

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS

**AVALIAÇÃO DA SECAGEM PARA REDUÇÃO DE VOLUME E INATIVAÇÃO
DE MICRORGANISMOS EM LODO DE ETE**

Autor: FERNANDO SERENOTTI

Orientadora: MEURIS GURGEL CARLOS DA SILVA

**Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da
Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Química.**

Campinas – São Paulo
Junho de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Se66a Serenotti, Fernando
A avaliação da secagem para redução de volume e
inativação de microrganismos em lodo de efluente / Fernando
Serenotti. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Meuris Gurgel Carlos da Silva.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. secagem. 2. lodo de esgoto. 3. Microbiológica. I.
Silva, Meuris Gurgel Carlos da. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Química. III. Título.

Título em Inglês: Drying evaluation for shrinkage and microorganisms
inactivation in STP sludge

Palavras-chave em Inglês: drying, sewage sludge, Microbiological

Área de concentração: Engenharia de Processos

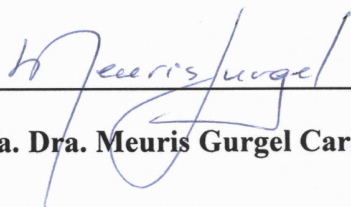
Titulação: Engenharia Química

Banca examinadora: Samira Maria Leão de Carvalho, Maria Helena Martini,
Sandra Cristina dos Santos Rocha, Osvaldir Pereira Taranto

Data da defesa: 10/06/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

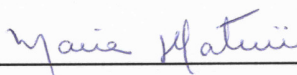
Tese de Doutorado defendida por Fernando Serenotti e aprovada em 10 de junho de 2009 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



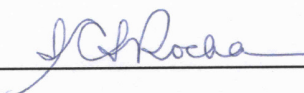
Profa. Dra. Meuris Gurgel Carlos da Silva – FEQ/UNICAMP



Profa. Dra. Samira Maria Leão de Carvalho – FEQ/UFGA



Dra. Maria Helena Martini – IAL/Regional Campinas

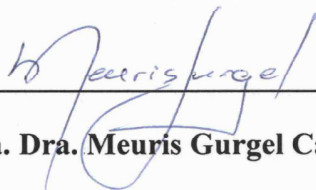


Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha – FEQ/UNICAMP



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto – FEQ/UNICAMP

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química.

A handwritten signature in blue ink, reading "Meuris Gurgel", is positioned above a horizontal line. The signature is stylized, with the first name "Meuris" and the last name "Gurgel" clearly legible.

Profa. Dra. Meuris Gurgel Carlos da Silva - UNICAMP

Aos meus pais, Vanderlei Serenotti e Ângela M. M. Serenotti, por terem acreditado em um sonho intitulado de Engenharia Química, que se iniciou em 1997 e que hoje vira mais uma página. A todos, todos que participaram deste sonho. E aos que utilizarem esta obra como fonte de estudo.

AGRADECIMENTOS

Profa. Meuris, muito obrigado por ter confiado em meu trabalho. Desde a primeira conversa na UFRRJ, soube que não poderia ter sido com outra pessoa a orientação desta tese. O exemplo profissional, de caráter e de vida, levarei para sempre em meu coração. Espero ao menos ser digno de dar a continuidade à todos os teus ensinamentos.

Se eu tenho uma orientadora que acompanha seus filhos acadêmicos como uma verdadeira mãe, não poderia esquecer do super paizão Laerte. Muito obrigado por todas as seguradas de barra, pois, pai é pai, e sempre dá um jeitinho de acalmar a mãe quando a coisa aperta. Apenas uma frase para o casal: “Amo vocês !!!”.

Super equipe do LEA: Carlo, Cris, Jai, Mônica, Ambrósio, Lene, Carol e Ana (agora no finalzinho), queridos IC's, muito obrigado pelos momentos de companheirismo e amizade. Vocês são espetaculares! Tenham a certeza que terei muito orgulho de dizer que fiz parte desta equipe, e sei que vocês brilharão profissionalmente onde quer que estejam.

Priscila Soares, minha aluna de IC, sem teu esforço e dedicação para com este projeto, seria humanamente impossível desenvolvê-lo. Sempre serei grato a ti por isso. E mais, tenho um orgulho imenso em saber que tu passou pelas nossas mãos, e hoje está brilhando profissionalmente com seus próprios passos.

Alguns simplesmente passam, outros ensinam e deixam uma vontade ainda maior pela busca e conhecimento! Professores Newton, Marina, Taís, Walter, Faria, Sônia (queridos professores da época da graduação – Unimep 1997/2001); Professores Leonardo, Maurício, Luis Américo, Claudia, Marisa, Gerson, Paulo Jansen, Dilma entre outros (queridos mestres da época do mestrado – UFRRJ 2002/2004); Professores Val, Marisa, Sandra, Cida, Théo, Charles, Lisbôa, entre outros (queridos docentes do DTF/FEQ/UNICAMP) as palavras fogem neste momento, pois, não há como descrever todo o carinho e respeito que tenho por vocês.

Não poderia deixar de agradecer, de forma especial, aos meus orientadores de outrora, Profa. Dra. Taís H. M. Lacerda, orientadora da iniciação científica; Profa. MSc. Marina Satie Kobayasi, orientadora do Trabalho de Conclusão de Curso; e Prof. Dr. Leonardo de Gil Torres, orientador do mestrado. O caminho foi difícil, pesado, porém, transpassado! Grande parte desta conquista é creditada a vocês, por terem sido os primeiros a acreditarem em meu potencial como pesquisador.

Prof. Dr. Maurício C. Mancini, coordenador do PPGEQ/UFRRJ durante o período do mestrado. Grande incentivador e uma das peças principais por esta minha conquista. Muito obrigado pela confiança depositada em mim. Espero que os objetivos trilhados por ti e pela Meuris para a conquista deste título tenham sido concluídos.

Rogério, Sr. Levi, Celso, Rose, muito obrigado pelos serviços e “quebra-galhos” a mim prestados, nossa vida acadêmica se torna mais fácil com o auxílio de vocês.

Jean, Ivan, João, Lázaro, Jones e Marcelo, integrantes da RGM, obrigado por todos os momentos de alegria e amizade. Estes sem dúvida, facilitaram e muito as dificuldades enfrentadas nesta etapa da vida.

Sérgio F. F. de Oliveira, meu “Pretinho”, te amo! Muito obrigado pelos conhecimentos e pelo auxílio na modelagem matemática, e também pela amizade incondicional e pelos momentos de alegrias, dificuldades, tristezas, incertezas..., que todos os seus sonhos possam ser concretizados!

Goran e André Casimiro, vocês são especiais! Os momentos repartidos em nossas experimentações musicais, degustações de charutos e tantos outros são inesquecíveis!

Alessandra (Paulista) e André (Formiga), quem diria que ainda estaríamos reunidos aqui em Campinas !!! Com vocês por perto, a saudade da nossa galera da Rural com certeza era amenizada. Vocês são pessoas especiais e levo vocês sempre no coração!

Nesta etapa do doutorado, muitos amigos foram feitos, e cada um merece o meu agradecimento. Desta forma, para não pecar no esquecimento, agradeço de forma geral a todos vocês, meus amigos, pelo companheirismo e momentos de descontração e carinho !!!

Família Melo, meu agradecimento mais que especial, por todo o incentivo e confiança! Espero trazer muitas alegrias à vocês assim como vocês trazem pra mim. Amo vocês !!!

Alguns colegas de profissão além da amizade e companheirismo nos auxiliam no rumo da pesquisa. De forma alguma poderia deixar de mencionar os nomes de Paulo, Mirla e Regina, que sempre estavam prestativos e dispostos a me ajudar e sanar qualquer dúvida, me auxiliando no pontapé inicial do estudo da secagem. Também agradeço a expressiva contribuição de Melissa na etapa de finalização deste trabalho.

Cristiane M. Serenotti, não só minha esposa, mas a companheira, a amiga, a colega de profissão, minha vida! Muitas foram as dificuldades que enfrentei para chegar até aqui. E tu sempre estive do meu lado, me apoiando, me suportando, e o mais importante, me amando incondicionalmente. Poucas palavras bastam, mas, atitudes terão que ser muitas. Te amo!

Durante alguns anos na época da graduação tive o privilégio de participar da FENEEQ (Federação Nacional dos Estudantes de Engenharia Química), e nunca poderia acreditar que isto me proporcionaria conhecer pessoas fantásticas e que hoje são o meu exemplo maior de amizade e companheirismo. Vocês participaram de todas as minhas conquistas, inclusive esta, que é a mais esperada !!! Nos maus e nos bons momentos, sempre vou poder contar com vocês, meus amigos Achincalhados.

Minhas queridas meninas do IAL, foi um privilégio ter participado com vocês na confecção deste trabalho. Só nós sabemos as dificuldades que passamos para desenvolver o

estudo microbiológico. Bia, Marise, Maria Helena, Maria Ângela e Eneida, os meus sinceros agradecimentos.

Corpo técnico da ÁGUAS DE LIMEIRA S.A., Cléber, Christopher, Gilberto, Paula e Alex, não há palavras para agradecer o suporte dados por vocês a esta pesquisa. Espero que este trabalho sirva como fonte de estudo e desenvolvimento para a contínua melhoria da qualidade ambiental desenvolvida por vocês na cidade de Limeira – SP.

Finalizo com os sinceros agradecimentos à FAPESP, pelo suporte financeiro; à CAPES e ao CNPq, pela bolsa de estudo.

RESUMO

O lodo de esgoto, um dos principais componentes das águas residuárias geradas mundialmente, é um resíduo com alto conteúdo de umidade e grande carga de microrganismos. O uso da secagem apresenta-se como uma poderosa ferramenta na área ambiental devido a possibilidade de redução de volume e inativação microbiológica. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o processo de secagem empregando um secador convectivo direto de fluxo ascendente, para redução de volume e inativação microbiológica de lodo de ETE. O lodo utilizado foi oriundo do tratamento primário da ETE - Tatu, da cidade de Limeira - SP. Foram desenvolvidos os seguintes estudos: determinação das características físico-químicas, ensaios de secagem a partir do planejamento experimental 3^2 em duplicata (duas variáveis – temperatura e vazão do ar de secagem, e três níveis) com análise estatística dos dados, a avaliação da redução de volume do lodo seco, ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais, verificação do efeito da sazonalidade do lodo de esgoto no processo de secagem, e avaliação da inativação microbiológica. Pelos resultados do trabalho verificou-se que as características físico-químicas não sofreram alterações significativas antes e após o processo de secagem, e com isso, pode-se considerar que não ocorreu emissão atmosférica destes componentes. A cinética do processo de secagem se caracterizou inicialmente pelo período de aquecimento do material seguindo-se pelos períodos de secagem à taxa constante, 1.^a e 2.^a taxas decrescentes. O início do 2.^o período de taxa decrescente foi marcado pela quebra ou fissura da torta, com aumento significativo da taxa de secagem, que é uma característica específica da secagem de materiais como o lodo. A análise estatística mostrou que a temperatura foi a variável mais significativa, indicando que o mecanismo de secagem do lodo de esgoto foi predominantemente difusivo. Contudo, devido o comportamento do 2.^o período de secagem, os modelos difusivos não se ajustaram adequadamente, necessitando de modelos empíricos para descrever a 2.^a taxa decrescente. A redução de volume do material foi satisfatória, no caso cerca de 50%. A verificação da sazonalidade mostrou uma discreta diferença nos valores de pH e umidade inicial dos lodos estudados. As análises microbiológicas mostraram que após o tratamento térmico, houve a inativação microbiológica em praticamente todas as condições de processo estudadas, sendo o binômio tempo de exposição – temperatura o fator predominante para a esterilização e desinfecção do lodo de ETE. Com os resultados obtidos é possível considerar que o processo de secagem deste trabalho apresenta bom potencial de aplicação como tratamento de lodo de ETE, mas também de outros materiais que possuam características similares.

Palavras-chave: secagem, lodo de esgoto, redução de volume, inativação microbiológica.

ABSTRACT

Sludge, one of the main components of wastewater generated worldwide, is a waste with great quantity of moisture and microorganisms. The usage of drying has been a powerful tool in the environmental area due to the possibility of reduction of volume and microbiological inactivation. The present study aims to assess the drying process using an upflow direct convection dryer to reduce sludge volume and microbiological inactivation of Sludge Treatment Plants (STP). The used sludge has been taken from the primary treatment of STP – Tatu, city of Limeira, São Paulo. The following studies have been carried out: determination of physicochemical characteristics, drying experiments from the experimental design 3^2 in duplicate (two variables – temperature and drying air flow, and three levels) with statistical analysis of data, assessment of volume reduction of dried sludge, fitting of mathematical models to experimental data, verification of the effect of the seasonality of the sludge in the drying process, and assessment of microbiological inactivation. With the results of this study it could be verified that the physicochemical characteristics have not suffered significant changes nor before neither after the drying process, therefore, it can be said that atmospheric emission of these components have not occurred. The kinetics of the drying process was initially characterized by the heating period of the material followed by the drying periods of constant rate, first and second falling rates. The beginning of the second period of falling rate was marked by the cake break or fissure with the significant increase of the drying rate which is a specific characteristic of the drying of materials such as sludge. The statistic analysis has shown that the temperature was the most significant variable indicating that the sludge drying mechanism has predominantly been diffusive. However, due to the behavior of the second period of drying, the diffusive models did not adjust adequately, being necessary the use of empiric models to describe the second falling rate. The reduction of material volume was satisfactory, 50%, in this case. The verification of the seasonality has shown a discrete difference in the pH values and in the moisture content of the studied sludge. The microbiological analyses showed that after the thermal treatment there was microbiological inactivation practically in all the studied conditions of the process, being the binomial time of exposition – temperature the predominant factor for the sterilization and disinfection of sludge of STP. With the obtained results it is possible to consider that the drying process of this study shows a good potential of application for sludge treatment of STP, and also for other materials that have similar characteristics.

