômeno de encolhimento, que foi inibido sob temperaturas mais elevadas, devido ao endurecimento da camada superficial.

No que se refere à eficiência de secagem, no secador convectivo, a condição mais eficiente foi a de menor temperatura (80 °C) e maior vazão mássica de ar (0,5 kg min⁻¹), que apresentou maiores eficiência energética (EE) e de eficiência de secagem (ES) e menor consumo específico de calor (SHC) e de energia (SEC) por quilograma de água evaporada. Isto porque para as maiores temperaturas (110 e 140 °C) o período de taxa decrescente foi predominante e foi o responsável pela diminuição da eficiência energética e aumento no consumo específico de calor e energia. Já o aumento da vazão mássica do ar promoveu um aumento na eficiência energética pois retira o ar saturado de umidade, favorecendo a secagem. O secador solar mostrou uma eficiência alta quando se considerou apenas o primeiro dia de secagem (70,88 %) ou os dois primeiros dias de secagem (41,16 %). Entretanto, quando se considera o tempo total de secagem, a eficiência energética cai para 14,35 %. Do ponto de vista energético, isto indica que sua utilização é mais vantajosa apenas no início da secagem (para teores de umidade maiores do que $4,66 \pm 0,19$ b.s.);

As características do lodo após a secagem convectiva na condição mais branda (T=80°C e Q=0,3 kg min⁻¹) atenderam à todos requisitos exigidos pela legislação vigente (CONAMA, 2006) e o lodo foi classificado como Classe A, cujo uso não tem restrições. De modo geral,

conclui-se que o objetivo do trabalho foi cumprido pois os resultados possibilitaram a avaliação da secagem de lodos da indústria de gelatina, em que foi possível analisar diversas condições e equipamentos de secagem, além apresentar um método eficiente no tratamento destes lodos e de trazer novas informações para a busca de uma disposição adequada de resíduos sólidos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Em trabalhos futuros sugere-se a realização de experimentos de secagem combinada e realização de análises da qualidade do produto final, para verificar seu potencial de aplicação como fertilizante. Para complementar o trabalho, deve-se realizar uma análise da eficiência energética global do processo, de modo a buscar um processo eficaz para o tratamento do lodo e que propicie diminuição com custos energéticos.

6 REFERÊNCIAS

- ABREU, C. País é o maior celeiro de gelatina do mundo. AGÊNCIA DE NOTÍCIAS BRASIL ÁRABE. Disponível em: < <http://anba.com.br/noticia/7422117/industria/pais-e-o-maior-celeiro-de-gelatina-do-mundo/?indice=1870>>. Acesso em: 08/10/2018.
- ABREU JR. C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. *Tópicos Ciência do Solo*, v. 4, p.391-470, 2005.
- ABREU JR., C.H.; MURAOKA, T. & OLIVEIRA, F.C. Carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre em solos tratados com composto de lixo urbano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p.769-780, 2002.
- ACRA, A.; RAFFOUL, Z.; KARAHAGOPIAN, Y. Solar Disinfection of drinking Water and Oral Rehydration Solutions. *Guidelines for Household Application in Developing Countries*. Department of Environmental Health, Faculty of Health Sciences – American University of Beirut. UNICEF. Beirut, Lebanon, 1984.
- AFZAL, T.M.; ABE, T. Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying. *Comput. Electron. Agric*, n, 26, p. 137-45, 2000.
- AGHBASHLO M, KIANMEHR MH, SAMIMI-AKHJAHANI H. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *J Energy Convers Manage*. v. 49, p. 2865–71, 2008.
- ALTOBELLI, F.; CONDORÍ, M.; DURÁN, G.; MARTINEZ, C. Solar dryer efficiency considering the total drying potential. Application of this potential as a resource indicator in north-western Argentina. *Solar Energy* v. 105, p. 742–759, 2014.
- ALVARENGA, P., MOURINHA, C., FARTO, M., SANTOS, T., PALMA, P., SENGO, J., MORAIS, M. C., CUNHA-QUEDA, C. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *Waste Management* v. 40, p. 44-52, 2015
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19th edition, Washington, 1998.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte, DESA/UFMG, 484 p., 2001.

- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. Gestão pública do uso agrícola do lodo de esgoto. In: _____. Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.
- Association of Official Analytical Chemistries - AOAC. Official methods of analysis of the AOAC. 18 st ed. Gaithersburg: AOAC International; 2005. 1526p.
- ARAÚJO, J. C. Efeito do lodo de indústria de gelatina na Fertilidade do solo e no Capim-Tanzânia. 2006. 36f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2006.
- ARLABOSSE P.; FERRASSE J. H.; LECOMPTE D.; CRINE M.; DUMONT Y.; LÉONARD A. Efficient sludge thermal processing: from drying to thermal valorisation. *Modern Drying Technology: EnergySavings* v.4, p. 296-329, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- BAHU, R. Energy consumption in dryer design. In: Mujumdar AS, Filkova I, editors. *Drying* 091. Amsterdam: Elsevier; 1991. p. 553-557.
- BANOUT, J.; EHL, P.; HAVLIK, J.; LOJKA, B.; POLESNY, Z.; VERNER, V. Design and performance evaluation of a double-pass solar dryer for drying of red chilli (*Capsicum annum* L.). *Solar Energy*. v. 85, p. 506–515, 2011.
- BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 27, n. 4, p. 565-580, 2006.
- BARROS NETO, B., SCARMÍNIO, I.S., BRUNS, R.E. *Planejamento e otimização de experimentos*. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995.
- BENAMOUN, L.; FRAIKIN, L.; LÉONARD, A. Modeling and simulation of heat and mass transfer during convective drying of wastewater sludge with introduction of shrinkage phenomena. *Drying Technology*. v. 32, n. 1, p. 13-22, 2014.

- BENNAMOUN, L.; ARLABOSSE, P.; LÉONARD, A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 28, p. 29-43, 2013a.
- BENNAMOUN, L.; KAHLERRAS, L.; MICHEL, F.; COURARD, L.; SALMON, T.; FRAIKIN, L. Determination of moisture diffusivity during drying of mortar cement: experimental and modeling study. *International Journal of Energy Engineering*. v. 3, n.1, p. 1-6, 2013b.
- BENNAMOUN, L.; CRINE, M.; LEONARD, A. Convective drying of wastewater sludge: introduction of shrinkage effect in mathematical modeling. *Drying Technology*. V. 31, P. 643-654, 2013c.
- BENNAMOUN, L. Solar drying of wastewater sludge: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 16, p. 1061-1073, 2012.
- BENNAMOUN, L.; BELHAMRI, A.; LÉONARD, A. Contribution to the modelling of wastewater sludge drying kinetics: study of the operating conditions effect. IN: 17th International Drying Symposium (IDS 2010), Magdeburg, Germany, 2010.
- BENNAMOUN, L.; BELHAMRI, A.; ALI MOHAMED, A. Application of a diffusion model to predict drying kinetics changes under variable conditions: experimental and simulation study. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. v. 5, n. 2, p. 177-91, 2009.
- BENNAMOUN, L.; BELHAMRI, A. Mathematical description of heat and mass transfer during deep bed drying: Effect of product shrinkage on bed porosity. *Applied Thermal Engineering*. v. 28, p. 2236–2244, 2008.
- BENNAMOUN, L.; BELHAMRI, A. Numerical simulation of drying under variable external conditions: application to solar drying of seedless grapes. *Journal of Food Engineering*. v. 76, n. 2, p. 179-87, 2006.
- BIOAGRI AMBIENTAL. Boletim de análise. Piracicaba, 2005. 19p.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.
- BRITO, F.L.; ROLIM, M.M. Comportamento do efluente e do solo fertirrigado com vinhaça. *Agropecuária Técnica*, v. 26, p. 60-67, 2005.
- BRUNAUER, S.; EMMET, T.H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.
- BUTTON, S. T. IM 317 – Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. Apostila. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- CARVALHO, S. M. L. de. *Gerenciamento de resíduos hospitalares e avaliação da secagem como método de redução de volume e grau de periculosidade*. (2003). 196f. Tese (Doutorado

- em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion, 2nd Ed.; Clarendon Press: Oxford, UK, 1975.
- CATTON W, CARRINGTON G, SUN Z. Exergy analysis of an isothermal heat pump dryer. *Energy* 2011;36:4616–24.
- CHINNAN, M.S.; BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, v. 18, p. 83-88, 1985.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação. São Paulo, 1999, 32p. (Manual Técnico, 4.230).
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. Manual Técnico, 4.231. São Paulo, 2006a.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. Lodos de curtumes – critérios para o uso em áreas agrícolas e procedimentos para apresentação de projetos. Manual Técnico, 4.233. São Paulo, 2006b.
- CONDORÍ, M.; SARAIVIA, L. The performance of forced convection greenhouse dryers. *Renewable Energy* v. 13, n. 4, p. 453–469, 1998.
- CONDORÍ, M.; SARAIVIA, L.; ECHAZÚ, R. Solar drying of sweet pepper and garlic using a tunnel greenhouse dryer. *Renewable Energy* v. 22, n. 4, p. 447– 460, 2001.
- CONDORÍ, M.; SARAIVIA, L. Analytical model for the performance of the tunnel-type greenhouse dryer. *Renewable Energy* v. 28, n. 3, p. 467–485, 2003.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. RESOLUÇÃO No 375 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, 2006.
- COOK, E. M.; DUMONT, H. D. Process drying practice. New York: McGraw-Hill, 1991.
- CRANK, J. The mathematics of diffusion. Clarendon Press, Oxford, 2nd edition, 1975.
- DANIEL, L. A. *Processos de Desinfecção e Desinfetantes Alternativos na Produção de Água Potável*. 1º Edição.. São Carlos: RiMa Artes e Textos, 2001.
- DANIEL, L. A.; BRANDÃO, C. C. S.; GUIMARÃES, R. J.; LUCA, S. J. Métodos Alternativos para Desinfecção de Águas de Abastecimento. *Rev. Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 5, n. 51, p. 39-45, 2000.

- DANISH, M.; JING, H.; PIN, Z.; ZIYANG, L.; PANSHENG, Q. A new drying kinetic model for sewage sludge drying in presence of CaO and NaClO. *Applied Thermal Engineering*, v. 106, p. 141–152, 2016.
- DENG, W.; LI, X.; YAN, J.; WANG, F.; CHI, Y.; CEN, K. Moisture distribution in sludges based on different testing methods. *Journal of Environmental Sciences*. v. 23, n. 5, p. 875–880, 2011.
- DOUGLAS, J. T.; AITKEN, M. N.; SMITH, C. A. Effects of five non-agricultural organic wastes on soil decomposition, and on the yield and nitrogen recovery of Italian ryegrass. *Soil Use and Management, Malden*, v. 19, n. 2, p. 135-138, 2003.
- DURÁN, G.; CONDORÍ, M.; DÍAZ RUSSO, G. Secador solar híbrido para producción continua a escala industrial de pimentón. In: IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA), Cusco, pp. 1–5.112010.
- DURSUN, D., DENTEL, S.K. Toward the conceptual and quantitative understanding of biosolids conditioning: the gel approach. *Water Science and Technology*, v. 59, n. 9, p. 1679-1685, 2009..
- EDWARDS, J., OTHMAN, M., CROSSIN, E., BURN, S. Anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludge: a comparative life cycle assessment in the context of a waste service provision. *Bioresource Technology*. v. 223, p. 237–249, 2017.
- ENVIRONMENT, E.C.D., 2014. Ex-post Evaluation of Certain Waste Stream Directives. BIO Intelligence Service.
- EPA - United States Environmental Protection Agency - Code of Federal Regulations 40 CFR Part 503 “Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge”, 2003.
- ERDEM, N.; OK, S. S. Effect of brewery sludge amendments on some chemical properties of acid soil in pot experiments. *Bioresource Technology*, Oxford, v. 84, n. 3, p. 271-273, 2002.
- ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; MÓDENES, A. N.; OLIVEIRA, A. P.; TRIGUEIROS, D. E. G. Influence of lead-doped hydroponic medium on the adsorption/bioaccumulation processes of lead and phosphorus in roots and leaves of the aquatic macrophyte *Eichhornia crassipes*. *Journal of Environmental Management*. v. 130, p. 199-206, 2013.
- FASINA, O.O. Thermodynamic properties of sweetpotato. *Journal of Food Engineering*, v. 75, p. 149–155, 2006.
- FERNANDES, C. Esgotos Sanitários. João Pessoa: Ed. Univ./UFPB, 1997, 435p. Reimpressão 2000.