Keywords: drying, sludge, shrinkage, microbiological inactivation

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xvii
NOMENCLATURA.....	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação da Pesquisa	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Apresentação do trabalho	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1. Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto	7
2.2. Classificação do lodo de esgoto	10
2.3. Características físico-químicas do lodo.....	13
2.4. Processo de Secagem.....	20
2.4.1.Características gerais da secagem	23
2.4.2.Tipos de secagem	28
2.4.3.Tipos de secadores.....	29
2.4.4.Modelagem Matemática da secagem.....	32
2.5. Tratamento térmico de lodos de esgoto.....	38
2.5.1.Secagem do lodo.....	39
2.5.2.Características da secagem de lodos.....	40
2.5.3.Redução de volume por secagem	44
2.5.4.Desinfecção do lodo	45
2.6. Processos recomendados para o tratamento do lodo	51
2.7. Destino Final do Lodo.....	52
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	55

3.1. Material	55
3.1.1. Preparação da amostra	56
3.1.2. Caracterização físico-química do lodo	57
3.1.3. Determinação dos microrganismos patogênicos	59
3.2. Procedimento Experimental de Secagem	60
3.2.1. Descrição do sistema experimental	60
3.2.2. Planejamento Experimental.....	66
3.3. Modelagem Matemática.....	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1. Características físico-químicas.....	73
4.1.1. Umidade Inicial e Sólidos Totais e Voláteis	73
4.1.2. Metais Pesados	74
4.1.3. pH	75
4.1.4. Nitrogênio Total	77
4.1.5. Carbono Orgânico Total – COT	79
4.2. Ensaio de Secagem	81
4.3. Análise estatística do Planejamento Fatorial 3 ²	89
4.4. Verificação da redução de volume	94
4.5. Modelos Matemáticos	95
4.6. Verificação da Sazonalidade	104
4.7. Inativação Microbiológica.....	109
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	117
5.1. Conclusões.....	117
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	120
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÊNDICES	
A – CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.....	135
B – CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO.....	139
C – CINÉTICA E TAXA DE SECAGEM DOS ENSAIOS REALIZADOS.....	143
D – PERFIS DE TEMPERATURA DOS ENSAIOS DE SECAGEM.....	153
E – TABELAS DE DADOS DOS ENSAIOS DE SECAGEM.....	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de uma estação de tratamento (SABESP, 2005).	9
Figura 2.2: Agrupamento dos sólidos presentes no esgoto (SILVA, 2003).	14
Figura 2.3: Composição típica do esgoto bruto (SPELLMAN, 1997).	15
Figura 2.4: Estados de umidade não ligada (STRUMILLO & KUDRA, 1986).	22
Figura 2.5: Curva de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).	24
Figura 2.6: Curva da taxa de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).	26
Figura 2.7: Classificação dos secadores de acordo com o método operacional.	30
Figura 2.8: Visualização conceitual da distribuição da umidade no lodo (TSANG & VESILIND, 1990).	41
Figura 2.9: Curva da taxa de secagem de lodo de esgoto (CHUN & LEE, 2004).	42
Figura 2.10: Curvas de secagem características de diferentes lodos de esgoto (LOWE, 1995).	43
Figura 3.1: Fluxograma simplificado da ETE – Tatu (ÁGUAS DE LIMEIRA, 2008).	55
Figura 3.2: Desenho esquemático do sistema de secagem.	61
Figura 3.3: Distribuição dos termopares no corpo do secador.	63
Figura 3.4: Vista geral do sistema de secagem.	65
Figura 3.5: Sistema lavador de gases.	65
Figura 3.6: Vista do soprador (1) e acessórios (supressor de ruídos (2) e filtro de ar (3)) e resfriador de ar (4).	66
Figura 4.1: pH do lodo bruto e do lodo seco das bandejas 1 e 2.	77
Figura 4.2: Comparação dos resultados da quantidade de nitrogênio do lodo bruto e seco.	79
Figura 4.3: Comparação dos resultados das amostras com relação à quantidade de COT do lodo bruto (“in natura”).	80
Figura 4.4: Cinética de secagem relativa aos ensaios 15 e 16 ($T=80^{\circ}\text{C}$; $Q=0,2\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	82
Figura 4.5: Taxa de secagem relativa aos ensaios 15 e 16 ($T=80^{\circ}\text{C}$; $Q=0,2\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	83
Figura 4.6: Cinética de secagem relativa aos ensaios 3 e 4 ($T = 110^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,3\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	85
Figura 4.7: Taxa de secagem relativa aos ensaios 3 e 4 ($T = 110^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,3\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	85
Figura 4.8: Cinética de secagem relativa aos ensaios 5 e 6 ($T=140^{\circ}\text{C}$; $Q= 0,4\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	87

Figura 4.9: Taxa de secagem relativa aos ensaios 5 e 6 ($T=140^{\circ}\text{C}$; $Q=0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).....	88
Figura 4.10: Diagrama de Pareto para a secagem na bandeja 1	91
Figura 4.11: Diagrama de Pareto para a secagem na bandeja 2	91
Figura 4.12: Superfície de resposta do Planejamento Fatorial 3^2 - secagem na bandeja 1	93
Figura 4.13: Superfície de resposta do Planejamento Fatorial 3^2 - secagem na bandeja 2	93
Figura 4.14: Diagrama de Pareto para o parâmetro k obtido pelo ajuste ao modelo de Henderson e Pabis (1961).	99
Figura 4.15: Cinética de secagem para a condição de processo de 80°C e $0,2 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ e dados preditos dos modelos propostos (— band. 1 e --- band. 2).....	102
Figura 4.16: Cinética de secagem para a condição de processo de 110°C e $0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ e dados preditos dos modelos propostos (— band. 1 e --- band. 2).....	103
Figura 4.17: Cinética de secagem para a condição de processo de 140°C e $0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ e dados preditos dos modelos propostos (— band. 1 e --- band. 2).....	103
Figura 4.18: Comparação entre os resultados experimentais e os estimados para as condições mínimo, médio e máximo de processo de secagem.....	104
Figura 4.19: Cinética de secagem relativa à bandeja 1 para as quatro coletas.....	107
Figura 4.20: Taxa de secagem relativa à bandeja 1 para as quatro coletas.....	107
Figura 4.21: Cinética de secagem relativa à bandeja 2 para as quatro coletas.....	108
Figura 4.22: Taxa de secagem relativa à bandeja 2 para as quatro coletas.....	108
Figura 4.23: Perfil de temperatura do processo (80°C e vazão de ar de $0,2 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).	113
Figura 4.24: Perfil de temperatura do processo (110°C e vazão de ar de $0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$). ..	114
Figura 4.25: Perfil de temperatura do processo (140°C e vazão de ar de $0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$). ..	115
Figura A1: Curva de Calibração do termopar 1.	136
Figura A2: Curva de Calibração do termopar 2.	137
Figura A3: Curva de Calibração do termopar 3.	137
Figura A4: Curva de Calibração do termopar 4.	138
Figura A5: Curva de Calibração do termopar 5.	138
Figura B1: Curva de calibração da placa de orifício.....	141
Figura C1: Cinética de secagem relativa aos ensaios 1 e 2.....	144
Figura C2: Taxa de secagem relativa aos ensaios 1 e 2.....	144
Figura C3: Cinética de secagem relativa aos ensaios 3 e 4.....	145
Figura C4: Taxa de secagem relativa aos ensaios 3 e 4.....	145

Figura C5: Cinética de secagem relativa aos ensaios 5 e 6.....	146
Figura C6: Taxa de secagem relativa aos ensaios 5 e 6.....	146
Figura C7: Cinética de secagem relativa aos ensaios 7 e 8.....	147
Figura C8: Taxa de secagem relativa aos ensaios 7 e 8.....	147
Figura C9: Cinética de secagem relativa aos ensaios 9 e 10.....	148
Figura C10: Taxa de secagem relativa aos ensaios 9 e 10.....	148
Figura C11: Cinética de secagem relativa aos ensaios 11 e 12.....	149
Figura C12: Taxa de secagem relativa aos ensaios 11 e 12.....	149
Figura C13: Cinética de secagem relativa aos ensaios 13 e 14.....	150
Figura C14: Taxa de secagem relativa aos ensaios 13 e 14.....	150
Figura C15: Cinética de secagem relativa aos ensaios 15 e 16.....	151
Figura C16: Taxa de secagem relativa aos ensaios 15 e 16.....	151
Figura C17: Cinética de secagem relativa aos ensaios 17 e 18.....	152
Figura C18: Taxa de secagem relativa aos ensaios 17 e 18.....	152
Figura D1: Perfil de temperatura do ensaio 1.	154
Figura D2: Perfil de temperatura do ensaio 2.	154
Figura D3: Perfil de temperatura do ensaio 3.	155
Figura D4: Perfil de temperatura do ensaio 4.	155
Figura D5: Perfil de temperatura do ensaio 5.	156
Figura D6: Perfil de temperatura do ensaio 6.	156
Figura D7: Perfil de temperatura do ensaio 7.	157
Figura D8: Perfil de temperatura do ensaio 8.	157
Figura D9: Perfil de temperatura do ensaio 9.	158
Figura D10: Perfil de temperatura do ensaio 10.	158
Figura D11: Perfil de temperatura do ensaio 11.	159
Figura D12: Perfil de temperatura do ensaio 12.	159
Figura D13: Perfil de temperatura do ensaio 13.	160
Figura D14: Perfil de temperatura do ensaio 14.	160
Figura D15: Perfil de temperatura do ensaio 15.	161
Figura D16: Perfil de temperatura do ensaio 16.	161
Figura D17: Perfil de temperatura do ensaio 17.	162
Figura D18: Perfil de temperatura do ensaio 18.	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Dados relativos às Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil (adaptado de MACHADO, 2001).	9
Tabela 2.2: Produtos gerados no tratamento de esgoto e de lodo (JORDÃO & PESSÔA, 1995).	11
Tabela 2.3: Características físicas dos lodos gerados em uma Estação de Tratamento de Esgoto - ETE (METCALF & EDDY, 1991).	12
Tabela 2.4: Composição química típica e propriedades dos lodos bruto e digerido (Adaptado de METCALF & EDDY, 1991).	16
Tabela 2.5: Metais presentes no lodo (MALINA, 1993) e concentração máxima permitida pela Cetesb (1999).	17
Tabela 2.6: Taxa de aplicação anual máxima de metais em solos agrícolas tratados com lodos (CETESB, 1999).	18
Tabela 2.7: Cargas cumulativas máximas permissíveis de metais pela aplicação de lodo em solos agrícolas (CETESB, 1999).	18
Tabela 2.8: Odores associados ao esgoto doméstico (adaptado de METCALF & EDDY, 1991).	20
Tabela 2.9: Modelos de cinética de secagem.	38
Tabela 2.10: Desempenho típico de centrífugas no desaguamento do lodo (adaptado de GONÇALVES & LUDUVICE, 2000).	40
Tabela 2.11: Principais agentes patogênicos presentes no lodo de esgoto (adaptado de SANEPAR, 2000).	47
Tabela 2.12: Concentração de agentes patogênicos presentes em diferentes categorias de lodo (adaptado de TSUTIYA <i>et al.</i> , 2001).	48
Tabela 2.13: Tempo de sobrevivência de alguns patógenos no solo e sobre a superfície de plantas (adaptado de EPA, 2003).	49
Tabela 2.14: Processos de redução adicional de patógenos ou PFRP para o tratamento do lodo, recomendado para o biossólido Classe A (EPA, 2003).	51
Tabela 2.15: Processos de redução de patógenos ou PSRP para o tratamento do lodo, recomendado para o biossólido Classe B (EPA, 2003).	52

Tabela 3.1: Dimensões características da câmara de secagem.....	62
Tabela 3.2: Planejamento Fatorial 3 ²	69
Tabela 4.1: Massa de sólidos totais e fixos no lodo seco.	74
Tabela 4.2: Concentração de metais no lodo bruto e após a secagem (mg de metal/kg de lodo seco).....	74
Tabela 4.3: pH obtidos para as amostras de lodo seco, em duplicata (T em °C, e Q em kg.min ⁻¹).	76
Tabela 4.4: Concentração de nitrogênio total no lodo seco, em duplicata (g/kg de lodo). .	77
Tabela 4.5: Resultado das análises de COT das amostras de lodo tratado termicamente, em duplicata (em g de C/kg de lodo).....	80
Tabela 4.6: Tempo de secagem de sólidos nas bandejas 1 e 2 (em minutos).....	90
Tabela 4.7: Redução do volume (V/V ₀).	94
Tabela 4.8: Porcentagem de modelos ajustados para a bandeja 1.	96
Tabela 4.9: Porcentagem de modelos ajustados para a bandeja 2.	97
Tabela 4.10: Ajuste dos parâmetros do modelo de Henderson e Pabis (1961) (variáveis do processo codificadas) para a bandeja 2.....	98
Tabela 4.11: Ajuste dos parâmetros dos melhores modelos para a condição de processo de 80°C e 0,2 kg.min ⁻¹	101
Tabela 4.12: Ajuste dos parâmetros dos melhores modelos para a condição de processo de 110°C e 0,3 kg.min ⁻¹	101
Tabela 4.13: Ajuste dos parâmetros dos melhores modelos para a condição de processo de 140°C e 0,4 kg.min ⁻¹	102
Tabela 4.14: Conteúdo de umidade inicial para as quatro amostras de lodo sazonal.	105
Tabela 4.15: Valores de pH para as quatro amostras de lodo estudadas.	106
Tabela 4.16: Contagem de bactérias presentes no lodo bruto armazenado sob 7°C.	110
Tabela 4.17: Contagem de helmintos e protozoários no lodo bruto e tratado termicamente.	112
Tabela B1: Dados obtidos na calibração da placa de orifício para: T=28°C; b=760mmHg; d1=50,8mm e d2=20,1mm.	141
Tabela E1: Dados relativos ao ensaio 1 (T = 110 °C; Q = 0,4 kg.min-1).	164
Tabela E2: Dados relativos ao ensaio 2 – duplicata (T = 110 °C; Q = 0,4 kg.min-1).....	165
Tabela E3: Dados relativos ao ensaio 3 (T = 110 °C; Q = 0,3 kg.min-1).	166
Tabela E4: Dados relativos ao ensaio 4 - duplicata (T = 110 °C; Q = 0,3 kg.min-1).	167

Tabela E5: Dados relativos ao ensaio 5 ($T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,4\text{ kg.min}^{-1}$).	168
Tabela E6: Dados relativos ao ensaio 6 - duplicata ($T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,4\text{ kg.min}^{-1}$).	169
Tabela E7: Dados relativos ao ensaio 7 ($T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,2\text{ kg.min}^{-1}$).	170
Tabela E8: Dados relativos ao ensaio 8 – duplicata ($T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,2\text{ kg.min}^{-1}$).	171
Tabela E9: Dados relativos ao ensaio 9 ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,4\text{ kg.min}^{-1}$).	172
Tabela E10: Dados relativos ao ensaio 10 - duplicata ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,4\text{ kg.min}^{-1}$).	173
Tabela E11: Dados relativos ao ensaio 11 ($T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,3\text{ kg.min}^{-1}$).	174
Tabela E12: Dados relativos ao ensaio 12 - duplicata ($T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,3\text{ kg.min}^{-1}$). ..	175
Tabela E13: Dados relativos ao ensaio 13 ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,3\text{ kg.min}^{-1}$).	176
Tabela E14: Dados relativos ao ensaio 14 - duplicata ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,3\text{ kg.min}^{-1}$).	177
Tabela E15: Dados relativos ao ensaio 15 ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,2\text{ kg.min}^{-1}$).	178
Tabela E16: Dados relativos ao ensaio 16 – duplicata ($T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,2\text{ kg.min}^{-1}$).	179
Tabela E17: Dados relativos ao ensaio 17 ($T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,2\text{ kg.min}^{-1}$).	180
Tabela E18: Dados relativos ao ensaio 18 - duplicata ($T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,2\text{ kg.min}^{-1}$). ..	181

NOMENCLATURA

- a – constante dos modelos de secagem
- b - constante dos modelos de secagem
- b 1 – bandeja 1
- b 2 – bandeja 2
- c - constante dos modelos de secagem
- d - constante dos modelos de secagem
- D_{ef} – difusividade efetiva
- k - constante dos modelos de secagem
- l – espessura da placa [L]
- M – massa inicial (úmida) [M]
- M_{SF} - massa de sólidos fixos [M]
- M_{ST} - massa de sólidos totais [M]
- n - constante dos modelos de secagem
- n – número de termos da equação (Equação 2.5)
- q – constante na Equação de Fick (Equação 2.4)
- Q – vazão mássica do ar de secagem [M/t]
- r – distância de um ponto ao centro do material na Equação de Fick (Equação 2.4)
- R^2 – Coeficiente de correlação
- SF – sólidos fixos [M/M]
- SST – sólidos secos totais [M]
- ST – sólidos totais [M/M]
- SV – sólidos voláteis [M/M]
- T – temperatura [T]
- t – tempo de secagem [t]
- T_g – Temperatura do gás de secagem [T]
- T_xQ – interação entre os fatores temperatura e vazão do ar de secagem [T] x [M/t]
- V – Volume da amostra seca [L³]
- V_0 – Volume da amostra úmida [L³]
- X – conteúdo de umidade em B.S. [M/M]
- X_0 – conteúdo de umidade inicial em B.S. [M/M]

X_{cr} – Conteúdo de umidade crítico em B.S. [M/M]

X_{eq} – Conteúdo de umidade de equilíbrio em B.S. [M/M]

X_R – razão de umidade (adm)

W – fração mássica do conteúdo de umidade da amostra seca em B.U. (%)

W_0 – fração mássica do conteúdo de umidade da amostra úmida em B.U. (%)

W_D – Taxa de secagem [M/(M.t)]

Gregas

Δh – diferença de altura medida no manômetro em “U” [L]

ρ – massa específica, densidade aparente da amostra seca [M/L³]

ρ_0 – massa específica, densidade aparente da amostra úmida [M/L³]

Abreviaturas

AA – Absorção Atômica

ADM – adimensional

A/I – Alterados/Inviáveis

band – bandeja

B.S., b.s. – base seca

B.U., b.u. – base úmida

COT – Carbono Orgânico Total

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

ND – Não detectados

NMP – Número Mais Provável

NPMP – Não Passa pela Maioria dos Pontos

PCB's – Bifenilas Policloradas

PMP – Passa pela Maioria dos Pontos

UFP – Unidade Formadora de Placa

Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Tabela de Análise da variância no planejamento estatístico

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo

EPA – Environmental Protection Agency

IAC – Instituto Agrônomo de Campinas

IAL – Instituto Adolfo Lutz

LEA – Laboratório de Engenharia Ambiental

PFRP – Process to Further Reduce Pathogens

PSRF – Process to Significantly Reduce Pathogens

Unicamp – Universidade Estadual de Campinas

WEF – Water Environment Federation

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação da Pesquisa

O aumento significativo do volume de águas residuárias descartadas mundialmente vem exigindo alternativas tanto para a eliminação como sua redução de volume, visando minimizar os sérios impactos ambientais atuais.

O lodo de esgoto, um dos produtos decorrentes destas águas residuárias, se constitui no resíduo urbano produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), sendo um material com alto conteúdo de umidade (95-99% de água em sua composição) e com composição bastante diversificada e crítica em função dos tipos de constituintes presentes, como produtos fermentáveis, organismos patogênicos, metais pesados e PCB's, etc. (SILVA *et al.*, 2004).

O gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos pode resultar em riscos indesejáveis às comunidades, constituindo-se, ao mesmo tempo, em problemas de saúde pública e fator de degradação do ambiente. A variedade e a quantidade de resíduos gerados com o avanço tecnológico, tem agravado os problemas de contaminação do meio ambiente, de higiene e saúde, além da preocupação quanto à escolha de locais para a disposição, destino adequado, processos de tratamento e redução da geração (CARVALHO, 2003).

Atualmente, observa-se a grande dificuldade em relação à disposição final de resíduos sólidos, sendo que os lodos provenientes das ETEs fazem parte deste grupo de resíduos. Especificamente nas ETEs essa dificuldade está associada a elevada quantidade gerada.

O uso da secagem térmica é uma alternativa empregada para minimização de resíduos, que vem sendo utilizada com resultados positivos na área ambiental, sendo considerada uma tecnologia em ascensão, pois a utilização deste processo para o tratamento final do lodo de esgoto promove uma redução acentuada do volume de lodo produzido e, em função do tempo e da temperatura elevada do processo, pode promover também a eliminação de microrganismos patogênicos, diminuindo assim os problemas relativos à disposição final.

Traub (2004) enfatiza que a secagem tem sido usada para preservação e mudanças de estado e propriedades desde os tempos bíblicos e que durante as últimas décadas, intensivos esforços foram investidos para o estudo do mecanismo e melhoria do processo, sendo este usado em muitas indústrias. Mais recentemente é também uma alternativa na minimização de produtos gerados no setor de tratamento de resíduos, e constitui para as empresas cerca de 2 – 60% do capital e do custo de operação.

O presente trabalho teve como motivação a avaliação da secagem de resíduos sólidos, especificamente o lodo de esgoto, que é um dos resíduos urbanos gerados nas ETEs e que atualmente tem apresentado diversos problemas relacionados ao gerenciamento, principalmente pelo grande volume gerado e pela quantidade significativa de microrganismos patogênicos. Para o estudo foi utilizado o secador convectivo direto de fluxo ascendente instalado no Laboratório de Engenharia Ambiental – LEA. Foi selecionada como matéria-prima o lodo de esgoto primário centrifugado, com aproximadamente 30% de sólidos, proveniente da ETE – Tatu, da cidade de Limeira – SP, para a verificação da viabilidade do processo de secagem para redução de seu volume e inativação dos microrganismos patogênicos deste material. A empresa mantenedora da ETE é a Águas de Limeira S.A., responsável pelo esgotamento sanitário e abastecimento de água da cidade de Limeira – SP, que produz cerca de 40 ton/dia de lodo.

Como resultado deste trabalho, verificou-se que o processo de secagem promoveu a redução do volume de lodo em cerca de 50% e que o mecanismo de secagem foi predominantemente difusivo, permitindo uma redução de umidade de 70,95% (b.u.) para 2 % (b.u.). Este valor atende a um dos requisitos da Norma P-4.230 da CETESB (1999) para a utilização deste material como bio-sólido. Foi observado que a melhor condição do processo ocorreu a temperatura de 140°C e vazão de ar de 0,4 kg.min⁻¹. Foi verificado também que a sazonalidade tem pouco efeito nas condições estudadas e que pelo tempo de secagem do processo é possível inativar em quase todas as condições de estudo as bactérias e os parasitas presentes no lodo “in natura”. Com isso, pode-se concluir que a secagem desenvolvida neste trabalho apresenta-se promissora como uma alternativa para minimização de problemas ambientais decorrentes do lodo gerado nas ETEs.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de secagem de lodos de ETE, em secador convectivo direto de fluxo ascendente, visando a redução de volume e a inativação de microrganismos, além de contribuir com informações para a resolução de problemas ambientais, especificamente na área de geração de resíduos sólidos urbanos. O desenvolvimento envolveu a realização das seguintes etapas:

- Determinar as características físico-químicas, antes e após a secagem térmica, verificando as possíveis alterações ocasionadas pelo processo;
- Adaptar e estudar o sistema de secagem, visando o desenvolvimento experimental da secagem do lodo, a partir de planejamento experimental considerando diversas condições operacionais de processo;
- Estudar modelos matemáticos citados em literatura, para verificar o ajuste dos mesmos aos dados experimentais;
- Avaliar o efeito da secagem para a redução de volume;
- Avaliar o efeito da sazonalidade, verificando possíveis alterações nas características do lodo de esgoto de ETE devido a diversidade nos descartes em períodos distintos e o efeito no seu tratamento por processo de secagem; e
- Estudar a inativação microbiológica para verificar a eficácia do sistema de secagem na eliminação de bactérias (*E. coli* e *Salmonella* spp) e parasitas (helmintos e protozoários).

1.3. Apresentação do trabalho

Este trabalho será apresentado em cinco capítulos, uma listagem de referências bibliográficas e em cinco apêndices, a saber:

Capítulo 1: Introdução, onde são abordados aspectos e problemática que motivaram a pesquisa e definiram os objetivos do trabalho.

Capítulo 2: Revisão de literatura, onde é apresentada uma revisão dos trabalhos envolvendo informações sobre lodo de ETE e sua inserção nas questões ambientais, sobre a secagem, os secadores, e seus parâmetros de estudo em modelos, e ainda, sobre os microrganismos presentes nestes materiais, procedimentos de análises e padrões de inativação. A abordagem diversificada é justificada pelo interesse multidisciplinar deste trabalho.

Capítulo 3: Desenvolvimento Experimental, onde são apresentados os materiais, o procedimento experimental com descrição do sistema, o planejamento experimental, as metodologias para a caracterização físico-química do lodo estudado, determinação dos microrganismos patogênicos, verificação da redução (encolhimento) do volume e o estudo de modelos matemáticos para o estudo da secagem.

Capítulo 4: Resultados e Discussão, onde são apresentados os resultados experimentais, as simulações, e discussões. Inicialmente são colocados os resultados da caracterização físico-química do lodo bruto e tratado, e os resultados do estudo da secagem bem como a análise estatística do planejamento experimental proposto. Em seguida, são analisados a redução de volume decorrente do processo de secagem e os resultados das simulações que possibilitaram a escolha dos modelos que melhor se ajustaram aos dados cinéticos da secagem de lodo de esgoto primário. São apresentados também a avaliação do estudo da secagem sob o efeito da sazonalidade do lodo, e os resultados da verificação da inativação microbiológica para cada condição proposta.

Capítulo 5: Conclusões e Sugestões, onde é apresentado o fechamento do trabalho proposto através das conclusões obtidas, e ainda são descritos alguns temas como sugestão para continuação do trabalho proposto.

Apêndice A: Calibração dos Termopares, onde é apresentado a metodologia e os resultados obtidos para a calibração dos cinco termopares utilizados no estudo da secagem.

Apêndice B: Calibração da placa de orifício, onde é apresentado a metodologia e os resultados obtidos para a obtenção da vazão do ar de secagem, medida pela placa de orifício do sistema de secagem.

Apêndice C: Cinética e taxa de secagem dos ensaios realizados, onde são apresentadas todas as curvas de cinética e de taxa de secagem do planejamento experimental proposto.

Apêndice D: Perfis de Temperatura dos ensaios de secagem, onde são apresentadas todas as curvas de perfis de temperatura em cada ensaio de secagem.

Apêndice E: Tabela de dados para a confecção das curvas de cinética e de taxa de secagem, e dos perfis de temperatura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão dos trabalhos envolvendo informações sobre lodo de ETE e sua inserção nas questões ambientais, sobre a secagem, os secadores e seus parâmetros de estudo em modelos e ainda sobre os microrganismos presentes nestes materiais, procedimentos de análises e padrões de inativação. A abordagem diversificada é justificada pelo interesse multidisciplinar deste trabalho.

2.1. Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto

A crescente demanda social pela melhoria e manutenção das condições ambientais tem exigido do Estado e da iniciativa privada novas atividades capazes de compatibilizar o desenvolvimento às limitações de exploração dos recursos naturais (ANDREOLI *et al.*, 1998).

Priestley (2001) observou que o aumento da urbanização e da industrialização tem resultado num aumento significativo do volume de águas residuárias produzidas mundialmente.

Atualmente a maior parte do lodo produzido no Brasil ainda é destinada a aterros sanitários. Além de representar elevados custos financeiros, que podem atingir 40% do custo operacional de uma estação de tratamento de esgotos (TSUTIYA, 2000), a disposição em aterro pode gerar problemas sociais para a população residente em suas periferias. Por outro lado, a geração de resíduo continuará a ocorrer até de forma crescente e as áreas apropriadas e disponíveis para a construção de aterros irá diminuir, o que evidencia que a disposição em aterro não é sustentável considerando-se uma escala temporal de longo prazo.