- FERREIRA, A. G.; GONÇALVES, L. M.; MAIA, C. B. Solar drying of a solid waste from steel wire industry. *Applied Thermal Engineering*. v. 73, p. 104-110, 2014.
- FIJALKOWSKI, K. RORAT, A.; GROBELA, A. KACPRZAK, J. The presence of contaminations in sewage sludge - The current situation. *Journal of Environmental Management*, v. 203, p. 1126 – 1136, 2017.
- FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; BARROS, S. T. D. PEREIRA, N. C. LIMA, O. C. M. MÓDENES, A. N. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial bagaço de laranja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.6, p.653–659, 2010
- FONSECA, A. F.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. II. Soil acidity, exchangeable cations, and sulfur, boron, and heavy metals availability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Philadelphia, v. 36, n. 13, p. 1983-2003, 2005a.
- FONSECA, A. F.; ALLEONI, L. R. F.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. Cation exchange capacity of an oxisol amended with effluent from domestic sewage sludge. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 62, n. 6, p. 552-558, 2005b.
- FONSECA, A. F.; HERPIN, U.; DIAS, C. T. S.; MELFI, A. J. Nitrogen forms, pH, total carbon in a soil incubated with treated sewage sludge. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v. 50, n. 5, p. 743-752, 2007.
- FORSON, F. K.; NAZHA, M. A. A.; RAJAKARUNA, H. Modeling and experimental studies on a mixed-mode natural convection solar crop -dryer. *Solar Energy*. v. 81, n. 3, p. 346-57, 2007.
- FOUST, A. A.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. Princípios das operações unitárias. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- FRAIKIN, L.; SALMON, T.; HERBRETEAU, B.; LEVASSEUR, J. P.; NICOL, F.; CRINE, M.; LEONARD, A. Impact of storage duration on the gaseous emissions during convective drying of urban residual sludges. *Chem. Eng. Technol.* v. 34, n. 7, p. 1172-1176, 2011.
- FREIRE, F. B., FREIRE, F. B., FREIRE, J. T., PERAZZINI, H. Tópicos em tratamento de resíduos e meio ambiente. São Carlos: Animeris, 2014. 368 p.
- FURMANIAK, S.; TERZYK, A. P.; GAUDEN, P. A. The general mechanism of water sorption on foodstuffs – Importance of the multitemperature fitting of data and the hierarchy of models. *Journal of Food Engineering*, v. 82, p. 528-535, 2007.
- GALDOS, M.V.; DE MARIA, I.C. & CAMARGO, O.A. Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho eutrófico tratado com lodo de esgoto. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 28, p. 569-577, 2004.

- GALLOWAY, H.M. & JACOBS, L.M. Sewage sludge I. Characteristics and management in utilization of municipal sewage sludges on land for agricultural production. Washington, North Central Regional Extension Publication, p.3-17, 1977.
- GEANKOPLIS, C. Transport and Unit Operations. 2nd ed., Prentice-Hall International Inc., New Jersey, USA, 1983.
- GELITA. Fabricação da gelatina em seis etapas. Disponível em < <http://www.gelita.com/pt/solu-es-e-produtos/fabrica-o-da-gelatina-em-seis-etapas> > . Acesso em: 02 ago 2015.
- GONTARD, N.; GUILBERT, S.; CUQ, J. L. Water and glycerol as plasticizer affect mechanical and water vapor barrier properties of na edible wheat luten film. *Journal of Food Science*, v. 58, n. 1, p. 206-211, 1993.
- GOULA, A. M.; KARAPANTSIOS, T. D.; ACHILIAS, D.S.; ADAMOPOULOS, K. G. Water sorption isotherms and glass transition emperature of spray dried tomato pulp. *Journal of Food Engineering*, n. 85, p. 73–83, 2008.
- GUDE, V.G., 2015. Energy positive wastewater treatment and sludge management. *Edorium J. Waste. Manage.* v. 1, p. 10–15, 2015.
- GUIDI, I. M. *Uso do lodo biológico de indústria de gelatina para adubação de cana-de-açúcar*. 2012. 57 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2012.
- GUIMARÃES, R. C. M.; CRUZ, M. C. P.; FERREIRA, M. E.; TANIGUCHI, C. A. K. Chemical Properties of Soils Treated with Biological Sludge from Gelatin Industry. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, p. 653-66, 2012.
- GUIMARÃES, R. C. M. Atributos químicos em solos tratados com lodo biológico de indústria de gelatina. 2009. 58f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2009.
- GULLATI, T.; DATA, A. K. Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, n. 166, p. 119-138, 2015.
- HATAMIPOUR, M. S.; MOWLA, D. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, vol. 55, 3, p. 247-252, 2002.
- HAZAVEH, P.; NAFCHI, A. M.; ABBASPOUR, H. The effects of sugars on moisture sorption isotherm and functional properties of cold water fish gelatin films. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 79, p. 370-376, 2015.

- HEBBAR, H. U.; VISHWANATHAN, K. H.; RAMESH, M. N. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*. v. 65, p. 557–563, 2004.
- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory. I. Temperature effects on drying coefficient. *J. Agric. Eng. Res.*, v. 6, p. 169–74, 1961.
- HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, v. 33, n. 1, p. 29-32, 1952.
- HSU, J.P.; TAO, T.; SU, A.; MUJUMDAR, A.S.; Lee, D.J. Model for sludge cake drying accounting for developing cracks. *Drying Technology*. v. 28, n. 7, p. 922-926, 2010.
- HURON, Y.; SALMON, T.; CRINE, M.; BLANDIN, G; LEONARD, A. Effect of liming on the convective drying of urban residual sludges. *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*n. 5, p. 909-914, 2010.
- INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ – IAP. Utilização agrícola de lodo de ETE. Paraná, 2003.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 02 de janeiro de 2018.
- ISLAM, R.; MUJUMDAR, A. S. Role of product shrinkage in drying rate predictions using a liquid diffusion model. *Int. Comm. Heat. Mass Transfer*, v. 30., n. 3, p. 391-400, 2003.
- IYYEMPERUMAL, K.; GREEN JR., J.; ISRAEL, D. W.; RANELLS, N. N.; SHI, W. Soil chemical and microbiological properties in hay production systems: residual effects of contrasting N fertilization of swine lagoon effluent versus ammonium nitrate. *Biology and Fertility of Soils*, New York, v. 44, n. 3, p. 425-434, 2008.
- JANNOT, Y.; COULIBALY, Y. The “evaporative capacity” as a performance index for a solar-dryer air-heater. *Solar Energy* v. 63, n. 6, p. 387–391, 1998.
- JOHANN, G. Modelagem, simulação e otimização de secadores convectivos de grãos : determinação da eficiência energética. 2016. 163f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.
- KABATA-PENDIAS, A. Trace Elements in Soils and Plants, Fourth ed. CRC Press, 2010.
- KACPRZAK, M; NECZAJA, E.; FIJAŁKOWSKI, K.; GROBELAKA, A.; GROSSERA, A.; WORWAGA, M.; RORAT, A.; BRATTEBOB, H.; ALMÁS, A.; SINGH, B. R. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, v. 156, p. 39-46, 2017.

- KATEKAWA, M. E., SILVA, M. A. Drying rates in shrinking medium: case study of banana. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 24, n. 4, p. 561-569, 2007.
- KATEKAWA, M. E.; SILVA, M. A. Study of porosity behavior in convective drying of bananas. *Drying 2004*. In: PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS 2004), ed. M. A. Silva e S. C. S. Rocha, São Paulo, Brazil, v. B, p. 1427-1434, 2004.
- KOUA, B. K.; KOFFI, P. M. E.; GBAHA, P. Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017.
- KOWALSKI, S.J.; MUSIELAK, G.; BANASZAK, J. Experimental validation of the heat and mass model for convective drying. *Drying Technology*. v. 25, n.1, p. 107-121, 2007.
- KOYUNCU, T.; PINAR, Y.; LULE, F. Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna Jacq.*) and yellow (*Crataegus aronia Bosc.*) fruits. *Journal of Food Engineering*. v.78, p. 1471–1475, 2007.
- KROKIDA, M.K., MAROULIS, Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, v. 10, n.15, p. 2441-2458, 1997.
- KROLL, K., MUJUMDAR, A.S. AND MENON, A.S. Drying since the millennium. Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp. Washington DC, p. 485-494, 1980.
- KRUTHIKA, N. L.; KARTHIKA, S.; RAJU, G. B.; PRABHAKAR, S. Efficacy of electrocoagulation and electrooxidation for the purification of wastewater generated from gelatin production plant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 1, 183–188, 2013.
- KURT, M.; AKSOY, A.; SANIN, F. D. Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements. *Water research*, v. 82, p. 47-57, 2015.
- LABMAQ - Labmaq do Brasil Ltda. Manual de Operações do Mini-Spray Dryer MSD 1.0. Depto de Engenharia. (engenharia@labmaqdobrasil.com.br), 2003.
- LABUZA, T.P. (1994). *Moisture sorption: Pratical aspect of isotherm measurement and use*. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemistry.
- LABUZA, T.P. Sorption phenomena in foods. *Food Technology*, v. 22, n.3, p. 15- 24, 1968.
- LANGMUIR, I. The adsorption of gases in a plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*., [s.n.], 1918. v. 46, p. 1361-1403.
- LEBLANC, R.J., MATTHEWS, P., RICHARD, R.P., Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. *Choice Rev. Online*, 2009.

- LEI, Z.; DEZHEN, C.; JINLONG, X. Sewage sludge solar drying practise and characteristics study. Thermal & Engineering Institute, 2009.
- LEON, M.A.; KUMAR, S.; BHATTACHARYA, S.C. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renew. Sust. Energy Rev.* v. 6, p. 367–393, 2002.
- LEONARD, A.; MENESES, E.; LETRONG, E.; SALMON, T., MARCHOT, P.; TOYE, D.; Influence of back mixing on the convective drying of residual sludges in a fixed bed *.WaterResearch.* v. 42, n. 10–11, p.2671–7, 2008.
- LEONARD, A.; BLACHER, S.; MARCHOT, P.; PIRARD, J. P.; CRINE, M. Convective drying of wastewater sludges: influence of air temperature, superficial velocity and humidity on the kinetics. *DryingTechnology.* v. 23, p. 1667-79, 2005a.
- LÉONARD, A.; BLACHER, S.; MARCHOT, P.; PIRARD, J.P.; CRINE, M. Moisture profiles determination during convective drying using X-ray microtomography. *The Canadian Journal of Chemical Engineering.* v. 83, n. 1, p. 127-131, 2005b.
- LEONARD. A; VANDEVENNE P.; SALMON T.; MARCHOT, P.; CRINE, M. Waste water sludge convective drying: influence of the sludge origin. *Environmental Technology.* v. 25, n. 9, p. 1051–1057, 2004a.
- LEONARD, A.; BLACHER, S.; MARCHOT, P.; PIRARD, J. P.; CRINE, M. Measurement of shrinkage and cracks associated to convective drying of soft materials by X-ray microtomography. *DryingTechnology.* v. 7, p. 1695-708, 2004b.
- LÉONARD, A.; BLACHER, S.; PIRARD, S.; MARCHOT, P.; PIRARD, J. P.; CRINE, M.; Multiscale texture characterization of wastewater sludges dried in a convective rig. *Drying Technology.* v. 21, n. 8, p. 1507–26, 2003.
- LEONARD, A.; BLACHER, S.; MARCHOT, P.; CRINE, M. Use of x-ray microtomography to follow the convective heat drying of wastewater sludges. *Drying technology.* v. 20, n. 4 e 5, p. 1053–1069, 2002.
- LEWICKI, P. P.; JAKUBCZYK, E. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering,* n. 64, p. 307–314, 2004.
- LEWIS, W. K. The drying of solid materials. *J. Ind. Eng.,* v. 5, p. 427–33, 1921.
- LI, X.; FARID, M. A Review on Recent Development in Non-Conventional Food Sterilization Technologies. *Journal of Food Engineering,* v.182, 2016.
- LI, J.; PLOUGONVEN, E.; FRAIKIN, L.; SALMON, T.; TOYE, D.; LEONARD, A. Image analysis of X-ray tomograms of sludge during convective drying in a pilot-scale fixed bed. *Chemical Engineering Science.* v. 134, p. 222-229, 2015a.

- LI, J.; FRAIKIN, L.; SALMON, T.; BENNAMOUN, L.; TOYE, D.; SCHREINEMACHERS, R.; LEONARD, A. Investigation on convective drying of mixtures of sewage sludge and sawdust in a fixed bed. *Drying Technology*. v. 33, p. 704-712, 2015b.
- LI, J.; BENNAMOUN, L.; FRAIKIN, L.; SALMON, T.; TOYE, D.; SCHREINEMACHERS, R.; LEONARD, A. Analysis of the shrinkage effect on mass transfer during convective drying of sawdust/sludge mixtures. *Drying Technology*. v. 32, n. 14, p. 1706-1717, 2014.
- LIMA, A. C. C. *Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1998.
- LOWE, P. Development in the thermal drying of sewage sludge. *Water and Environment*. v. 9, n. 3, p. 306-16, 1995.
- LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, v. 48, p. 1497-1502, 1983
- LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits, *Journal of Food Science*, v. 45, p. 1403- 1407, 1980.
- LUZ, G.R. *Avaliação de estratégias de operação e de controle da secagem industrial de farelo de soja*. 2010. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.
- MA, H.; CHI, Y.; JIANHUA, Y.; NI, M. Experimental study on thermal hydrolysis and dewatering characteristics of mechanically dewatered sewage sludge. *Drying Technology*. v. 29, n. 41, p. 1741-7, 2011.
- MADIOULI, J.; SGHAIER, J.; LECOMTE, D.; SAMMOUDA, H. Determination of porosity change from shrinkage curves during drying of food material. *Food and Bioproducts Processing*, n. 90, p. 43-51, 2012.
- MAWIOO P. M.; GARCIA, H. A.; HOOIJMANS, C. M.; VELKUSHANOVA, K.; SIMONIČ, M.; MIJATOVIĆ, I.; BRDJANOVIC, D. A pilot-scale microwave technology for sludge sanitization and drying. *Science of the Total Environment*, n. 601–602, p. 1437–1448, 2017
- MATOS, A. T. Curso Sobre Tratamento de Resíduos Agroindustriais. Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental/UFV Fundação Estadual do Meio Ambiente Maio de 2005.

- MAYOR, L.; MOREIRA, R.; SERENO, A. M. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, v. 103, p. 29-37, 2011.
- MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, v.61, p. 373-386, 2004.
- MATTHEWS, P. Sustainability in biosolids management. *Water Science Technology*, Oxford, v.38, p.97-102, 1998.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Units Operations of Chemical Engineering. 6.^a ed., Ed. McGraw-Hill, 2001, pp. 773-811.
- McMINN, W. A. M. and MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potatoes – Part I. *Journal of Food Engineering*, 33, p. 37-48, 1997.
- MENSHUTINA, N.V.; GORDIENKO, M.G.; VOYNOVSKIY, A.A.; KUDRA, T. Dynamic Analysis of Drying Energy Consumption. *Drying Technology*, v. 22, p. 2281–2290, 2004.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*. v. 44, n. 7, p. 1111–1122, 2003.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Instrução Normativa nº 46, 2016.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Instrução Normativa nº 27, 2006.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Instrução Normativa nº 23, 2005.
- MOLINA-FILHO, L.; PEDRO, M. A. M.; TELIS-ROMERO, J.; BARBOZA, S. H.R. Influência da temperatura e da concentração do cloreto de sódio (NaCl) nas isotermas de sorção da carne de tambaqui (*Colossoma Macroparum*). *Ciência e Tecnologia dos Alimentos, Campinas*, v. 26, n. 2, p. 453-458, abr.-jun. 2006
- MOTEVALI, A.; MINAEI, S.; BANAKAR, A.; GHOBADIAN, B.; KHOSHTAGHAZA, M. H. Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion and Management*. v. 87, p. 711-725, 2014a.
- MOTEVALI, A.; MINAEI, S.; BANAKAR, A.; GHOBADIAN, B.; DARVISH, H. Energy analyses and drying kinetics of chamomile leaves in microwave-convective dryer. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2014b.
- MOTEVALI, A.; MINAEI, S.; KHOSHTAGHAZA, M. H. Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Conversion and Management*. v. 52, p. 1192–1199, 2011.

- MUJUMDAR, A. S. Research and development needs, challenges and opportunities for innovation in drying technologies. Ed. Sachin V Jangam and Bhaskar N Thorat, 2010.
- MUJUMDAR, A.S.; BEKE, J. Grain drying: basic principles, In: *Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices*. Chakraverty, A., Mujumdar, A.S., Raghavan, G.S.V., Ramaswamy, H.S., Eds, Marcel Dekker, Inc., NY, 2003.
- MUJUMDAR, A. S.; MENOM, A. S. Drying of solids: principles, classification and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed). *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker, 1, 1995.
- MUTHU,VP.; CHATTOPADHYAY,P.K. Prediction of heat of vaporization of moisture from cereal grains- a modelling approach, *Drying Technology*, v.11, n.7, p.1855- 1862, 1993.
- MUZAFFAR, K.; KUMAR,P. Moisture sorption isotherms and storage study of spray dried tamarind pulp powder. *Powder Technology*, v. 291, p. 322–327, 2016.
- NADHARI, W.N.A.W., HASHIM, R., SULAIMAN, O., JUMHURI, N. Drying kinetics of oil palm trunk waste in control atmosphere and open air convection drying. *Int. J. Heat Mass Transfer* v. 68, 14–20, 2014.
- NARAMABUYE, F. X.; HAYNES, R. J. The liming effect of five organic manures when incubated with an acid soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Weinheim, v. 170, n. 5, p. 615-622, 2007.
- NEIVA, M. R. Reciclagem agrícola de biossólidos da ETE Cetrel – uma experiência ambientalmente correta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 20., 1999, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES, 1999. p.477-479.
- NIELSEN, S.; WILLOUGHBY, N. Sludge treatment and drying reed bed systems in Denmark. *Water and Environment Journal*, v.19, n.4, p. 296–305, 2005.
- NIETO, A. B.; SALVATORI, D. M.; CASTRO, M. A.; ALZAMORA, S. M. Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *Journal of Food Engineering*, v. 61, p. 269-278, 2004.
- OCHOA, M. R.; KESSELER, A. G.; PIRONE, B. N.; MÁRQUEZ, C. A. and De MICHELIS, A. Shrinkage during convective drying of whole rose hip (*Rosa Rubiginosa* L.) fruits. *Lebensm. – Wiss. U-Technol.*, 35, p- 400-406, 2002.
- ODLARE. M.; PELL, M.; SVENSSON, K. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste Management*. Oxford, v. 28, n. 7, p. 1246-1253, 2008.

- OLIVEIRA, E. G.; ROSA, G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. Moisture sorption characteristics of microalgae *Spirulina platensis*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.26, p.189-197, 2009.
- OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO-PREZOTTO, M.E.; MARCIANO, C.R. & MORAES, S.O. Percolação de nitrato em Latossolo Amarelo distrófico afetada pela aplicação de composto de lixo urbano e adubação mineral. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 25, p. 731-741, 2001.
- OLIVIER, J.; VAXELAIRE, J. Municipal sludge dewatering by belt filter press: effect of operating parameters. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. v. 80, n. 8, p. 948-53, 2005.
- Oswin, C.R. The Kinetics of Package Life III. The Isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 65, 419-421, 1946.
- PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. Unpublished Master Thesis, Purdue University, Lafayette, IN, USA. 1949.
- PAGLARINI, C. S.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; PIASSON, D.; SANTOS, P. Histerese das isotermas de sorção da polpa de manga (*Mangifera indica* L.) variedade manteiga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.17, n.3, p.299–305, 2013
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A.S. Basic Process Calculations in Drying, In: A.S. Mujumdar (Ed.) *Handbook of Industrial Drying*, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York, p. 71-112, 1995.
- PALIPANE, K.B.; DRISCOLL, R.H. Moisture sorption characteristics of inshell macadamia nuts, *Journal of Food Engineering*. v. 18, p. 63–76, 1992.
- PAN, Y.; WEN, D.; HAN, Z. Applications of electromagnetic fields for nonthermal inactivation of microorganisms in foods: An overview. *Trends in Food Science & Technology*. v. 64, p. 13-22, 2017.
- PARK, K. J. B.; PARK, K.J.; CORNEJO, F.E.; DAL FABRO, I. M. Considerações Termodinâmicas das Isotermas, *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.10, n.1, p.83-94, 2008.
- PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. Apostila de conceitos de processo e equipamentos de secagem, Campinas, CT&EA – Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, 2007.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra Bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

- PARRY, J.L. A review of mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 32, p. 1–29, 1985.
- PEDRO, M. A. M.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N. Effect of drying method on the adsorption isotherms and isosteric heat of passion fruit pulp powder. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.30, p.993-1000, 2010.
- PENA, R. S.; MENDONÇA, N. B.; ALMEIDA, M. D. C. Comportamento higroscópico do café em pó. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 12, n.2, p. 153-161, 2010.
- PEGORINI, E.S.; ANDREOLI, C.V.; SOUZA, M.L. & FERREIRA, A. Qualidade do lodo de esgoto utilizado na reciclagem agrícola na região metropolitana de Curitiba – PR. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE BIODÉTRIA, 1., São Paulo, 2003. Anais. São Paulo, jun., 2003.
- PEREZ, M. G. R.; CALVELO, A. Modeling the thermal conductivity of cooked meat. *Journal of Food Science*. n. 49, p. 152-156, 1984.
- PERRY, R. H., CHILTON, C. H. *Chemical engineers handbook*, 5. Ed. McGraw-Hill, Rio de Janeiro, 1973.
- PETRIE, B.; BARDEN, R.; KASPRZYK-HORDEN, B. A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water Research*, v. 72, p. 3-27, 2015.
- PRADO, M. M. e SARTORI, D. J. M. Estudo do fenômeno de encolhimento durante a secagem de sementes com diferentes características superficiais. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*, v. 21, n. 1, p. 11-20, 2002
- PUTRANTO, A.; CHEN X. D. A simple and effective model for modeling of convective drying of sewage sludge: the reaction engineering approach (REA). In: International Conference and Workshop on Chemical Engineering UNPAR 2013, ICCE UNPAR 2013. *Procedia Chemistry*, n. 9, p. 77 – 87, 2014.
- RAGHAVAN, V. G. S.; RENNIE, T. J.; SUNJKA, P. S.; ORSAT, V.; PHAPHUANGWITTAYAKUL, W. and TERDTON, P. Energy aspects of novel techniques for drying biological materials. *Drying 2004. Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, ed. M. A. Silva e S. C. S. Rocha, São Paulo, Brazil, vol B, p. 1021-1028, 2004.
- RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A; FURLANI, A.M.C. Adubação orgânica. In: RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A; FURLANI, A.M.C. (eds.) *Recomendações*