Porém, a busca pela melhoria e manutenção das condições ambientais, torna o tratamento do esgoto doméstico uma atividade de grande importância, devido à alta

densidade populacional mundial, sendo o gerenciamento do lodo um problema atual crescente devido à poluição ambiental e a energia consumida (ARLABOSSE *et al.*, 2004).

Para a Water Environment Federation - WEF (1996), o termo lodo é definido como sendo os produtos orgânicos gerados nos processos de tratamentos de esgotos, que não tenham sido apropriadamente processados para reciclo benéfico. A EPA (2003) apenas denomina o lodo de esgoto como o resíduo gerado durante o tratamento do esgoto doméstico. Após os processos de estabilização físicos, químicos e biológicos, o material recebe uma nova denominação, “biossólido”, definido pela norma P 4230 (CETESB, 1999), vigente no estado de São Paulo, como o lodo proveniente das estações de tratamento de esgotos sanitários, processados de modo a permitir o seu manuseio de forma segura na utilização agrícola. Este mesmo conceito é ampliado pela WEF (1996), que tratados ou beneficiados pelos processos de estabilização citados acima, podem ser utilizados de forma benéfica, ou seja, a utilização deste produto além da utilização agrícola. A EPA (2003) ainda refere-se ao biossólido especificamente como sendo o lodo de esgoto que tenha sofrido um tratamento que cumpre as normas federais e estaduais para o uso benéfico, tendo como exemplo a utilização agrícola.

Silva *et al.* (2004) definiram o lodo como um resíduo úmido com 95-99% de água em sua constituição, e com composição problemática devido a presença de produtos fermentáveis, organismos patogênicos, metais pesados e PCB's, entre outros.

Segundo Andreoli *et al.* (2000a), o lodo produzido pelas estações de tratamento de esgoto é um resíduo com destinação problemática, pois mesmo sendo tratado, ainda apresenta potencial poluidor e de contaminação por organismos patogênicos que podem causar sérios problemas à saúde. Além disso, sem os devidos cuidados é um dos maiores poluidores de rios e mananciais, que altera e dificulta o curso normal de vida da fauna e flora da região afetada.

A Figura 2.1 apresenta o esquema de um sistema de tratamento de esgoto, com as principais etapas de tratamento, conforme SABESP (2005).

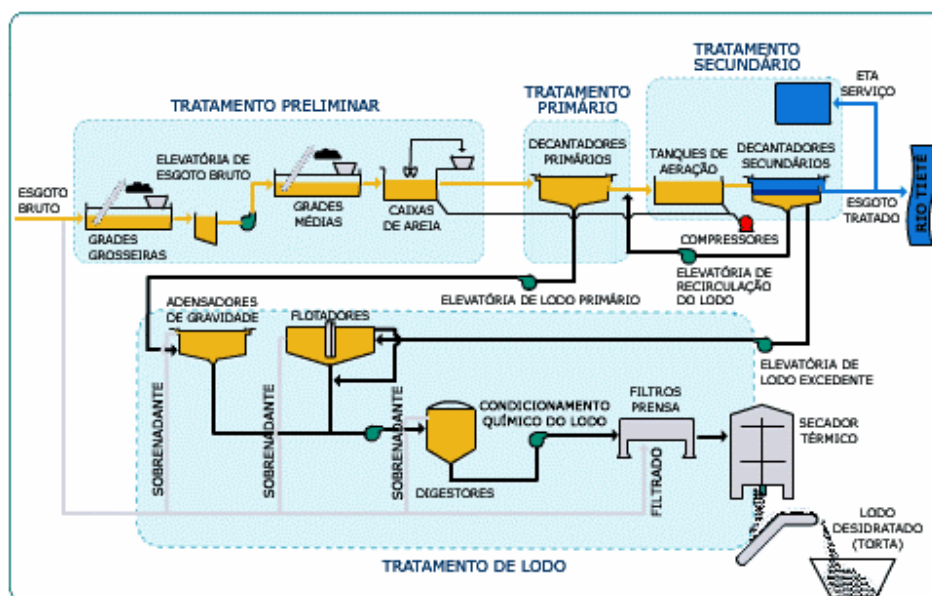


Figura 2.1: Esquema de uma estação de tratamento (SABESP, 2005).

Machado (2001) afirmou que todos os tipos de tratamento de esgotos geram subprodutos, cujas características e a quantidade gerada juntamente com o regulamento vigente afetam a escolha mais adequada da disposição destes. O referido autor coletou dados de 275 estações de tratamento de esgoto distribuídas pelo Brasil, onde obteve a produção estimada de lodo em cada região do país no ano de 2001. Estes dados são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Dados relativos às Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil (adaptado de MACHADO, 2001).

Região	n.º de ETEs	Vazão de esgoto tratado (m ³ /dia)	Produção estimada de lodo (ton. SST/ano)
Norte	03	121.183,00	328,51
Nordeste	66	228.056,57	15.668,12
Centro-Oeste	66	324.776,12	19.497,01
Sudeste	48	1.033.307,60	98.138,76
Sul	92	279.294,96	18.092,10
Brasil	275	1.877.618,25	151.724,50

Embora a Tabela 2.1 mostre o resultado de apenas 275 ETEs distribuídas pelo Brasil, observa-se claramente que a região sudeste é a maior produtora de lodo. Esta produção está ligada à alta densidade populacional desta região, principalmente a do Estado de São Paulo. No estado de São Paulo, somente a concessionária Sabesp atende um total de 366 municípios, e espera atender até 2010, um valor superior a 80% do esgoto desses municípios.

Para Cambero *et al.* (2004), o lodo de esgoto é um sub-produto do tratamento de águas residuárias, e representa um problema significativo em termos de volume e de seu conteúdo orgânico, especialmente relativo à disposição final.

Jordão & Pessoa (1995) apresentaram os produtos gerados nos mais diversos processos de tratamentos de esgoto, cujo resumo encontra-se na Tabela 2.2.

2.2. Classificação do lodo de esgoto

A EPA (2003) considerou apenas três tipos básicos de lodo: primário, secundário e terciário.

O lodo primário é gerado no tratamento primário de esgoto, e separado do esgoto através do processo de sedimentação, contendo em torno de 2 a 8% de sólidos, podendo aumentar esta porcentagem através do processo de adensamento ou desidratação.

O lodo secundário, também chamado de lodo biológico, é gerado no tratamento biológico do esgoto (tratamento secundário), com características e quantidades produzidas de acordo com o metabolismo e com a taxa de crescimento dos vários microrganismos presentes no lodo. Contém cerca de 0,5 a 2% de sólidos em sua composição, tornando o adensamento ou desidratação mais difíceis quando comparado aos lodos primário e terciário (químico).

O lodo terciário, também chamado de lodo químico, é gerado nos processos avançados de tratamento de esgoto (precipitação química, filtração, entre outros). Estes processos adicionam sais de alumínio ou de ferro, cal e/ou polímeros orgânicos, para auxiliar na remoção de material coloidal, sólidos suspensos e fósforo contidos no esgoto. A

adição de polímeros ou cal é utilizada geralmente para melhorar o adensamento e a desidratação do lodo, enquanto que os sais de ferro e de alumínio reduzem a capacidade de adensamento e desidratação do mesmo, resultando em um lodo praticamente líquido.

Tabela 2.2: Produtos gerados no tratamento de esgoto e de lodo (JORDÃO & PESSÔA, 1995).

Tratamento	Processo	Produtos gerados
Preliminar	<ul style="list-style-type: none"> - Gradeamento; - Remoção de areia; - Separação do óleo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Material gradeado (madeira, trapos, folhas, etc.); - Areia, silte, etc.; - Óleo, espuma oleosa.
Primário	<ul style="list-style-type: none"> - Sedimentação; - Flotação por ar dissolvido; - Coagulação e sedimentação. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos orgânicos, espuma; - Matéria graxa, espuma; - Sólidos orgânicos, precipitados químicos, espuma.
Secundário	<ul style="list-style-type: none"> - Lodos ativados, Filtros biológicos com sedimentação final. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos gerados no processo biológico.
Terciário	<ul style="list-style-type: none"> - Coagulação química e sedimentação; - Filtração em areia; - Adsorção em carvão ativado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos da precipitação química, hidróxidos; - Sólidos na água de lavagem; - Carvão ativado para ser regenerado.
Lagoas de Estabilização	<ul style="list-style-type: none"> - Lagoas fotossintéticas; - Lagoas aeradas; - Lagoas de decantação. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos acumulados no fundo, algas no efluente; - Sólidos em suspensão no efluente; - Sólidos gerados na lagoa aerada.
Aplicação no terreno	<ul style="list-style-type: none"> - Pré-tratamento, primário ou secundário. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos em suspensão no efluente do pré-tratamento.
Adensamento do lodo	<ul style="list-style-type: none"> - Adensamento por gravidade, por flotação, filtros de esteira, centrífugas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lodo concentrado.
Tratamento do lodo	<ul style="list-style-type: none"> - Digestão anaeróbia, aeróbia; - Compostagem. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos orgânicos parcialmente estabilizados; - Gás.
Remoção da umidade do lodo	<ul style="list-style-type: none"> - Leitos de secagem; - Desidratação mecânica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torta de lodo seco.
Disposição final do lodo	<ul style="list-style-type: none"> - Aterros; - Incineração; - Pirólise 	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos secos espalhados e compactados; - Cinzas; - Vários produtos.

Metcalf & Eddy (1991) apresentaram uma classificação mais detalhada para os lodos de ETE, considerando principalmente as características físicas e sensoriais de cada tipo, cujo resultado encontra-se na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Características físicas dos lodos gerados em uma Estação de Tratamento de Esgoto - ETE (METCALF & EDDY, 1991).

Tipos de lodos	Descrição
Lodo Primário	<ul style="list-style-type: none"> - Geralmente é cinza e viscoso, tem um odor extremamente desagradável; e - Pode ser estabilizado rapidamente, desde que haja condições apropriadas de operação.
Lodo de Precipitação Química	<ul style="list-style-type: none"> - O lodo originado da precipitação química com sais de metais são geralmente de coloração escura, embora a sua superfície possa apresentar coloração vermelha se nele estiver contido muito ferro; - O lodo que sofreu calagem (adição de cal) é marrom-acizentado; - O odor do lodo químico é desagradável, mas não tanto como o do lodo primário; - Enquanto o lodo químico é pouco viscoso, o hidrato de ferro ou de alumínio faz com que o lodo fique com uma consistência gelatinosa; - Quando confinado num tanque, o lodo sofrerá uma decomposição similar ao lodo primário, mas numa taxa mais lenta; e - Quantidade substancial de gás é despreendida e a densidade do lodo aumenta ao longo do período de confinamento.
Lodo Ativado	<ul style="list-style-type: none"> - Geralmente, é amarronzado de aparência floculenta; - Se a coloração for escura, o lodo pode estar próximo das condições sépticas; - Se a coloração for mais clara que a usual, isto deve-se à baixa aeração, tendendo para uma sedimentação lenta dos sólidos; - O lodo em boas condições tem um cheiro semelhante ao de terra; - O lodo tende a se tornar séptico rapidamente e então, apresenta um odor desagradável de putrefação; e - O lodo ativado poderá ser digerido rapidamente sozinho ou quando misturado com o lodo primário.
Lodo Digerido (aeróbio)	<ul style="list-style-type: none"> - É marrom-escuro e tem uma aparência floculenta; - O odor não é desagradável; e - Os lodos bem digeridos aerobiamente secam facilmente em leitos de secagem.

Tabela 2.3(continuação): Características físicas dos lodos gerados em uma Estação de Tratamento de Esgoto - ETE (METCALF & EDDY, 1991).

Tipos de lodos	Descrição
Lodo Digerido (anaeróbio)	<ul style="list-style-type: none"> - É marrom-escuro a preto; - Contém uma quantidade muito grande de gases; e - Quando totalmente digerido, não possui cheiro desagradável.
Lodo Compostado	<ul style="list-style-type: none"> - Geralmente, é marrom-escuro a negro, mas pode variar de acordo com o material adicionado no processo de compostagem, como por exemplo lascas de madeira; e - O odor do lodo bem compostado não é desagradável.
Lodo de tanques sépticos	<ul style="list-style-type: none"> - O lodo de tanques sépticos são negros.

2.3. Características físico-químicas do lodo

De acordo com Malina (1993), as características do lodo podem variar anualmente, sazonalmente, ou até mesmo diariamente por causa das variações do material de esgoto recebido e das variações de performance dos processos de tratamento, com diferenças mais acentuadas em sistemas que recebem uma grande quantidade de descarga industrial. A constituição do lodo está intimamente relacionada ao nível sócio-cultural da população e apresenta composição química bastante heterogênea em função da origem do esgoto a partir do qual foi gerado (FORTUNY & FULLER, 1979).

Silva (2003) observou que quanto maior a concentração de esgoto, mais fortes são o odor e a turbidez, sendo que a maior ou menor concentração depende do consumo *per capita* e da quantidade de dejetos industriais. Na Figura 2.2, estão mostrados o agrupamento dos sólidos presentes no esgoto.

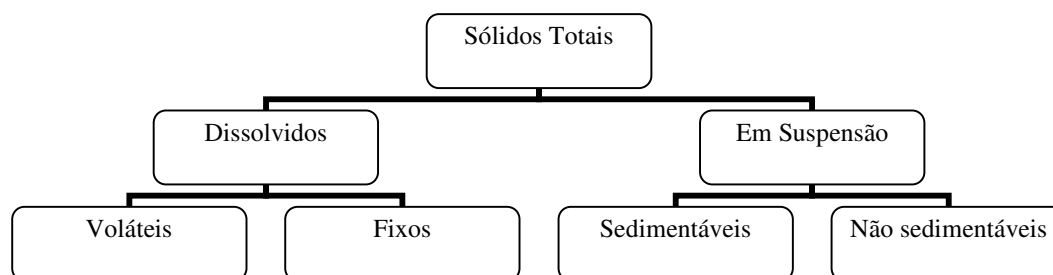


Figura 2.2: Agrupamento dos sólidos presentes no esgoto (SILVA, 2003).