- de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1996. p.30-31. (Boletim Técnico, 100).
- RAHMAN, M.S. Toward prediction of porosity in foods during drying: a brief review. *Drying Technology*, v. 1, n. 19, p 1-13, 2001.
- RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, v. 23, n. 1, p. 91–105, 1994.
- RAYNAUD, M.; VAXELAIRE, J.; OLIVIER, J.; DIEUDÉ-FAUVEL, E.; BAUDEZ, J. C. Compression dewatering of municipal activated sludge: effect of salt and ph. *Water Research*. v. 46, n. 14, p.4448-56, 2012.
- RAYNAUD, M.; VAXELAIRE, J.; HERITIER, P.; BAUDEZ, J. C.; Activated sludge dewatering in a filtration compression cell: deviations in the comparison to the classical theory. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. v. 5, n. 5, p. 785-90, 2010a.
- RAYNAUD, M.; HERITIER, P.; BAUDEZ, J. C.; VAXELAIRE, J. Experimental characterization of Activated sludge behavior during mechanical expression. *Process Safety and Environmental Protection*. v. 88, n.3, p. 200-6, 2010b.
- REIMANN, P. Gelatina tem mercado promissor. *Gazeta Mercantil*, São Paulo, 28 mai. 2005.
- REYES, A.; ECKHOLT, M.; TRONCOSO, F.; EFREMOV, G. Drying kinetics of sludge from a wastewater treatment plant. *Drying Technology*. v. 22, n. 9, p. 2135-2150, 2004.
- RIBEIRO, R. M. *Tratamento do resíduo da indústria de gelatina através da compostagem, com emprego de serragem e palha de café*. 2007. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Construções Rurais e Ambiente, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.
- ROEDIGER, H. The Techniques of Sewage Sludge Pasteurization; Actual Results Obtained in Existing Plants; Economy. International Research Group on Refuse Disposal, Information Bulletin Number 21-31. p. 325. August 1974 to December 1976 apud EPA – U. S. Environmental Protection Agency. Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal. September 1979.
- ROUX, N.; JUNG, D.; PANNEJON, J.; LEMOINE, C. Modelling of the solar drying process Solia. IN: Pierucci S, Ferraris GB, editors. Proceeding of 20th European symposium on computer aided process engineering, 2010.
- RUIZ, T.; KAOSOL, T.; WISNIEWSKI, C. Dewatering of urban residual sludges: filterability and hydro-textural characteristics of conditioned sludge. *Separation and Purification Technology*. v. 72, n. 3, p.275-81, 2010.
- RUIZ T., WISNIEWSKI C., KAOSOL T., PERSIN F. Influence of Organic Content in Dewatering and Shrinkage of Urban Residual Sludge under Controlled Atmospheric Drying,

- Trans IChemE, Process Safety and Environmental Protection*, Part B, v. 85 p. 104-110, 2007.
- RUIZ T., WISNIEWSKI C., KAOSOL T., PERSIN F. Dewatering and Shrinkage of Urban Residual Sludge under Controlled Atmospheric Drying: Hydro-textural Aspects. In: WASTEENG 2005 CONFERENCE, 2005, France. *Anais...France*: ALBI, May 17-19, 2005.
- SALIHOGU, N. K.; PINARLI, V.; SALIHOGU, G. Solar drying in sludge management in Turkey. *Renewable Energy*. v. 32, p. 1661–167, 2007.
- SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHIERE, F.; MEULENAER, B. D.; TUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J.M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. *Journal of Food Engineering*, v.79, p.168-175, 2007.
- SAMI S, ETESAMI N, RAHIMI A. Energy and exergy analysis of an indirect solar cabinet dryer based on mathematical modeling results. *Energy*, n. 36, p. 2847-2855, 2011.
- SARKER, M. S. H.; IBRAHIM, M. N.; AZIZ, N. A. PUNAN, M. S. Energy and exergy analysis of industrial fluidized bed drying of paddy. *Energy*. v. 84, p. 131-138, 2015.
- SCALCON, A. *Desenvolvimento de uma tecnologia alternativa para a desidratação de lodos provenientes da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos domésticos*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2014.
- SCHEUFELE, F. B.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; BERGAMASCO, R.; PEREIRA, N. Assessment of drying temperature of sugarcane bagasse on sorption of reactive blue 5G dye. *Fibers and Polymers*, v. 16, n. 8, p. 1646-1656, 2015.
- SEGINER, I.; BUX, M. Modeling solar drying rate of wastewater sludge. *Drying Technology*. v. 24, p. 1353-63, 2006.
- SERENOTTI, F.; VIEIRA, M. G. A.; SILVA, M. G. C.; PISANI, B.; SIMÕES, M.; PRANDI, A. G. Bacteriological elimination in sewage sludge through direct flow convective drying. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. v.29, n.4, 2010.
- SERENOTTI, F. *Avaliação da secagem para redução de volume e inativação de microrganismos em lodo de ETE*. 2009. 203f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2009.
- SINGH, S.; KUMAR, S. New approach for thermal testing of solar dryer: development of generalized drying characteristic curve. *Sol. Energy* v. 86, p. 1981–1991, 2012.
- SLIM, R.; ZOUGHAIB, A.; CLODIC, D. Modeling of a solar and heat pump sludge drying system. *International Journal of Refrigeration*. v. 31, p. 1156-68, 2008.

- SMITH, P. G. Introduction to Food Process Engineering. New York: Kluwer Academic, 2003.
- SMITH, S. E. The sorption of water vapor by high polymers. *Journal of the American Chemical Society*, v. 69, p. 646-651, 1947.
- SODIS – SOLAR WATER DISINFECTION. Training Manual for SODIS Promotion. SANDEC Report No. 13/06, 2006, EAWAG/ SANDEC, Dübendorf, Switzerland, 2006.
- SOUSA, F. C.; ROCHA, A. P. T.; GOMES, J. P, MARTINS, J. J. A.; MARTINS, J. N. Isotermas de dessecção de folhas in natura de juazeiro e mororó. *Pesquisa Agropecuária Tropical*., Goiânia, v. 44, n. 3, p. 304-310, jul./set. 2014.
- SPINOSA, L., et al. Sustainable and innovative solutions for sewage sludge management. *Water* v. 3, p. 702–717, 2011.
- STERN, G. Pasteurization of Liquid Digested Sludge. In: Proceedings of National Conference on Municipal Sludge Management. Pittsburgh, June 1974. Information Transfer Inc., Rockville, Maryland 20852. p. 163 apud EPA – U. S. Environmental Protection Agency. Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal. September 1979.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. Drying: Principles, Applications and Design. In: Hughes, R. Topics in Chemical Engineering. 3, University of Salford, UK, 1986.
- SYED-HASSAN, S. S. A.; WANG, Y.; HU, S.; SU, S.; XIANG, J. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 888-913, 2017.
- TAMER, C.; ISCI, A.; KUTLU N., SAKIYAN, OZ.; SAHIN S.; SUMNU, G. Effect of drying on porous characteristics of orange peel. *International Journal of Food Engineering*, v. 12, n. 9, p. 921-928, 2016.
- TANIGUCHI, C. A. K. Mineralização do lodo biológico de indústria de Gelatina, atributos químicos de solo e uso fertilizante para produção de milho. 2010. 109f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2010.
- TAO, T.; PENG, X. F.; LEE, D. J. Skin layer on thermally dried sludge cake. *DryingTechnology*. v. 24, n.8, p. 1047-1052, 2006.
- TAO, T.; PENG, X. F.; LEE, D. J. Thermal drying of wastewater sludge: change in drying area owing to volume shrinkage and crack development. *DryingTechnology*. v. 23, n.3, p. 669-82, 2005a.
- TEDESCO, M.J.; SELBACH, P.A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O. Resíduos orgânicos no solo e impactos no ambiente. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.;

- CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Metrópole, Porto Alegre, 2008. p.113-135.
- TEJADA, M.; RODRÍGUEZ-MORGADO, B.; GÓMEZ, I.; FRANCO-ANDREU, L.; BENÍTEZ, C.; PARRADO, J. Use of biofertilizers obtained from sewage sludges on maize yield. *Europ. J. Agronomy*, v. 78, p. 13-19, 2016.
- THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FORSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying – A new model. *Trans. ASAE*. v.11, n.4, p. 582-586, 1968.
- TOZE, S.; SIDHUA, J. Biosolids: Human Health Impacts. *Encyclopedia of Environmental Health*, 394-402, 2011.
- TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, v. 12, n. 3, p. 223-230, 2008.
- TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos In: TSUTIYA, M.T., ed. *Biossólidos na agricultura*. São Paulo, SABESP, p.133-180, 2001.
- TSUTIYA, M. T. Tecnologia emergentes para a disposição final de biossólidos das estações de tratamento de esgotos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20.,1999, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999. p.762-770.
- TULASIDAS, T.N., RAGHAVAN, G.S.V., AND MUJUMDAR A.S. (1995), Microwave drying of grapes in a single mode cavity at 2450 MHz – II: Quality and energy aspects, *Drying Technology*. Vol. 13, no 8&9, pp. 1973-1992
- TUNC, S.; DUMAN, O. Thermodynamic properties and moisture adsorption isotherms of cottonseed protein isolate and different forms of cottonseed samples. *Journal of Food Engineering*, v.81, p.133-143, 2007.
- TURKER, M.; KANARYA, A.; YUZGEC, U.; KAPUCU, H.; SENALP, Z. Drying of baker's yeast in batch fluidized bed. *Chemical Engineering and Processing*. V. 45, n.12, p. 1019-1028, 2006.
- TUROVSKIY, I. S.; MATHAI, P. K. Wastewater sludge processing. John Wiley and Sons. 2006.
- van BRAKEL, J. Mass transfer in convective drying. In: *Mujumdar AS, editor. Advances in drying I Hemisphere Publishing Corporation*, 1980.
- VAXELAIRE J, CÉZAC P. Moisture distribution in activated sludges: a review. *Water Research*, v. 38 p. 2215–230, 2004.

- VAXELAIRE, J.; PUIGGALI, J.R. Analysis of the drying of residual sludge: From the experiment to the simulation of a belt dryer. *Drying Technology*. v. 20, n. 4-5, p. 989-1008, 2002.
- VAXELAIRE, J.; BONGIOVANNI, J.M.; PUIGGALI J.R. Mechanical dewatering and thermal drying of residual sludge, *Environmental Technology*, v. 20, n.1, p. 29–36, 1999.
- VIEIRA, M. G. A., ROCHA, S. C. S. Mathematical modeling of handmade recycled paper drying kinetics and sorption isotherms. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. v. 25, n. 02, p. 299 - 312, 2008
- VIEIRA, M. G. A.; ESTRELLA, L.; ROCHA, S. C. S. Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper. *Drying Technology*. v. 25, p. 1639-1648, 2007.
- VIEIRA, M. G. A. *Análise da secagem de polpa de celulose para a obtenção de papel reciclado tipo cartão*. 2006. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006a.
- VIEIRA, M. G. A.; ESTRELLA, L.; SILVA, M. A.; ROCHA, S. C. S. Shrinkage of Recycled Paper Sheet During Drying. *Drying Technology*. v. 24, p. 465–474, 2006b.
- VIJAYAVENKATARAMANA, S.; INIYANB, S.; GOICC, R. A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.16, p.2652-2670, 2012.
- WANG, N., BRENNAN, J.G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, v. 1, n. 24, p. 61-76, 1995.
- WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION - WEF. Operation of municipal wastewater treatment plants. Manual of practice. 5.^a ed., Alexandria, 1996.
- YAN, J. H.; DENG, W. Y.; ,LI, X. D.; WANG, F.; CHI, Y.; LU, C. S. Experimental and theoretical study of agitated contact drying of sewage sludge under partial vacuum conditions. *Drying Technology*. v. 27, n.6, p. 787-96, 2009.
- YANG, Z.; ZHU, E.; ZHU, Z. Moisture sorption isotherms and Net isosteric heats of sorption of green soybean, *International Journal of Food Engineering*, v. 8, 2012.
- ZARE, D.; CHEN, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 68, p. 78–87, 2009.
- ZARE, D; MINAEI, S; MOHAMAD ZADEH, M, KHOSHTAGHAZA, M. H. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. *Energy Convers Manage* v. 47, p. 3241–3254, 2006.
- ZHANG, Q.; HU, J.; LEE, D.; CHANG, Y.; LEE, Y. Sludge treatment: Current research trends. *Bioresource Technology* v. 243, p. 1159–1172, 2017.

ZHANG, X.Y.; CHEN, M.Q., HUANG, Y. W.; XUE, F. Isothermal hot air drying behavior of municipal sewage sludge briquettes coupled with lignite additive. *Fuel*, v. 171, p. 108-115, 2016.

ZHANG, X.; DO, M.D.; CASEY, P. SULISTIO, A.; QIAO, G.G. ; LUNDIN, L.; LILLFORD, P.; KOSARAJU, S. *Biomacromolecules*, v. 11, n.4, p. 1125-1132, 2010.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Dguderying Technology*, v. 12,n. 7, p. 1653-1666, 1994.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

Para a calibração da placa de orifício foi utilizada a equação para fluxo gasoso proposta por Ower e Pankhurst (1977), citada por Serenotti (2009). O modelo mede a vazão de ar de secagem empregando uma placa de orifício com diâmetro do orifício igual a 20mm, para um tubo de 50,8mm.

Foram realizadas leituras do diferencial de pressão e de pressão estática em manômetros em U, contendo água como fluido manométrico. A calibração da placa de orifício permite a obtenção da vazão do ar em função da queda de pressão na placa. A equação utilizada para a obtenção da curva de calibração desta placa é representada pela Equação A.1. Para o cálculo de alguns parâmetros são utilizadas as Equação A.2 a A.5.

$$Q_m = k \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot a_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - m^2} \cdot (\Delta h) \cdot \frac{b_1}{k_1 + T}} \quad (\text{A.1})$$

$$\varepsilon = 1 - \beta \cdot \frac{\Delta h}{\Delta P + b_1} \quad (\text{A.2})$$

$$\beta = 0,3041 \cdot m - 0,1166 \cdot m^2 + 0,4089 \cdot m^3 \quad (\text{A.3})$$

$$\alpha = 0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,184 \cdot m^4 \quad (\text{A.4})$$

$$m = \frac{a_2}{a_1} \quad (\text{A.5})$$

Onde:

Q_m : vazão mássica ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$);

k : 0,0573 - constante de correção de unidades (adimensional);

Δh : queda de pressão na placa de orifício (cm H_2O);

ΔP : pressão estática a montante da placa de orifício (cm H_2O);

b_1 : pressão barométrica no local (mmHg);

k_1 : 273,15 (K);

T : temperatura do ar ($^\circ\text{C}$);

a_1 : área do tubo (cm²);

a_2 : área do orifício (cm²).

A Tabela A.1 mostra os dados obtidos na calibração da placa de orifício e a Figura A.1 mostra a curva de calibração obtida.

Tabela A. 1. Dados obtidos na calibração da placa de orifício.

ΔP (cmH ₂ O)	ΔH (cm H ₂ O)	ε	Q_m
0,0	0,0	1,000	0,000
5,0	0,5	1,000	0,123
16,0	1,0	1,000	0,174
20,5	2,5	0,999	0,274
22,0	4,0	0,998	0,347
25,5	5,0	0,998	0,388
27,0	6,0	0,998	0,425
28,5	7,0	0,997	0,458
29,0	8,0	0,997	0,490
32,0	9,0	0,996	0,519
33,0	9,0	0,996	0,519

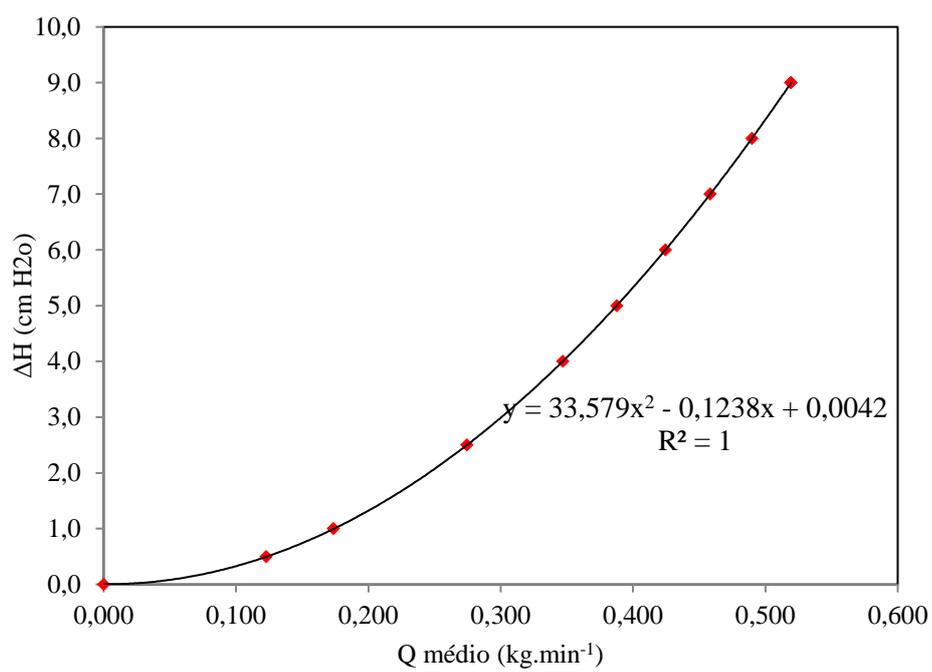


Figura A. 1. Curva de calibração da placa de orifício.

APÊNDICE B – CINÉTICAS DE SECAGEM

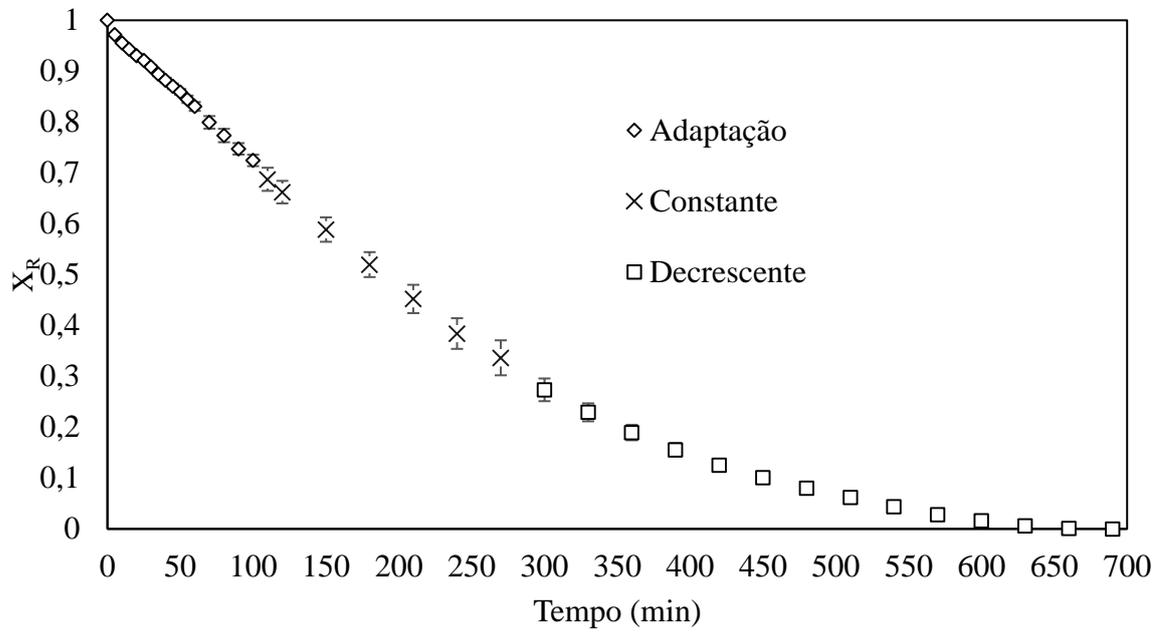


Figura B. 1. Cinética de secagem relativa aos ensaios 3 e 4 ($T=80^\circ\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

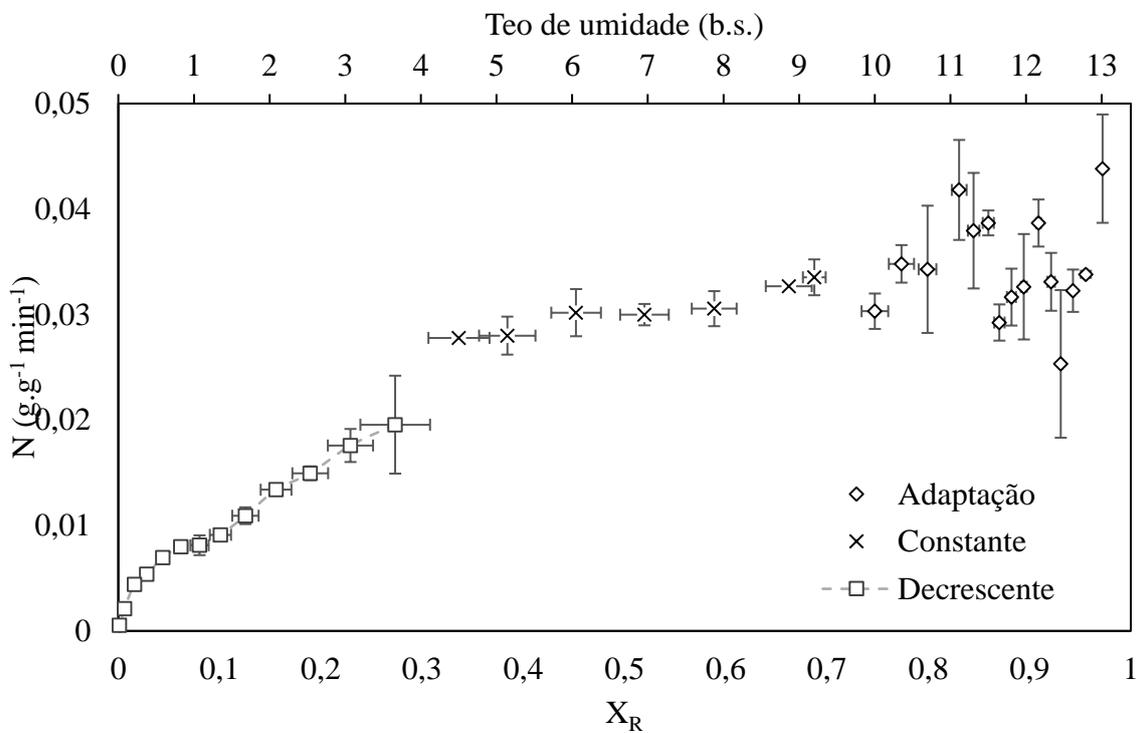


Figura B. 2. Taxa de secagem relativa aos ensaios 1 e 2 ($T=80^\circ\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

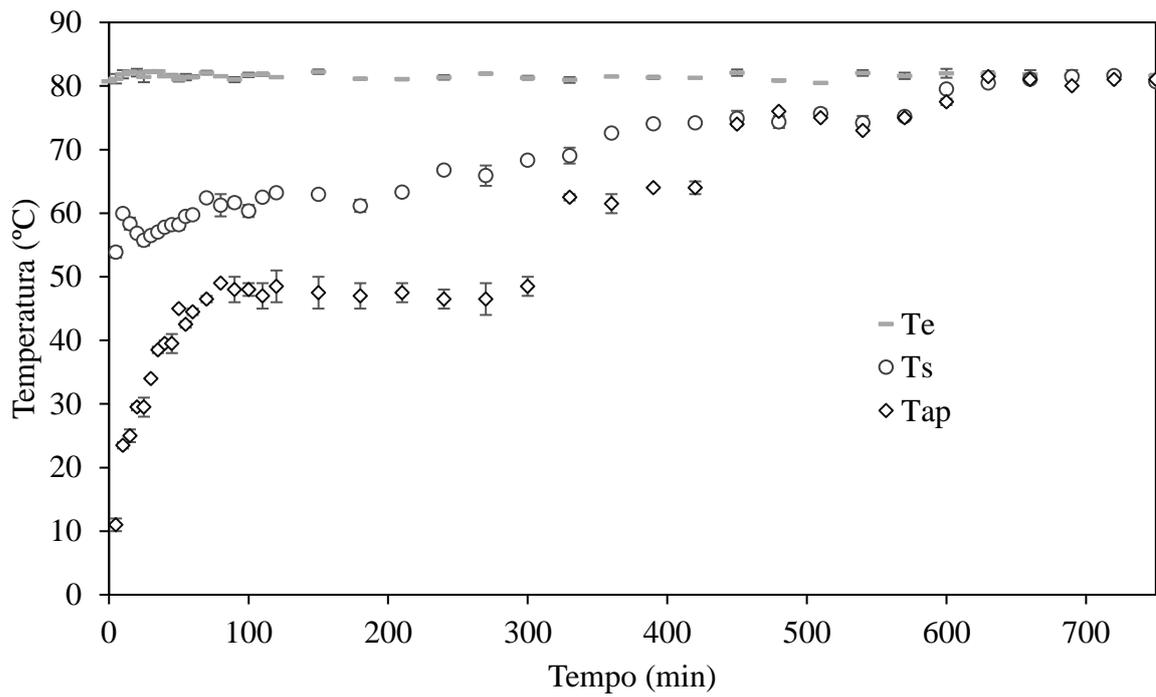


Figura B. 3. Perfil de temperatura dos ensaios 3 e 4 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $v_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