Os esgotos sanitários municipais são constituídos basicamente de uma mistura de água, sólidos orgânicos e minerais. Sua composição média aponta para 99,9% de água e 0,1% de sólidos, conforme David (2002). Spellman (1997) apresentou essa mesma composição, sendo os sólidos totais (0,1%) divididos em 50% em sólidos suspensos e 50% em sólidos dissolvidos, e os principais componentes orgânicos da porção sólida são proteínas, uréia e outros compostos nitrogenados; amidos, açúcares e celulose-carboidratos; sabões, óleo de cozinha e graxa-gorduras; e para os componentes inorgânicos incluem-se os sais metálicos e cloretos. Verifica-se ainda que a composição presente no esgoto bruto, pode influenciar na qualidade final do lodo. A Figura 2.3 apresenta a composição típica do lodo de esgoto bruto, conforme Spellman (1997).

Coscione & Ceolato (2006) afirmaram que os principais parâmetros a serem analisados na caracterização dos esgotos domésticos, e que influenciam na geração do lodo são: a quantidade de sólidos, a concentração de matéria orgânica, de nitrogênio e de fósforo, o pH, a quantidade de óleos e graxas e a quantidade de sólidos. Segundo os autores, os sólidos divididos entre sólidos fixos e voláteis, devem ser considerados os parâmetros de maior significância para o dimensionamento e controle de operações das estações de tratamento de esgoto, pois o conhecimento da quantidade de sólidos voláteis permite determinar a sua estabilidade biológica.

Os autores ainda observaram que os 70% de matéria orgânica presentes no lodo estão distribuídos na seguinte forma: compostos de proteínas (40 a 60%), carboidratos (25 a 50%), gorduras e óleos (10%) e, em menor quantidade, uréia, surfactantes, fenóis e pesticidas, e ainda, que o nitrogênio presente no esgoto bruto está quase todo combinado

sob a forma de proteína e uréia, pois as bactérias, durante o processo de oxidação biológica, transformam-no, primeiramente, em amônia, depois em nitrito, e posteriormente em nitrato, sendo que a concentração em que o nitrogênio se encontra sob essas formas pode indicar o tempo de armazenagem do esgoto ou a sua estabilização.

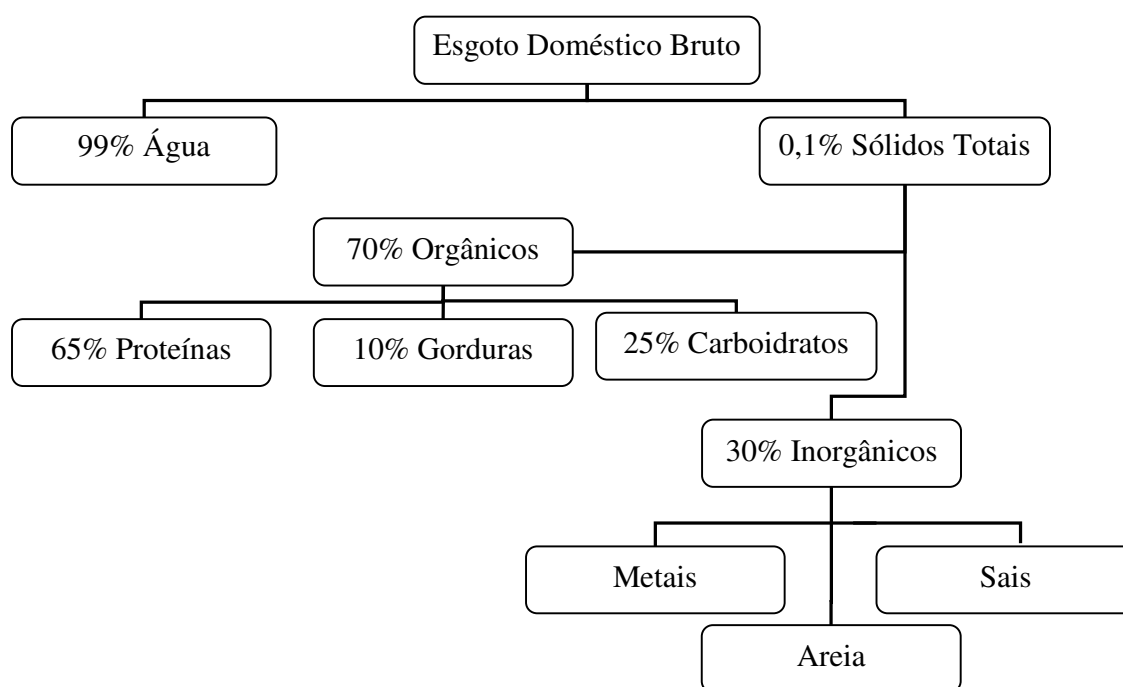


Figura 2.3: Composição típica do esgoto bruto (SPELLMAN, 1997).

De acordo com Metcalf & Eddy (1991), a composição química do lodo é muito importante, à medida que o seu destino final depende diretamente da sua constituição. Os elementos nitrogênio e fósforo são essenciais para o crescimento de protistas e plantas, pois são conhecidos nutrientes ou bioestimulantes. Quantidades traços de outros elementos, como o ferro, também são necessários ao crescimento biológico, porém, nitrogênio e fósforo são, em muitos casos, os nutrientes de maior importância. A composição química e outros parâmetros relevantes para o lodo bruto e digerido são apresentados na Tabela 2.4.

Gerardi (2006) observou que o efluente das estações de tratamento municipais de esgoto contém compostos orgânicos nitrogenados e nitrogênio inorgânico na forma de amônia ionizada. Aproximadamente 60% do resíduo nitrogenado está na forma orgânica e

40% na forma inorgânica, principalmente na forma de amônia ionizada em concentrações da ordem de 25 – 30 mg/L.

Com relação aos metais, os lodos podem conter quantidades variadas de metais pesados e íons inorgânicos como o boro, cádmio, cromo, cobre, chumbo, níquel, mercúrio, prata e zinco. A quantidade de metais pesados presentes no lodo afeta diretamente seu uso como bio-sólido.

Tabela 2.4: Composição química típica e propriedades dos lodos bruto e digerido (Adaptado de METCALF & EDDY, 1991).

Parâmetros	Lodo bruto		Lodo digerido	
	Variação	Valor típico	Variação	Valor típico
Sólidos secos totais (ST), %	2,0 – 8,0	5,0	6,0 – 12,0	10,0
Sólidos voláteis (% de ST)	60 – 80	65	30 - 60	40
Graxas e gorduras solúveis (% de ST)	6 – 30	-	5 - 20	18
Proteínas (% de ST)	20 - 30	25	15 -20	18
Nitrogênio – N (% de ST)	1,5 – 4,0	2,5	1,6 – 6,0	3,0
Fósforo – P ₂ O ₅ (% de ST)	0,8 – 2,8	1,6	1,5 – 4,0	2,5
Potássio – K ₂ O (% de ST)	0 - 1	0,4	0 – 3,0	1,0
Celulose (% de ST)	8,0 – 15,0	10,0	8,0 – 15,0	10,0
Ferro (% de ST)	2,0 – 4,0	2,5	3,0 – 8,0	4,0
Sílica – SiO ₂ (% de ST)	15,0 – 20,0	-	10,0 – 20,0	-
pH	5,0 – 8,0	6,0	6,5 – 7,5	7,0
Alcalinidade (mg/L CaCO ₃)	500 - 1500	600	2500 - 3500	3000
Ácidos orgânicos (mg/L HAc)	200 - 2000	500	100 - 600	200
Energia contida (Btu/lb)	10000 - 12500	11000	4000 - 6000	5000

Malina (1993) observou que em baixas concentrações, esses elementos são micronutrientes essenciais para as plantas e animais, mas em concentrações elevadas podem ser tóxicos. As faixas e as medianas para os metais no lodo são listadas na Tabela 2.5.

Tsutiya (2001) observou que para a utilização do lodo na agricultura deve ser considerada a presença de metais potencialmente tóxicos, mediante a avaliação das concentrações máximas de metais em solos agrícolas e as cargas cumulativas máximas de metais em solos, proporcionados pela aplicação desse lodo.

Tabela 2.5: Metais presentes no lodo (MALINA, 1993) e concentração máxima permitida pela Cetesb (1999).

Metal	Quantidade no lodo (mg/kg)		
	Faixa	Mediana	Conc. máx. permitida (CETESB, 1999)
Zinco	101 – 49.000	1.700	7500
Chumbo	13 – 26.00	500	840
Cobre	84 – 17.000	800	4300
Níquel	2 – 5.300	80	420
Cádmio	1 – 3.410	10	85
Mercurio	0,6 – 56	6	57
Arsênio	1,1 – 230	10	75
Cobalto	13,3 – 2.490	30	-----
Cromo	10 – 99.000	500	3000
Ferro	1.000 – 154.000	17.000	-----
Manganês	32 – 9.870	260	-----
Molibdênio	0,1 – 214	4	75
Estanho	2,6 – 329	14	-----
Selênio	1,7 – 17,2	5	100

A Norma P 4.230 da CETESB (1999) fixou limites para o teor de metais no lodo de esgotos, conforme apresentado na Tabela 2.5. Acima desses valores o lodo não pode ser utilizado na agricultura.

De acordo com Silva (2005) a taxa de aplicação a ser adotada deve corresponder ao menor valor calculado em função: do nitrogênio disponível, do teor de metais, da capacidade de elevação de pH do solo, ou de outros nutrientes, se necessário. Na Tabela 2.6 são apresentados os limites do teor de metais potencialmente tóxicos a serem aplicados anualmente no solo, de acordo com CETESB (1999).

A norma referida estabelece também os limites de acumulação de metais no solo, calculados com base na soma das cargas, considerando-se o teor de metais no lodo e as taxas de aplicação utilizadas, conforme a Tabela 2.7.

Tabela 2.6: Taxa de aplicação anual máxima de metais em solos agrícolas tratados com lodos (CETESB, 1999).

Metal	Taxa de aplicação anual (kg/ha/período de 365 dias)
Arsênio	2
Cádmio	1,9
Cobre	75
Chumbo	15
Mercúrio	0,85
Níquel	21
Selênio	5
Zinco	140

Tabela 2.7: Cargas cumulativas máximas permissíveis de metais pela aplicação de lodo em solos agrícolas (CETESB, 1999).

Metal *	Carga máxima acumulada de metais pela aplicação do lodo (kg/ha)
Arsênio	41
Cádmio	39
Cobre	1500
Chumbo	300
Mercúrio	17
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

* Para o Cromo será respeitado o limite de 500 mg kg⁻¹ de solo.

A cada cinco anos de aplicação do lodo no solo, deverá ser efetuada uma determinação de metais ao longo do perfil superficial do solo, nas seguintes profundidades: 0-20 cm e de 20-40 cm. A determinação de metais na camada superficial será realizada anualmente, para os casos em que os metais forem considerados poluentes limitantes da taxa de aplicação ou a partir da data em que a taxa acumulada teórica alcançar 80 % do máximo permissível (Tabela 2.7), de modo a verificar se as aplicações subseqüentes são apropriadas.

Segundo a EPA (2003), os odores desagradáveis são a causa mais importante, e única, de descontentamento público com os biossólidos ou outros produtos orgânicos,

sendo a administração do odor de altíssima prioridade em projetos de utilização e reciclagem destes materiais.

Para Metcalf & Eddy (1991), os odores em águas residuárias domésticas geralmente são causados por gases produzidos pela decomposição da matéria orgânica ou por substâncias adicionadas ao resíduo. A EPA (2003) ainda observou que os compostos mal cheirosos associados aos bio sólidos, estrumes, e outros materiais orgânicos são decorrentes das emissões voláteis geradas da decomposição química e microbiológica de nutrientes orgânicos. Esses compostos associados ao esgoto doméstico e sua característica sensorial estão apresentados na Tabela 2.8.

Cabe ressaltar ainda, que o uso da secagem térmica em lodos de esgoto, com a alta temperatura do processo de secagem, pode promover a volatilização de ácidos graxos e sulfeto-compostos (EPA, 2000).

A grande variedade na composição do lodo dificulta a generalização de seu uso como bio sólidos. Essa variação decorre, principalmente, dos diferentes processos e graus de tratamento do esgoto. Em cada ETE podem ser produzidos vários tipos de lodo (primário, secundário e terciário), que são submetidos a diferentes mecanismos de adensamento, estabilização, condicionamento e desaguamento.

Segundo Matthews (1998), o futuro da disposição de lodo deverá ser, predominantemente, a incineração ou o uso como bio sólido. O bio sólido é o lodo de esgoto devidamente tratado para não apresentar riscos à saúde humana, animal e ao meio ambiente, com potencial de uso benéfico na agricultura. Uma das etapas para a obtenção do bio sólido é a secagem, uma vez que esta promove alta redução de volume e a inativação microbiológica.

Tabela 2.8: Odores associados ao esgoto doméstico (adaptado de METCALF & EDDY, 1991).

Odores	Fórmula química	Cheiro / Qualidade
Aminas	CH_3NH_2 , $(\text{CH}_3)_3\text{H}$	de peixe
Amônia	NH_3	Amoniacal
Diaminas	$\text{NH}_2(\text{CH}_2)_4\text{NH}_2$, $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_5\text{NH}_2$	Carne decomposta
Gás sulfídrico	H_2S	Ovos podres
Mercaptanas (i.e., metil e etil)	CH_3SH , $\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{SH}$	Repolho decomposto
Mercaptanas (i.e., T = butil e crotil)	$(\text{CH}_3)_3\text{CSH}$, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{SH}$	de gambá
Sulfetos orgânicos	$(\text{CH}_3)_2\text{S}$, $(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{S}$	Repolho podre
Escatol	$\text{C}_9\text{H}_9\text{N}$	Material fecal

Os processos usualmente empregados na separação sólido-fluido do lodo, embora apresentem uma alta eficiência de captura de sólidos, ainda gera 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

Do ponto de vista ambiental, a secagem pode ser considerada uma tecnologia em ascensão. Da mesma forma que outras operações da engenharia química como a adsorção, absorção, sedimentação, etc., largamente utilizadas em outros setores industriais como o de alimentos, siderurgia, entre outros, obtiveram êxito na área ambiental, a secagem vem sendo aplicada nesta área, com resultados significativos, conforme Carvalho (2003).

A secagem é um dos processos mais antigos e utilizados pela humanidade. Traub (2004) enfatizou que a secagem tem sido usada para preservação e mudanças de estado e propriedades desde os tempos bíblicos e que durante as últimas décadas, intensos esforços foram investidos para o estudo do mecanismo e melhoria do processo, utilizado

por muitas indústrias, desde a aplicação na minimização de produtos químicos até nos processos de fabricação como os de: alimentos, farmacêuticos e substâncias químicas finas, e, mais recentemente como alternativa na minimização de produtos gerados no setor de tratamento de resíduos, e tem representado para as empresas cerca de 2 – 60% do capital e do custo de operação.

De acordo com Mujumdar (1997), a secagem é a operação unitária que converte um material alimentado na forma líquida, semi-sólida ou sólida em um produto sólido com teor de umidade significativamente baixo. O fornecimento de energia, mudança de fase e um produto sólido com baixo teor de umidade, distinguem esta operação de outros processos de separação de líquidos, puramente mecânicos como a centrifugação, filtração e prensagem ou físico-químicos como evaporação, desumidificação, extração, absorção e osmose.

McCabe *et al.* (2001); Foust *et al.* (1982), definiram de forma geral a secagem como uma operação destinada a eliminar a água, ou qualquer outro líquido, contido em um sólido, por meio de adição de calor. Cavalcante (2003) reforçou a idéia de que este conceito é amplo, englobando outras operações unitárias de separação de líquidos, que não se enquadram no estudo da secagem.

Cook & Dumont (1991) indicaram que a secagem é utilizada para preservação e redução do peso e volume, o que torna o transporte e a embalagem economicamente mais vantajosos, além de permitir um maior prazo de armazenamento de produtos, concentrando substâncias para mudar ou melhorar o sabor e agregar valor ao produto. Para o caso da utilização da secagem em tratamentos de resíduos sua aplicação promove uma grande redução do volume, bem como de seu peso, permitindo melhor e maior capacidade de armazenamento e disposição final, além da eliminação dos microrganismos patogênicos e redução de custos.

Segundo Strumillo & Kudra (1986), o material que é submetido à um processo de secagem, consiste geralmente da matéria seca (esqueleto) e uma certa quantidade de umidade, principalmente no estado líquido. O “material úmido” 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, embora

todos esses parâmetros possam influenciar significativamente o processo de secagem e, assim, definir a técnica de secagem, as propriedades mais importantes são as propriedades mecânicas – estruturais, o tipo de umidade no sólido e a ligação umidade – material. Dessa forma os autores definiram os tipos de umidade que podem ser encontradas em um sólido:

- Umidade superficial: quando o líquido existe como um filme externo sobre o material devido a efeitos de tensão superficial;
- Umidade não ligada: quando todo o conteúdo de umidade presente em um material não higroscópico está na forma não ligada. Em um material higroscópico o excesso do conteúdo de umidade de equilíbrio corresponde a umidade de saturação. Esta umidade pode estar presente em duas formas: no estado funicular, onde o líquido em estado contínuo existe 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 2.4 apresenta esquematicamente as duas formas da umidade não ligada.

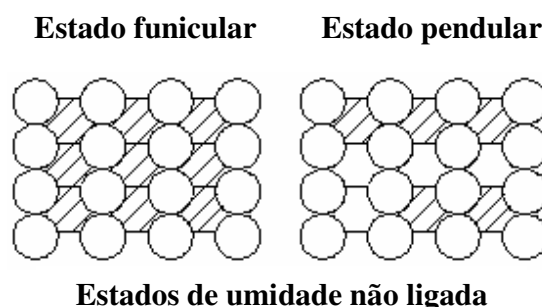


Figura 2.4: Estados de umidade não ligada (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

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 a 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: ocorre quando o líquido 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.

Outros autores definem ainda outros tipos de umidade, no caso, a umidade livre. Para McCabe *et al.* (2001), a umidade livre é a diferença entre o conteúdo de umidade total do sólido e a da umidade de equilíbrio. Para Mujumdar & Menom (1995), esta é a umidade que pode ser removida, em uma determinada condição de processo, e pode conter umidade ligada e não ligada.

2.4.1. Características gerais da secagem

Strumillo & Kudra (1986) definiram a cinética de secagem como as mudanças do conteúdo de umidade média e da temperatura média do material com o tempo; diferentemente, a dinâmica de secagem descreve mudanças na temperatura e perfis de umidade ao longo do material devidas à secagem. Porém, a mudança do conteúdo de umidade do material e da temperatura são geralmente controlados pela transferência de calor e de massa entre a superfície do corpo, o ambiente e a parte interna do material de secagem, além da intensidade da secagem, que reflete a mudança do conteúdo de umidade com o tempo, sendo a mesma influenciada pelos parâmetros de processos de secagem (temperatura, conteúdo de umidade, pressão parcial, velocidade, umidade relativa do ar, ou pressão total).

De acordo com Strumillo & Kudra (1986), o processo de secagem pode ser ilustrado com diagramas construídos a partir das seguintes coordenadas: o conteúdo de umidade médio do material – tempo de secagem (cinética de secagem), a taxa de secagem – conteúdo de umidade do material (taxa de secagem) e a temperatura média do material – conteúdo de umidade médio do material (curva de temperatura).

A Figura 2.5 apresenta a curva de secagem e a Figura 2.6 a curva da taxa de secagem, que correspondem as curvas típicas da secagem.

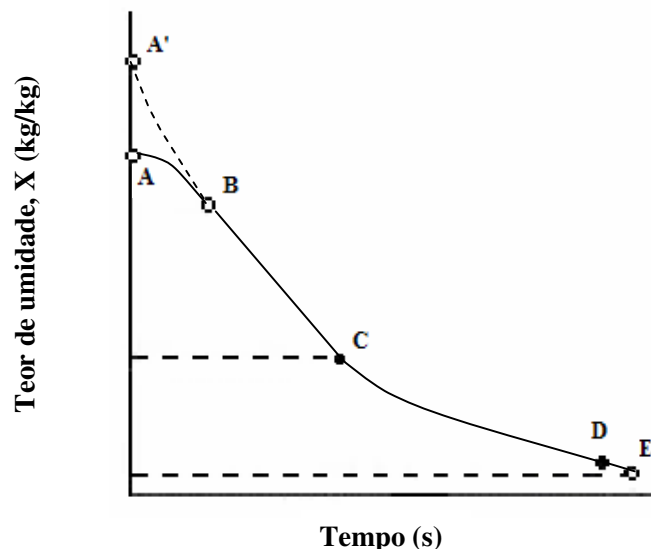


Figura 2.5: Curva de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

A Figura 2.5 mostra uma curva típica de secagem convectiva, dividida pelos segmentos característicos, que serão pormenorizados a seguir.

1 – segmento A-B: Este é o chamado período inicial, em que ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água). Este ponto ocorre após um curto tempo, e a relação $X=f(t)$ a partir daí é linear, onde a taxa de secagem é igual à inclinação da reta e esta taxa permanece constante, alterando o comportamento inicial. Neste período, o material a ser seco e sua superfície estão cobertos por uma camada líquida e tem a temperatura muito menor que a temperatura de equilíbrio, e com isso, a taxa de secagem entre os pontos A e B aumentará até a temperatura da superfície do material atingir o valor correspondente ao segmento B-C;

2 – segmento B-C: Este é conhecido como o primeiro período de secagem, caracterizado pela taxa constante de secagem e pelo fato desta ser independente da umidade

total do material em cada instante. A superfície exposta do material está saturada, existindo um filme contínuo de água sobre o sólido, 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 C, chamado de ponto crítico, que é o instante em que o movimento do líquido do interior do sólido para a superfície é insuficiente para manter o filme contínuo sobre a superfície do sólido; e ainda, pode-se dizer que este ponto é função da estrutura, da espessura em que o material é secado e da taxa de secagem.

Ressalta-se o fato de que em sólidos fibrosos ou de estrutura amorfa, o movimento do líquido através do sólido é devido à difusão, e como a velocidade de difusão é muito menor que a velocidade decorrente do mecanismo de capilaridade ou de gravidade, os sólidos em que o movimento do líquido é difusivo, tem um período de taxa constante menor, ou ainda pode se secar o material sem passar por esse período;

3 – segmento C-D: Este é o terceiro período de secagem, caracterizado pela taxa de secagem decrescente, iniciando a partir da umidade crítica. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; o fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Observa-se ainda que a partir do ponto crítico (C), o comportamento da curva se aproxima assintoticamente do teor de umidade de equilíbrio do material X_{eq} , representado pelo ponto E;

4 – segmento D-E: Este é a fase final de secagem, onde toda a evaporação ocorre no interior do material, e todo vapor que é retirado do sólido deve difundir-se através do sólido até a superfície, e, em seguida, através da corrente gasosa, decrescendo ainda mais a

taxa. Ao atingir a umidade de equilíbrio (E), não se tem mais secagem e a taxa de secagem é nula. Essa umidade é alcançada quando a pressão parcial do vapor na superfície do sólido for igual a pressão do vapor na fase gasosa.

Estes comportamentos da taxa de secagem em relação ao teor de umidade podem ser observados mais detalhadamente pela Figura 2.6.

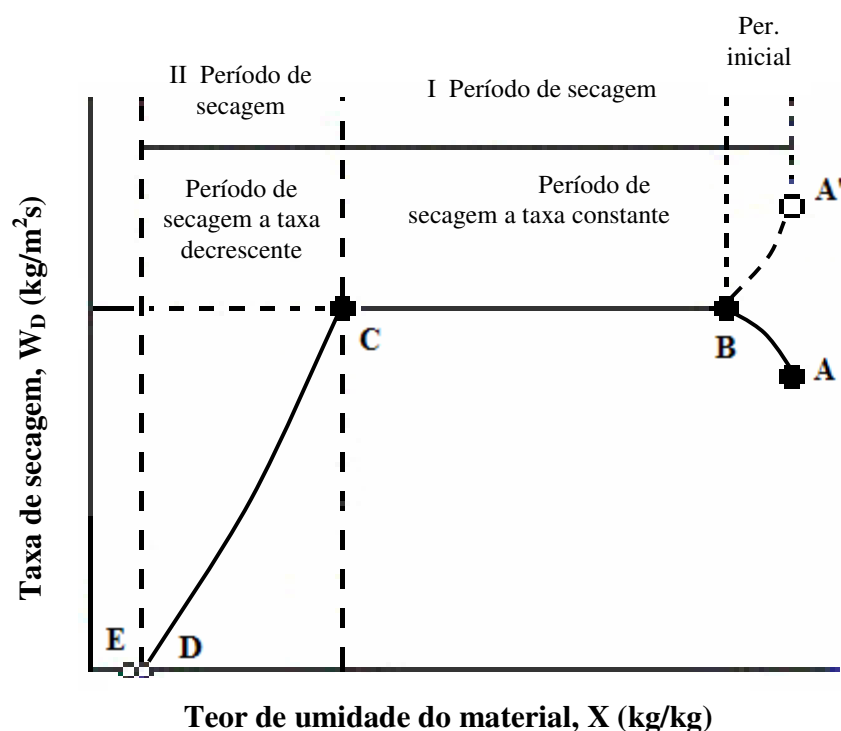


Figura 2.6: Curva da taxa de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

De forma análoga à Figura 2.5, a Figura 2.6 pode ser separada nos dois períodos característicos da secagem, sendo intimamente ligadas à explicação desta curva, fenômenos de transferência de calor e massa. No período inicial da secagem (segmento AB), o sólido e sua superfície estão cobertos por uma camada líquida que tem temperatura menor que a temperatura de equilíbrio, portanto, como resultado, a taxa de secagem no intervalo entre os pontos A e B aumentará até a temperatura da superfície atingir o valor correspondente à

linha BC. O período inicial da secagem é representado pelo segmento A'B, quando o secador é alimentado com material úmido que apresenta $T > T_g$. Cabe ressaltar que este período é curto e na prática pode ser desprezado.

No período de secagem à taxa constante (segmento BC), a superfície do material é mantida em um dado nível de umidade de modo que a secagem ocorre como se o sistema fosse água pura evaporando (PINTO, 1992).

Segundo Geankoplis (1983), o movimento da umidade dentro do sólido é suficientemente rápido para manter a condição de saturação na superfície, e 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.

Strumillo & Kudra (1986) observaram que neste período, 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 gás.

No período de secagem à taxa decrescente (segmento CD), quando $X < X_{cr}$ a quantidade de umidade que chega à superfície do material decresce gradualmente, tendo como resultado o decréscimo da pressão de vapor na superfície do material, assim, ocorrendo o decréscimo da taxa de secagem. Para este período, a taxa de secagem é controlada pelo transporte de umidade (condições internas) que depende do gradiente de concentração de umidade no interior do material; com isso, o comportamento das curvas do período de secagem à taxa decrescente depende da constituição do material, enquanto que a forma das curvas de secagem no primeiro e segundo períodos de taxa de secagem, bem como as relações entre os dois períodos, dependem das condições de transferência de massa e camada limite (CAVALCANTE, 2003).

2.4.2. Tipos de secagem

Segundo Biagi *et al.* (1992), pode-se enquadrar dois processos para a secagem de produtos naturais, a secagem natural ou ao sol, e a secagem artificial.