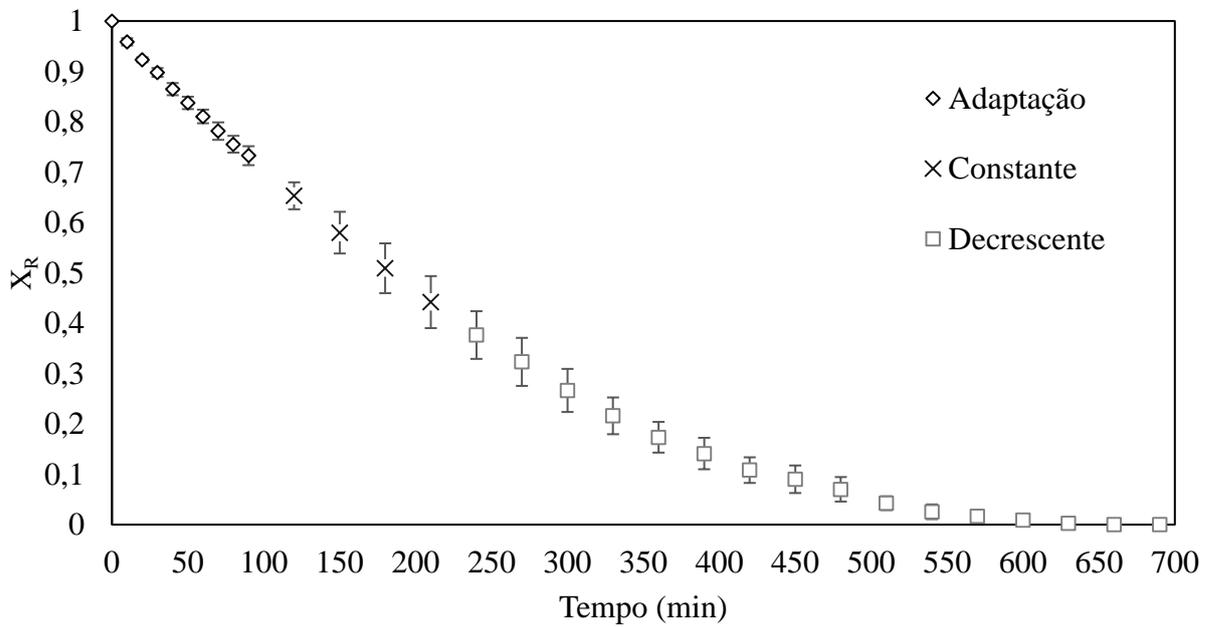


Figura B. 4. Cinética de secagem relativa aos ensaios 5 e 6 ($T=80^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

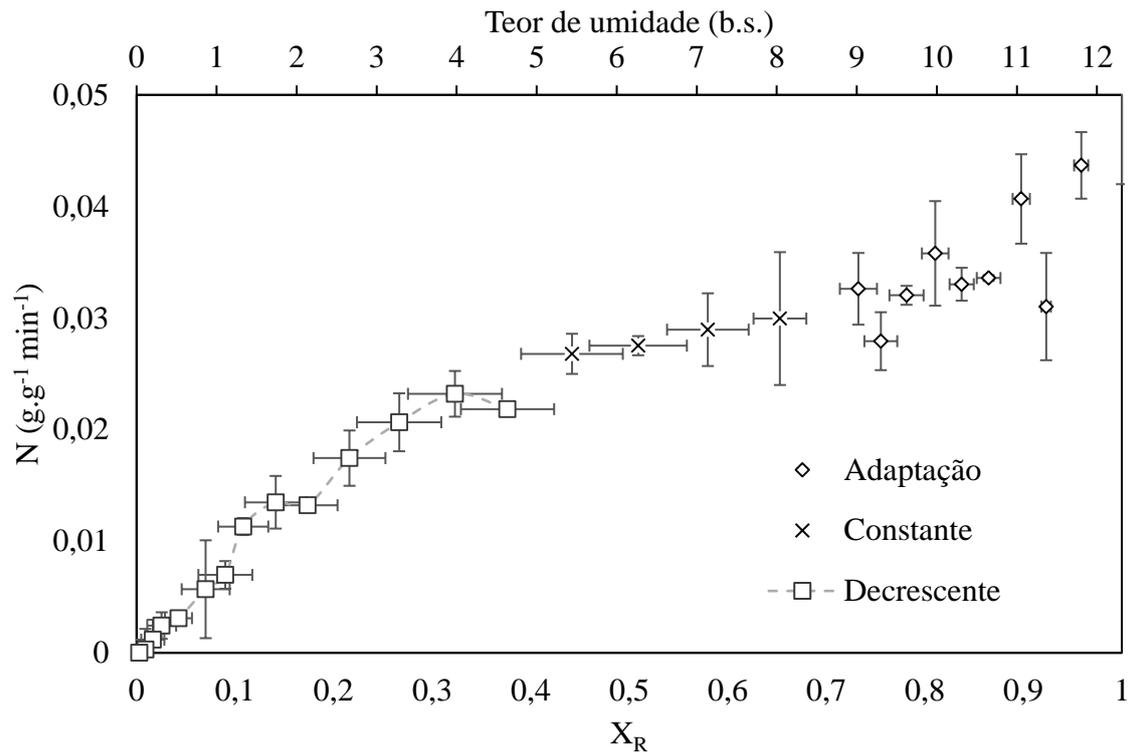


Figura B. 5. Taxa de secagem relativa aos ensaios 5 e 6 ($T=80^\circ\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$)

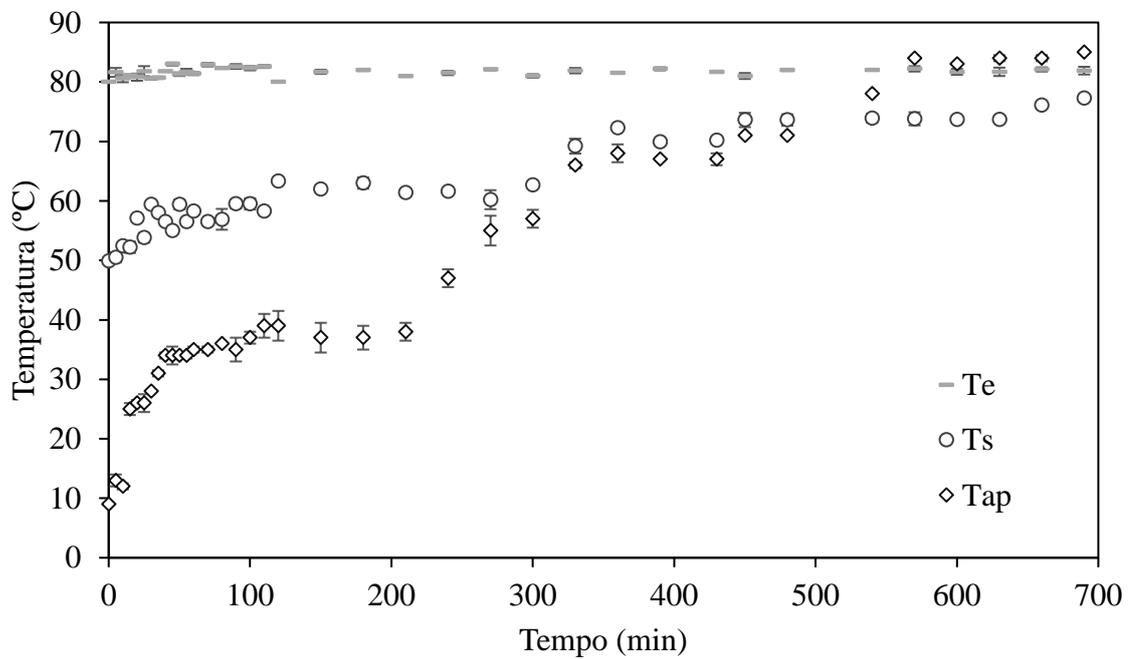


Figura B. 6. Perfil de temperatura dos ensaios 5 e 6 ($T=80^\circ\text{C}$ e $v_{\text{ar}} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

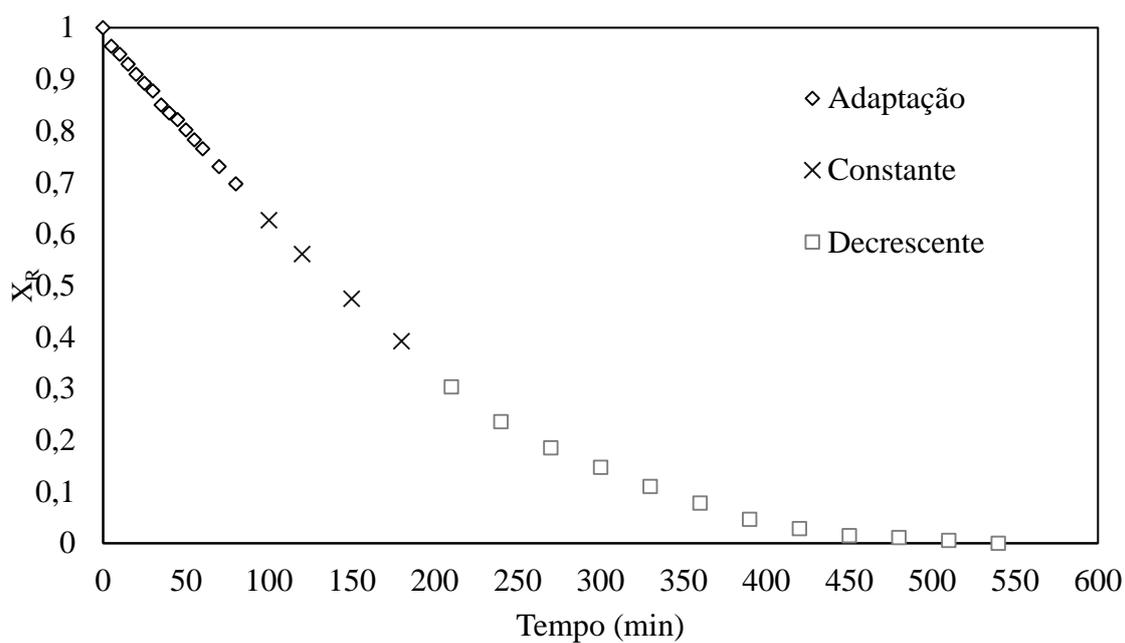


Figura B. 7. Cinética de secagem relativa aos ensaios 7 e 8 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

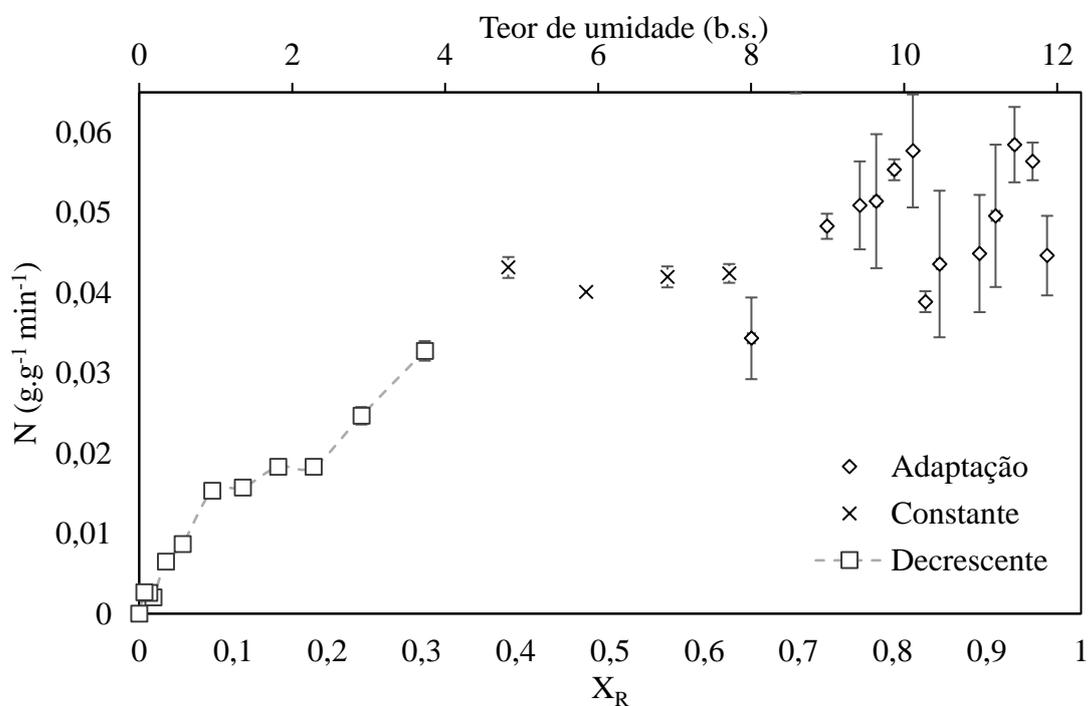


Figura B. 8. Taxas de secagem relativa aos ensaios 7 e 8 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