A secagem natural ou ao sol consiste na exposição do produto ao sol ou à sombra em um ambiente relativamente seco, a fim de que parte da água seja removida por evaporação. Os produtos a serem secos podem ser colocados sobre bandejas perfuradas ou peneiras, e devem ser movimentados constantemente para a uniformização de sua taxa de perda de umidade. Biagi *et al.* (1992) observaram que a grande vantagem deste processo é o baixo custo de instalação associado ao emprego de fonte natural de aquecimento. Por outro lado, o processo é lento e depende das condições climáticas locais e exige mão-de-obra exclusiva para as operações de revolvimento do produto.

Cabe ressaltar que este processo é bastante empregado para a secagem de lodos de esgotos, devido a vantagem da utilização da energia solar como fonte de calor para evaporação, permitindo um baixo custo operacional. Luboschik (1998) apresentou em seu trabalho, o secador solar de lodo da cidade de Kandern-Hammerstein na Alemanha, detalhando as etapas do processo, da parte operacional até o custo de instalação da planta. No Brasil, estão disponíveis trabalhos de secagem natural de lodos de esgotos; dentre esses, podemos citar o trabalho de França *et al.* (2003), que juntamente com a SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná, realizaram a secagem de lodos em leitos de secagem em bancada.

A secagem artificial consiste em submeter o produto úmido, em um secador, à ação de uma corrente de ar aquecido. O aquecimento da corrente de ar é feito por uma fonte de energia térmica, resultante da queima de combustíveis sólidos ou através de resistências elétricas.

Cavalcante (2003) enfatizou que este tipo de secagem permite reduzir o teor de umidade dos produtos recém colhidos, para evitar alterações metabólicas e minimizar a ação de fungos e insetos; e apesar de seu custo relativo mais elevado, a secagem artificial é amplamente adotada por razões de produtividade agrícola ou de disponibilidade de mão-de-

obra, além da necessidade para atender as condições qualitativa e quantitativa de processo e produção.

2.4.3. Tipos de secadores

Existem diversos tipos de secadores, com diferentes níveis de complexidade, onde cada secador é especificamente projetado, sendo suficientemente versáteis para secagem de diversos materiais úmidos. Os sistemas de secagem podem ser classificados de acordo com o modo operacional ou com o tipo de aplicação requerida.

Nonhebel & Moss (1979) apresentaram uma classificação para secadores de acordo com o método de operação, sendo contínuos ou descontínuos, e subdividindo-se segundo a forma de transferência de calor em secadores por condução (incluindo a liofilização), convecção, radiação (incluindo secador infravermelho) e dielétrico (Figura 2.7). Enquanto, os equipamentos podem ser classificados de acordo com o tipo de recipiente de secagem (como por exemplo: bandejas, tambor rotativo, leito fluidizado, de jorro, pneumático e secador atomizador - *spray drying*).

David (2002) observou que existem no mercado vários tipos de equipamentos disponíveis para a secagem térmica, e muitos deles são propostos para a operação de secagem de lodos de esgotos, sendo classificados como secadores diretos, indiretos, radiantes ou mistos. A classificação apresentada ressalta que esta classificação é feita em função do processo de transferência de calor, com ênfase no uso dos mesmos para a secagem de lodos de esgotos. Em particular, os secadores diretos que utilizam a configuração de leito fixo.

2.4.3.1. Secadores diretos

Nos secadores diretos, o material entra em contato com o meio de secagem, ar quente, gases de combustão ou vapor superaquecido, que servem como fonte de calor para conduzir o processo de secagem, sendo a troca de calor realizada por convecção.

A grande vantagem deste sistema é que, devido ao contato direto entre as partículas de lodo e o meio de secagem, a taxa de troca de calor é mais alta e o lodo pode ser seco adequadamente atingindo teores de umidade inferiores a 20%. David (2002) destacou que para se atingir melhores taxas de transferência de calor, é necessário evitar que as partículas se agreguem umas às outras, sendo isto possível com o reciclo de uma parte do lodo seco no sistema de secagem.

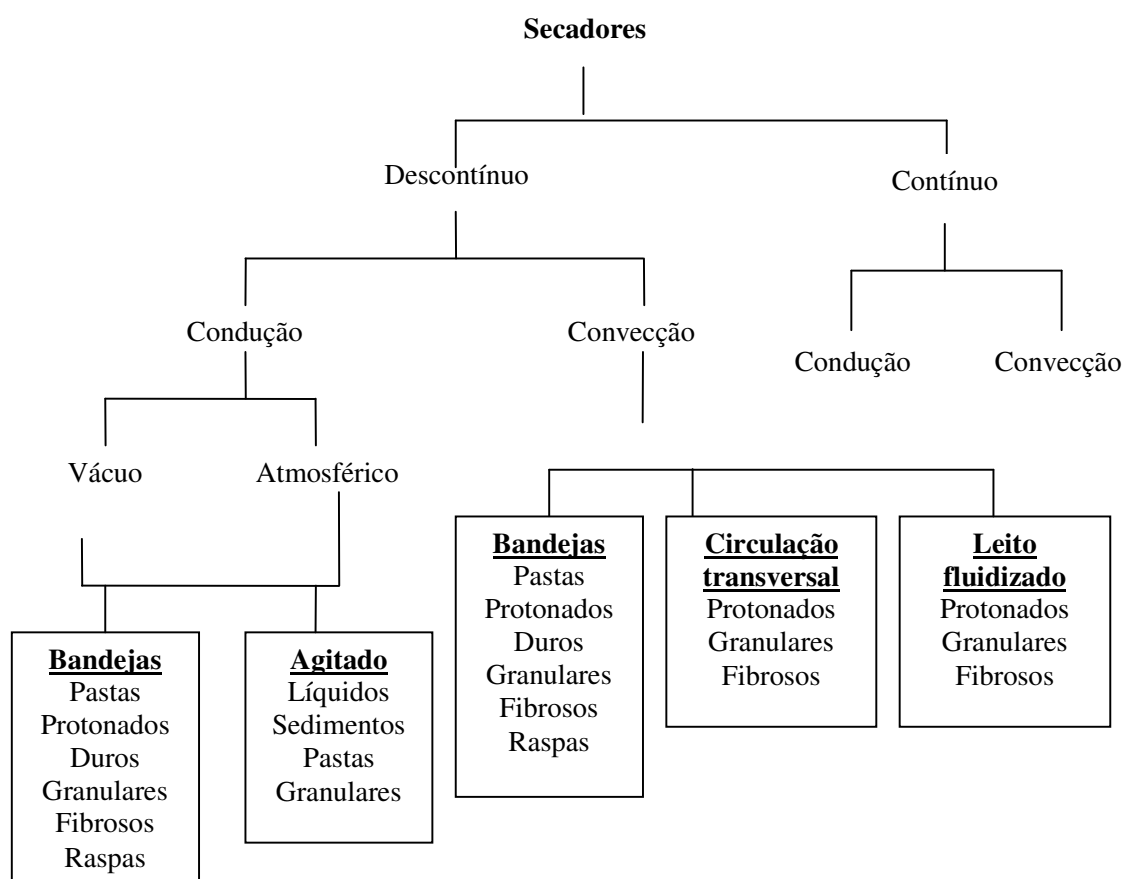


Figura 2.7: Classificação dos secadores de acordo com o método operacional (NONHEBEL & MOSS, 1979).

A maior desvantagem deste tipo de secador, quando se usa ar ou gases de combustão como meio de secagem, é a geração de grande quantidade de emissões gasosas com odores. Outra desvantagem deste sistema é o potencial de incêndio, que pode ocorrer pela auto-ignição do lodo seco em contato com os gases quentes, devido à presença de finos e poeiras gerados quando os lodos são transportados ou estocados (FROST *et al.*, 1990).

2.4.3.2. Secadores em leito fixo

Segundo Cavalcante (2003), o leito fixo é um dos sistemas de contato sólido-fluido de concepção mais simples na área de meios porosos e um dos mais utilizados na indústria química, sendo este secador essencialmente confeccionado com uma ou mais câmaras nas quais são colocadas as bandejas que contém o material a ser seco. Esta secagem é feita pelos gases quentes que passam sobre ou através das bandejas, que podem ser ou não perfuradas; ou pela convecção natural (processo de remoção de água mais aplicado a biomateriais).

A concepção descrita por Cavalcante (2003) também pode ser encontrada no trabalho de Faria (1998), e o mesmo acrescenta que o leito fixo é um dos sistemas mais utilizados na indústria química, seja como reator de leito catalítico, como adsorvedor, trocador de calor e secador (principalmente de produtos agrícolas).

Os secadores de leito fixo são caracterizados por apresentarem baixo custo e ser de fácil operação, e apresentarem diversas vantagens como configuração bastante simples, resultando em baixo custo de implantação, alta eficiência com alta versatilidade, sendo utilizados para a secagem de uma grande variedade de materiais. Como principais desvantagens deste sistema destacam-se a existência de gradiente de temperatura ao longo do leito, um menor contato entre sólido-fluido, o que promove uma menor transferência de calor e massa e conseqüentemente um maior tempo de secagem quando comparado a outros sistemas de secagem (*spray-dryer*, leito fluidizado, entre outros).

2.4.4. Modelagem Matemática da secagem

Os processos de secagem envolvem os fenômenos de transferência de calor e massa simultaneamente, o que torna difícil a sua descrição matemática. O desenvolvimento de modelos matemáticos, que descrevam estes mecanismos de transferência, baseiam-se em três categorias principais: teórica, semi-empírica e empírica. Afzal & Abe (2000) enfatizaram que 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 com isso otimizar o processo.

Vieira (2006) destaca que o processo de secagem envolve fenômenos complexos de transferência de calor e de massa que dificultam a descrição matemática em escala microscópica, e por isso, 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.

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. O autor ainda ressalta que o período à taxa decrescente é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios, sendo que a complexidade dos fenômenos, durante a secagem, conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas equações empíricas para prever a taxa de secagem.

Como a maioria dos sólidos orgânicos é amorfa ou fibrosa ou gelatinosa, estes materiais retém a umidade como parte integral da estrutura do sólido, ou então a retém 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. Visto que a água presente faz parte da estrutura do sólido, os mesmos são afetados pela remoção da umidade. As camadas superficiais tendem a secar mais rapidamente que no interior, e quando a taxa de secagem é muito elevada, é possível que se estabeleçam diferenças significativas no teor de umidade em função das diferenças entre a pressão parcial promovida pelo ar de secagem e a pressão parcial da umidade no interior do sólido, 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).

Devido a estas características, o processo de secagem é fundamentado na transferência simultânea de calor e massa, o que requer uma descrição matemática mais complexa e de difícil processamento de dados, devido ao grande volume de equações diferenciais que a descrevem.

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, conforme a Equação 2.3, que postula que o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração dentro do sólido.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -D_{ef} \cdot \nabla^2 X \quad (2.3)$$

Onde: X , umidade do material em base seca [M/M]; t , tempo [t]; D_{ef} , difusividade efetiva.

Em geral, o transporte de umidade a partir do interior de sólidos, onde predomina o mecanismo de difusão interna da água, pode ser descrito por modelos teóricos de difusão, que são soluções truncadas da segunda lei de Fick da difusão, expressa pela Equação 2.4 (CRANK, 1975). Estas soluções se aplicam para materiais que não sofrem nenhuma ou pouca redução de tamanho durante a secagem, e não representa adequadamente materiais

porosos com alto conteúdo de umidade e longo período de taxa de secagem constante. O autor ainda calculou um grande número de soluções da equação da difusão para condições iniciais e de contorno variadas. Entretanto, estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-infinitos; placas, cilindros e esferas) e quando a difusividade é constante ou varia linearmente ou exponencialmente com a concentração de água.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{q}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (2.4)$$

Onde: X , conteúdo de umidade (B.S.) [M/M]; r , distância de um ponto ao centro do material [S]; t , tempo de secagem [t]; D_{ef} , difusividade efetiva; $q = 0$ (placa plana); $q = 1$ (cilindro) e $q = 1$ (esfera).

Considerando o material como sendo uma placa plana, com difusividade constante ou em função da concentração, e com geometria simples e constante ao longo do processo, a Lei de Fick pode ser representado pela Equação 2.5.

$$X_R = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{ef} t}{4l^2} \right] \quad (2.5)$$

Equação na qual, X_R é a razão do conteúdo de umidade (adm), n é o número de termos da equação; D_{ef} é a difusividade efetiva, l é a espessura da placa (cm), e t é o tempo [t].

Vários modelos matemáticos são descritos também com base na teoria de difusão, e assumem que a transferência de calor e massa é restrita à camada delgada na superfície das partículas.

Lewis (1921) sugeriu um modelo semi-empírico, análogo à Lei de Newton do resfriamento em sua forma integral. Este modelo também conhecido como “Lei exponencial”, conforme a Equação 2.6.

$$X_R = e^{(-kt)} \quad (2.6)$$

Page (1949) propôs uma pequena modificação no modelo proposto por Lewis (1921), que envolveu a adição de um termo exponencial na variável tempo, gerando um novo modelo exponencial e mais preciso para descrever a cinética de secagem, sendo conhecido como Equação de Page para camada fina, apresentado pela Equação 2.7.

$$X_R = e^{(-kt^n)} \quad (2.7)$$

Henderson & Pabis (1961), com a secagem de sementes de trigo, propuseram um modelo matemático que foi desenvolvido considerando os efeitos de velocidade, temperatura, razão de mistura do ar, tamanho médio das sementes, e da taxa de redução de volume no decorrer da secagem. Este modelo, também conhecido como modelo exponencial simples é descrito pela Equação 2.8.

$$X_R = ae^{(-kt)} \quad (2.8)$$

Thompson *et al.* (1968), com dados obtidos da secagem de milho, desenvolveram o modelo apresentado pela Equação 2.9. Os autores verificaram que a temperatura do ar de secagem foi a principal variável que afetou a taxa de secagem, e que outros parâmetros como a variedade do milho e taxa de fluxo de ar não afetaram significativamente as constantes de secagem.

$$t = a.\ln(X_R) + b.\ln(X_R)^2 \quad (2.9)$$

Overhults *et al.* (1973), com dados obtidos com a secagem de soja, desenvolveram uma versão do modelo proposto por Page (1949), obtendo um melhor ajuste comparado ao

modelo original. Os autores ainda verificaram que a mudança no expoente “n” para uma faixa de conteúdo de umidade inicial foi muito pequena se comparado à mudança em dada faixa de temperatura. Este modelo é representado pela Equação 2.10.

$$X_R = e^{(-kt)^n} \quad (2.10)$$

Henderson (1974), dando continuidade ao desenvolvimento de equações de secagem, propôs um novo modelo, com um termo a mais do que a Equação 2.8, utilizando dados obtidos com a secagem de milho. Este modelo está representado pela Equação 2.11.

$$X_R = ae^{(-k_1t)} + be^{(-k_2t)} \quad (2.11)$$

Queiroz (1994) verificou que de forma geral, os modelos de difusão líquida tem apresentado bons resultados em aplicações de secagem de grãos, frutas e cereais, e provavelmente, devido ao fato destes produtos não apresentarem um período de taxa constante nas curvas características de secagem, permite concluir que o processo é controlado pelas condições internas do material.