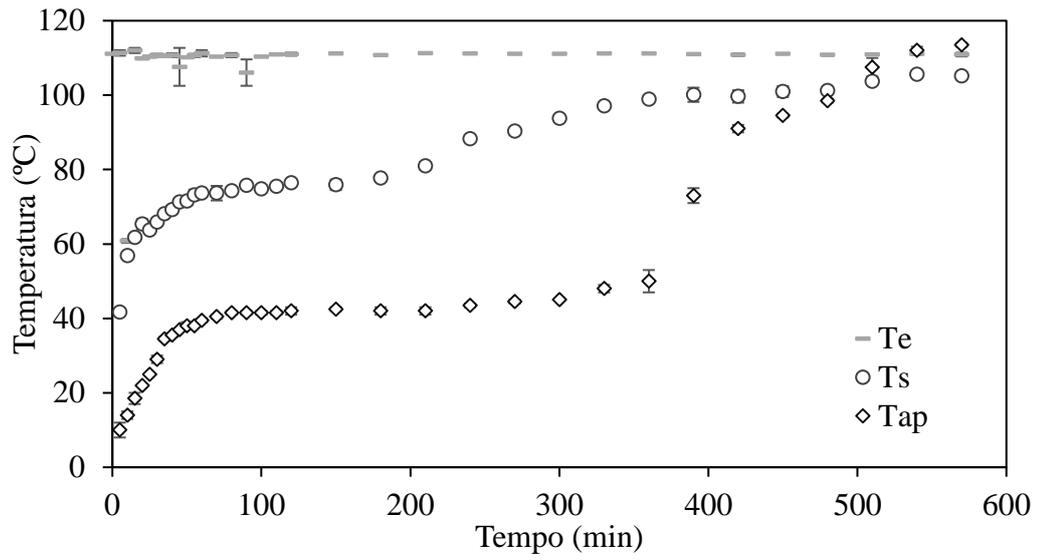


Figura B. 9. Perfil de temperatura dos ensaios 7 e 8 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

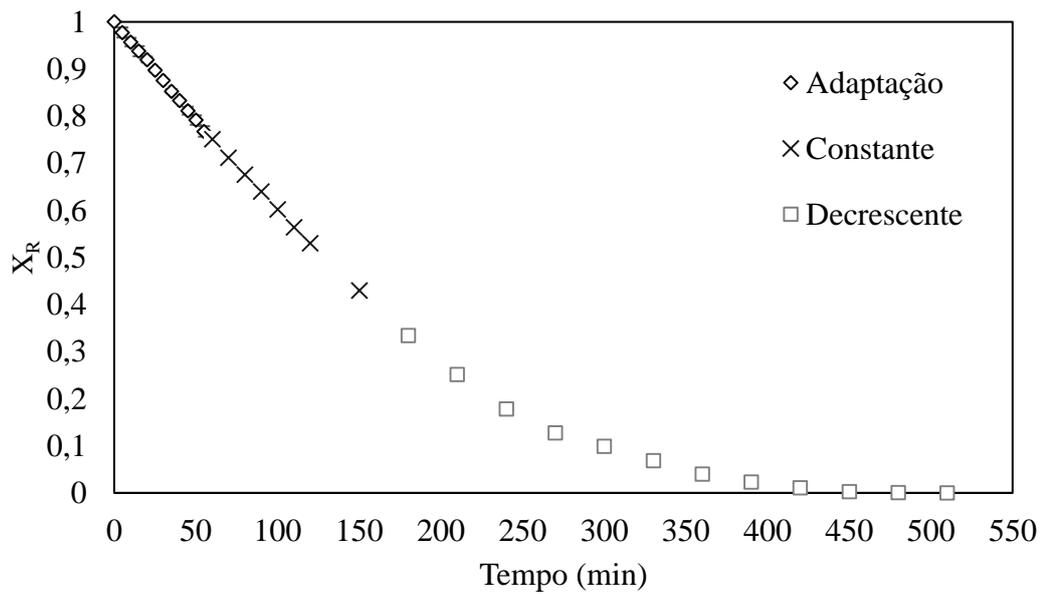


Figura B. 10. Cinética de secagem relativa aos ensaios 11 e 12 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

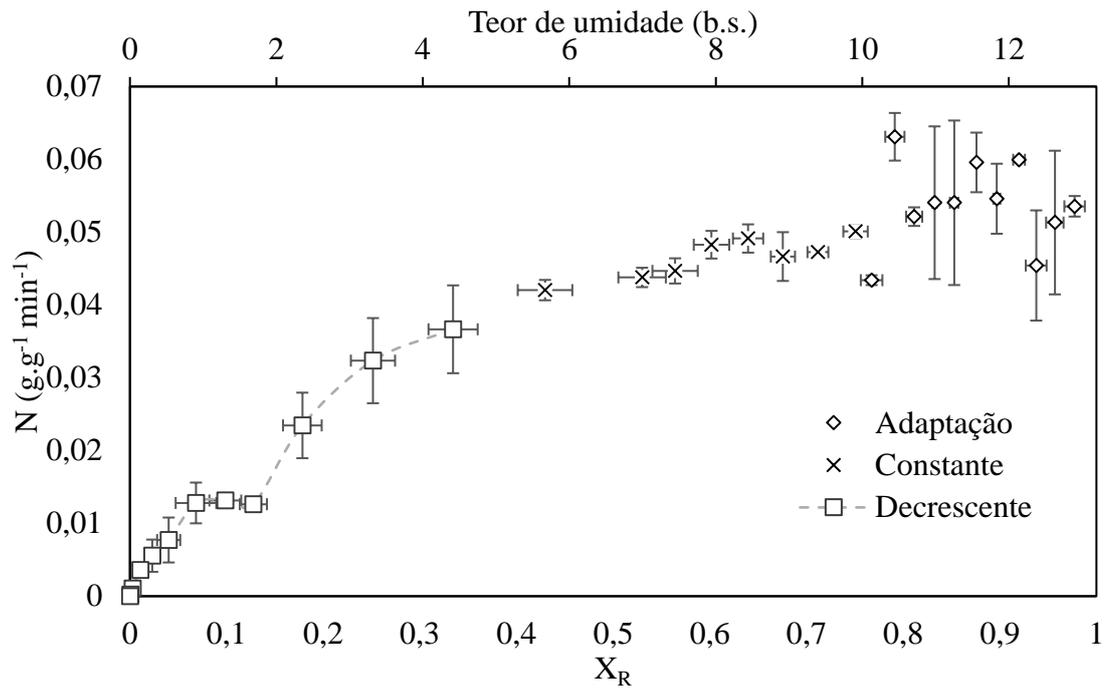


Figura B. 11. Taxas de secagem relativa aos ensaios 11 e 12 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

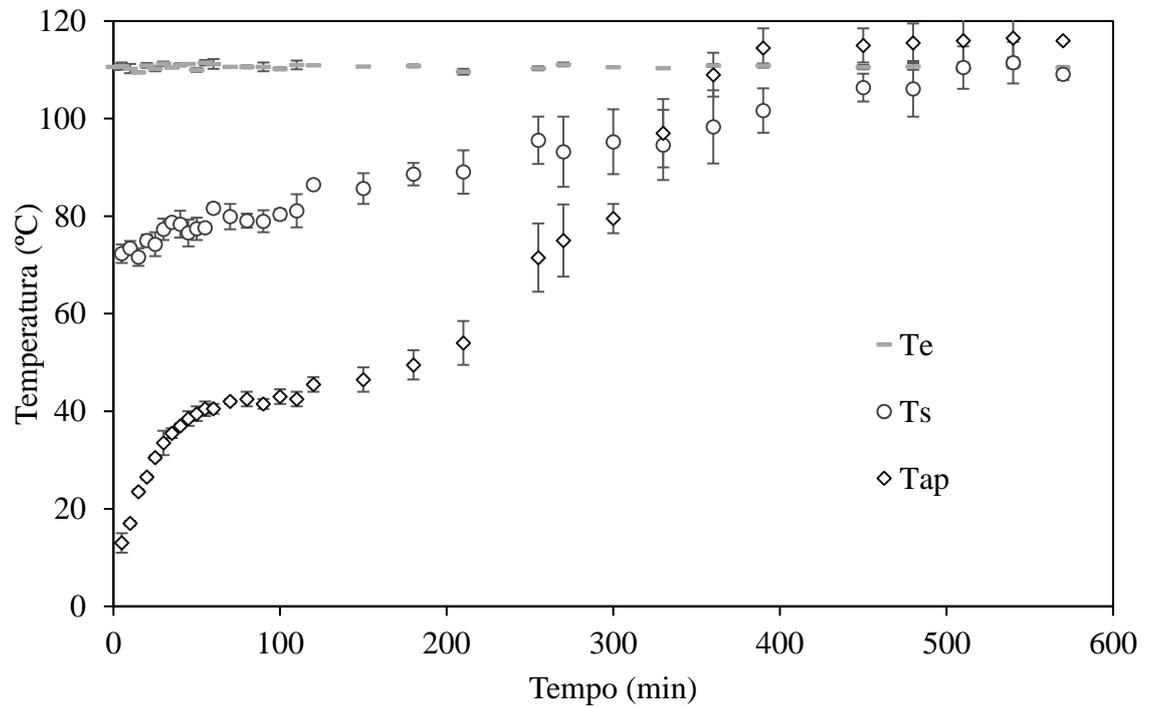


Figura B. 12. Perfil de temperatura dos ensaios 11 e 12 ($T=110^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

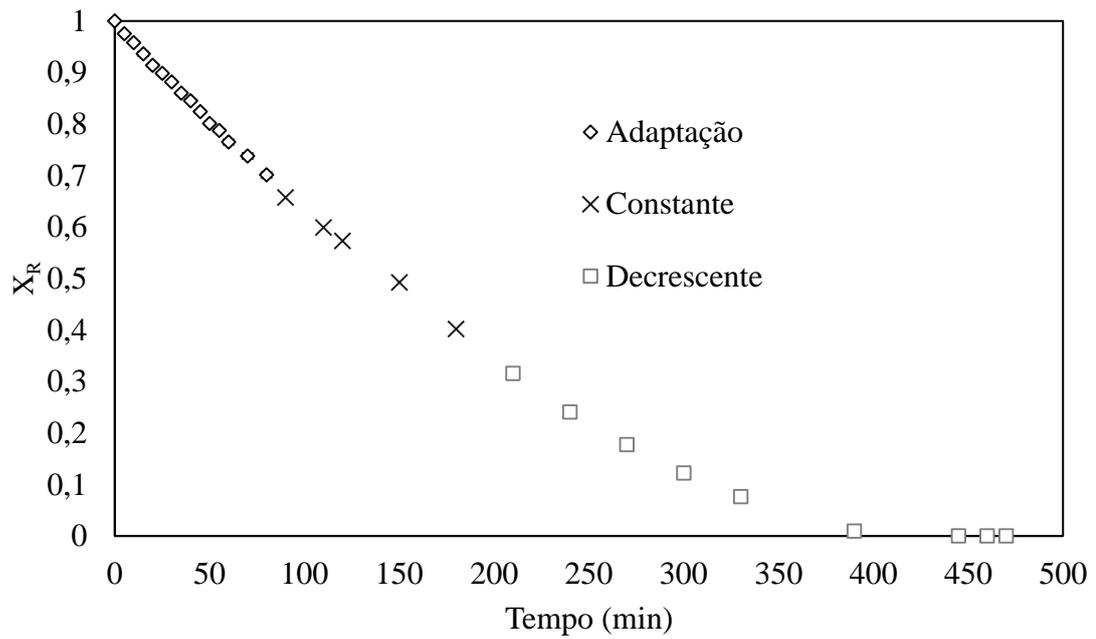


Figura B. 13. Cinética de secagem relativa aos ensaios 13 e 14 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

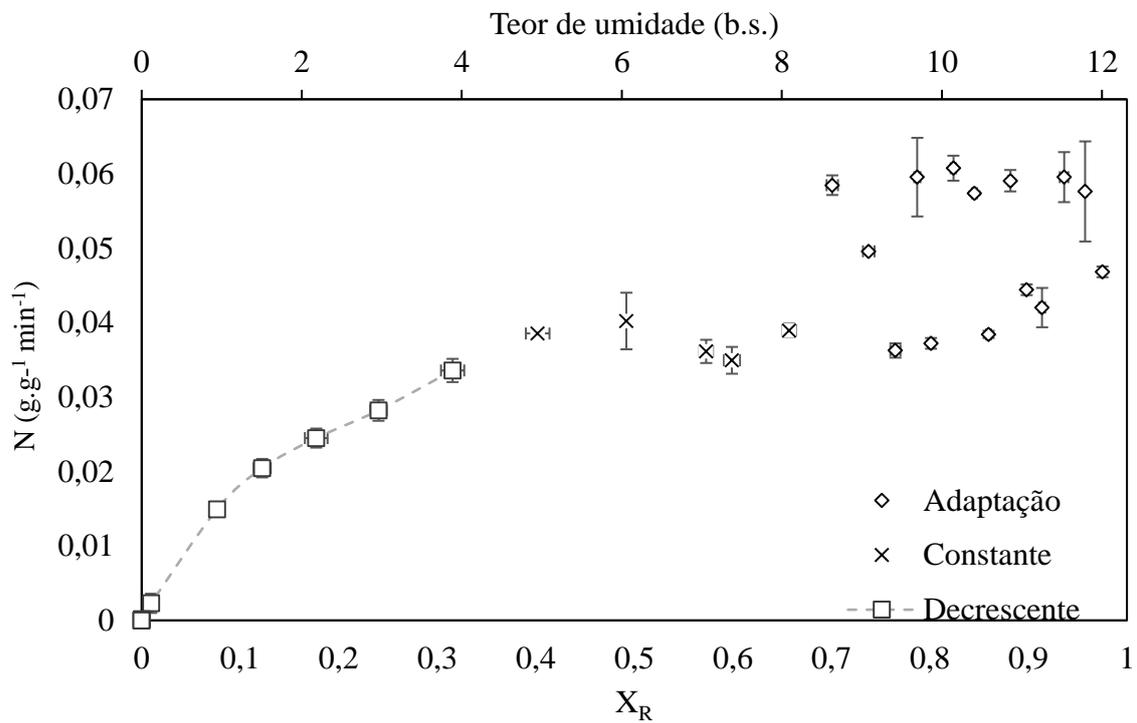


Figura B. 14. Taxas de secagem relativa aos ensaios 13 e 14 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

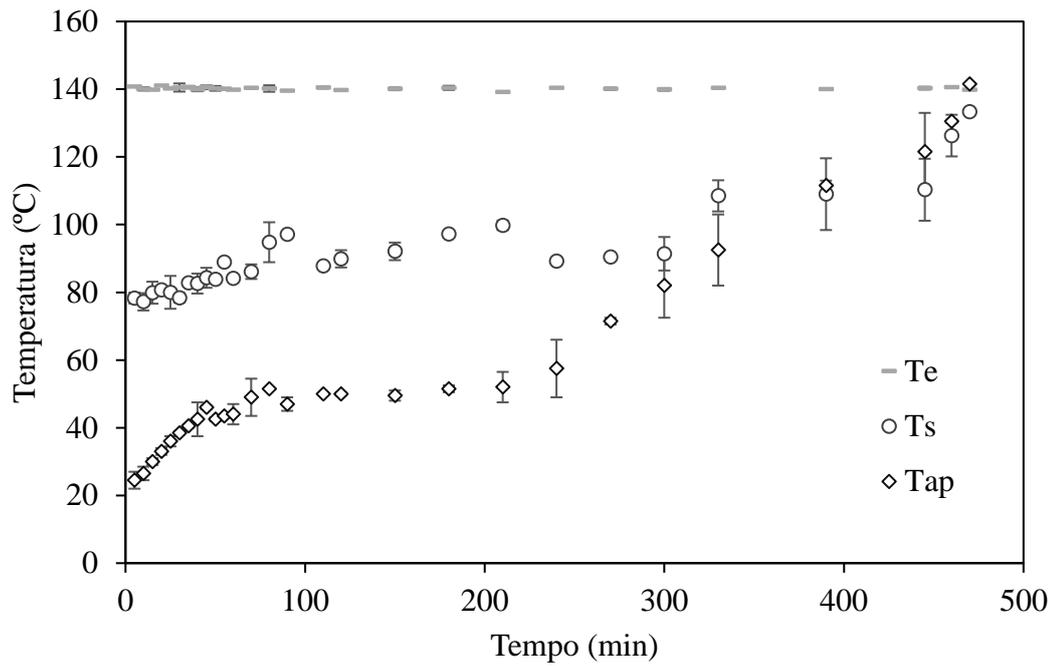


Figura B. 15. Perfil de temperatura dos ensaios 13 e 14 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

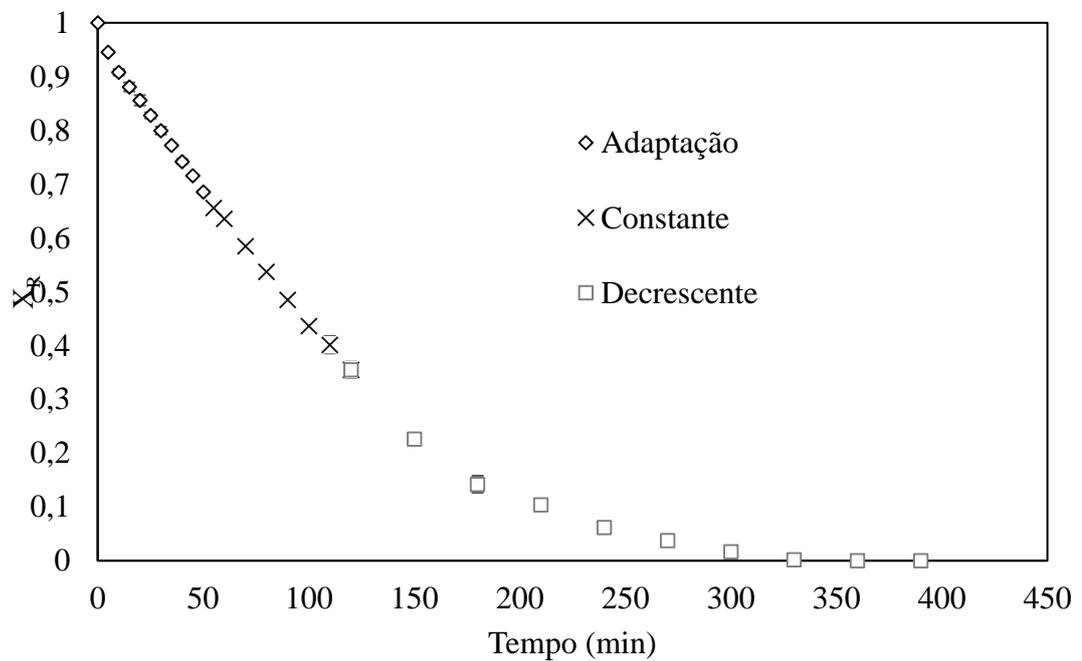


Figura B. 16. Cinética de secagem relativa aos ensaios 15 e 16 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

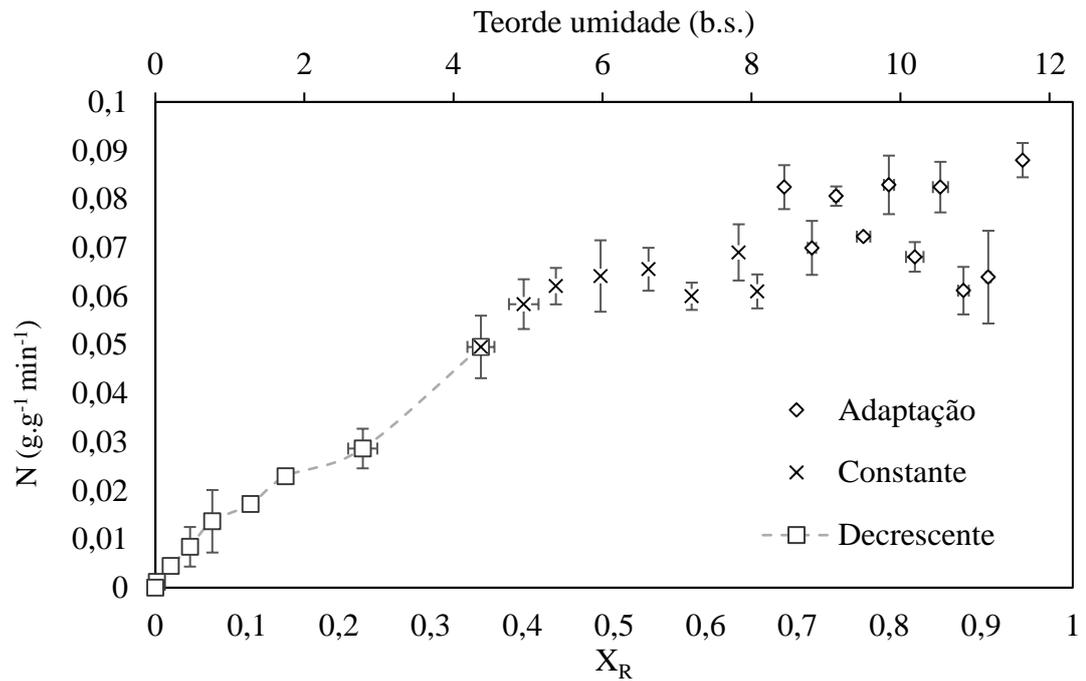


Figura B. 17. Taxas de secagem relativa aos ensaios 15 e 16 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

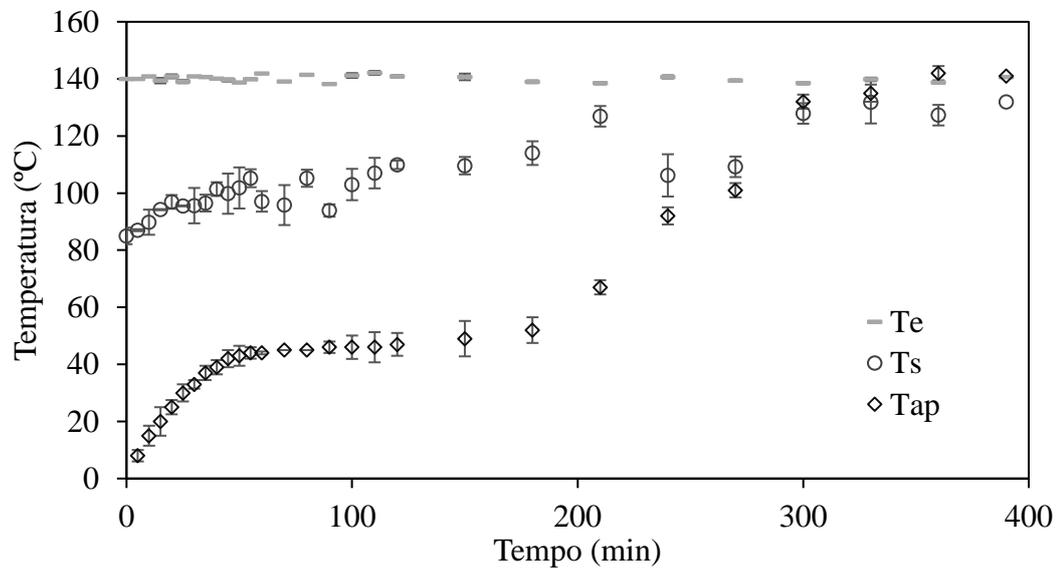


Figura B. 18. Perfis de temperatura dos ensaios 15 e 16 ($T=140^{\circ}\text{C}$ e $Q_{\text{ar}} = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).