No caso de equações empíricas, destaca-se o modelo de Wang & Singh (1978), o modelo Logarítmico, e o modelo Polinomial, sendo descritos pelas Equações 2.12, 2.13 e 2.14, respectivamente.

$$X_R = 1 + at + bt^2 \quad (2.12)$$

$$X_R = ae^{(-kt)} + bt \quad (2.13)$$

$$X_R = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (2.14)$$

Vários autores observam que a abordagem teórica leva em conta apenas a resistência interna à transferência de umidade, enquanto as abordagens semi-empíricas e empíricas consideram a resistência externa à transferência de umidade entre o produto e o ar (BRUCE, 1985; HENDERSON, 1974).

Midilli *et al.* (2002) observaram que geralmente é suficiente o uso de expressões semi-empíricas simples para descrever adequadamente a cinética de secagem quando a resistência externa para a transferência de calor e massa é eliminada ou minimizada. Os autores propuseram um modelo semi-empírico para descrever a secagem em camada delgada, sendo este modelo comparado com diversos modelos comumente usados, como: Lewis (1921), Page (1949), Henderson & Pabis (1961), logarítmico, entre outros. Os modelos foram ajustados à dados cinéticos de secagem de cogumelo, pólen e pistache, e o modelo proposto pelos autores obteve um resultado superior aos demais modelos estudados. O modelo proposto pelos autores é apresentado pela Equação 2.15.

$$X_R = ae^{(-kt^n)} + bt \quad (2.15)$$

Celma *et al.* (2007) obtiveram vários ajustes de modelos aos dados cinéticos da secagem em camada delgada de lodo da extração de óleo de oliva utilizando um sistema híbrido de geração de calor (energia solar e resistências elétricas). As temperaturas de estudo foram 20, 40 e 80°C, ou seja, temperaturas relativamente baixas, porém, na faixa de trabalho de secadores híbridos, e também para que não houvesse o encolhimento e o endurecimento do lodo, e o conteúdo de umidade inicial da torta foi de aproximadamente 67% (b.u.). Os autores verificaram que praticamente toda a secagem ocorreu em um único período à taxa decrescente. Neste caso, dentre os modelos testados Midilli *et al.* (2002) obteve o melhor ajuste. Como o mecanismo de secagem é predominantemente difusivo, com a temperatura baixa, esta difusão é lenta, o que não provocou a quebra da torta, e consequentemente ocorreu apenas uma taxa decrescente de secagem.

A partir do modelo que melhor descreve a cinética, pode-se então efetuar a derivada da curva de secagem para se obter a taxa de secagem dos sólidos em função do tempo e/ou em função do conteúdo de umidade. As equações do processo de secagem em

camada delgada, por sua vez, são imprescindíveis na modelagem matemática, sendo os ajustes aos dados experimentais uma parte integrante do conjunto de equações necessárias à simulação do processo (KALEEMULLAH & KAILAPPAN, 2005b; KALEEMULLAH & KAILAPPAN, 2005a).

A tabela 2.9 mostra de forma resumida doze modelos e os respectivos períodos, que são utilizados para ajuste aos dados experimentais, sendo um modelo linear para a fase à taxa constante (1), e onze modelos não-lineares, sendo oito semi-empíricos (2 a 9) e três empíricos (10 a 12) para as duas fases decrescentes.

Tabela 2.9: Modelos de cinética de secagem.

Nº	Autor: Modelo
1	Linear: $X_R = a.t + b$
2	Lewis (1921): $X_R = e^{(-kt)}$
3	Henderson & Pabis (1961): $X_R = ae^{(-kt)}$
4	Page (1949): $X_R = e^{(-kt^n)}$
5	Overhults (1973): $X_R = e^{(-kt)^n}$
6	Page modificado 2: $X_R = ae^{(-kt)^n}$
7	Henderson (1974): $X_R = ae^{(-k_1t)} + be^{(-k_2t)}$
8	Midilli et al. (2002): $X_R = ae^{(-kt^n)} + bt$
9	Thompson (1968): $t = a.\ln(X_R) + b.\ln(X_R)^2$
10	Wang & Singh (1978): $X_R = l + at + bt^2$
11	Logarítmico: $X_R = ae^{(-kt)} + bt$
12	Polinomial: $X_R = a + bt + ct^2 + dt^3$

2.5. Tratamento térmico de lodos de esgoto

O tratamento térmico do lodo de esgoto pode ser utilizado para duas finalidades: a redução de volume devido a secagem do material e a eliminação de microrganismos patogênicos através de temperatura mais elevada decorrente do processo de secagem.

Andreoli *et al.* (2000b) afirmaram que a secagem e a desinfecção são imprescindíveis para a disposição final do lodo, visando a redução de custo com transporte e minimização do potencial poluidor.

2.5.1. Secagem do lodo

A secagem de lodos tem merecido bastante atenção como processo que permite obter materiais mais fáceis de serem dispostos e possíveis de serem reutilizados, pois minimiza a quantidade de lodo remanescente (pela redução de volume e peso), melhora a sua qualidade higiênica, serve como um estágio preliminar importante para a incineração e pirólise, gera um produto adequado para a armazenagem, disposição em aterros sanitários, utilização como fertilizante e no condicionamento de solos (HASSEBRAUCK & ERMEL, 1996).

Para Outwater (1994), a secagem do lodo provoca um enorme impacto nos custos de disposição do lodo, pois ele é geralmente desidratado de uma concentração de 2% de sólidos para 20% de sólidos e o seu volume é reduzido em 90%. A concentração e redução de volume são provocadas pela desidratação mecânica, ou seja, através da utilização de equipamentos para o desaguamento do lodo, como por exemplo a centrífuga e o filtro prensa.

Assim, mesmo com o uso de equipamentos para desaguamento mecânico, o lodo ainda continua com um conteúdo de umidade elevado. Gonçalves & Ludovice (2000) obtiveram dados de teor de sólidos após o processo de centrifugação para o desaguamento de lodos e verificaram que mesmo após o desaguamento mecânico do lodo feito pela centrífuga e uma alta captura de sólidos promovida pelo equipamento, os lodos ainda possuem um alto conteúdo de umidade. Ou seja, se considerar que o teor de sólidos do lodo bruto primário encontra-se em uma faixa de 28 – 30 %, esse mesmo lodo encontra-se com elevado teor de umidade, chegando a 70% . A Tabela 2.10 mostra o desempenho obtido em um desaguamento realizado por centrifugação.

Tabela 2.10: Desempenho típico de centrífugas no desaguamento do lodo (adaptado de GONÇALVES & LUDUVICE, 2000).

Tipo de lodo	Teor de sólidos na torta (%)	Captura de sólidos (%)
Lodo bruto primário	28 – 34	95
Lodo anaeróbio	35 – 40	95
Lodo ativado	14 – 18	95
Lodo misto bruto (primário + ativado excedente)	28 – 32	95
Lodo misto anaeróbio	26 – 30	95
Lodo aeróbio (aeração prolongada ou lodo ativado excedente)	18 - 22	95

Com a secagem térmica pode-se obter valores de teor de sólidos da ordem de 90 a 95%, reduzindo significativamente a massa final dos lodos gerados, conforme David, 2002. Essa observação também é encontrada nos trabalhos de Chun & Lee (2004); e Hassebrauck & Ermel (1996).

Portanto, a secagem térmica torna-se uma alternativa promissora na área de saneamento ambiental, pois embora a captura de sólidos pelos equipamentos mecânicos seja alta, a torta produzida ainda se encontra com alto teor de umidade, com isso o volume gerado torna-se muito grande. Esse processo de secagem elimina a umidade através da transferência de calor, diminuindo bruscamente o volume do lodo gerado, e ainda, com a condição de temperatura elevada se pode concomitantemente promover a desinfecção do lodo devido à eliminação de patógenos.

2.5.2. Características da secagem de lodos

Tsang & Vesilind (1990) descreveram o lodo de esgoto como um material complexo com alto teor de umidade, composto por material inorgânico e orgânico. As águas (ou as umidades) presentes no material, segundo os autores, são classificadas em

quatro categorias: água livre, água intersticial, água de superfície e água ligada. Outra característica observada por Tsang & Vesilind (1990), é a dificuldade de se diferenciar água livre e água ligada no lodo de esgoto.

A visualização conceitual no lodo desta classificação pode ser vista na Figura 2.8.

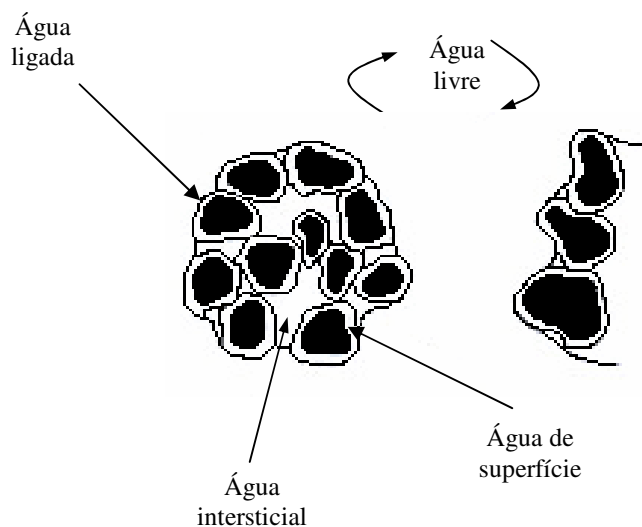


Figura 2.8: Visualização conceitual da distribuição da umidade no lodo (TSANG & VESILIND, 1990).

A umidade livre é a água não ligada aos sólidos e pode ser separada por sedimentação ou espessamento.

A umidade intersticial é a água presa entre as estruturas dos flocos que se formam, ou dentro das células, podendo ser removida por desidratação mecânica.

A umidade superficial é a água associada às partículas sólidas, presas na superfície das partículas devido à estrutura molecular da água e não pode ser removida por processos mecânicos.

A umidade ligada é a água quimicamente ligada à partícula e que só pode ser removida através da quebra (destruição) da mesma.

Chun & Lee (2004) apresentaram o processo da secagem do lodo em três períodos distintos, conforme a Figura 2.9. O trecho A-B corresponde ao período à taxa constante, após este período segue-se o trecho B-C que é o período à taxa decrescente primária e o trecho C-D corresponde ao período à taxa decrescente secundária. Comparado à secagem de sólidos convencionais, o lodo tem um curto período à taxa constante e um longo período às taxas decrescentes, pois, a secagem é praticamente processada a partir do primeiro conteúdo de umidade crítica (ponto B), finalizando o processo de secagem após a taxa decrescente secundária (no ponto D).

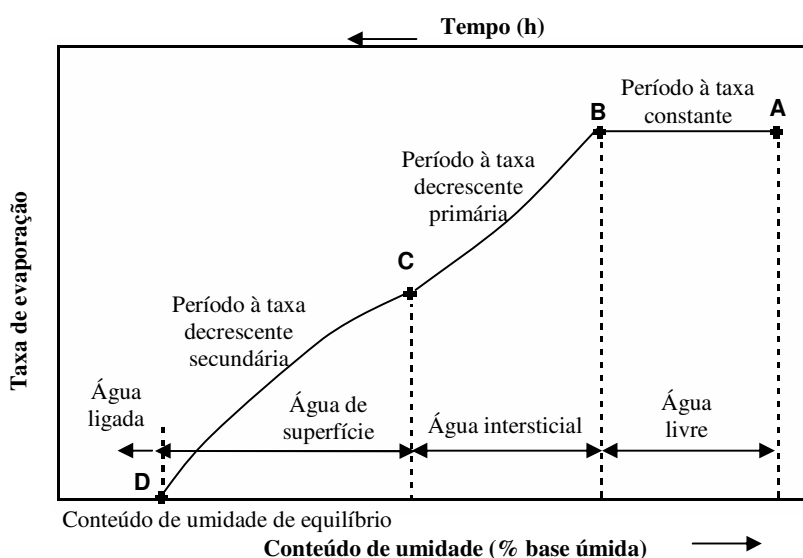


Figura 2.9: Curva da taxa de secagem de lodo de esgoto (CHUN & LEE, 2004).

Estas mesmas características foram observadas por Lowe (1995) que também utilizou o conceito de umidade crítica, apresentando as curvas da taxa de secagem para três diferentes lodos de esgoto: os lodos de digestão primária, secundário e bruto, de acordo com a Figura 2.10. O autor ressaltou que são as mudanças nas características físicas do lodo nos pontos críticos que interessam ao processo, pois várias tecnologias desenvolvidas e utilizadas com êxito a partir da teoria clássica de secagem não podem ser simplesmente adotadas para a secagem de lodo.

Geralmente, para a secagem de lodos de esgoto com alto teor de umidade, são utilizados secadores térmicos indiretos, mas em alguns casos, os secadores diretos podem

ser utilizados. A taxa de secagem, no entanto, diminui nos secadores térmicos diretos devido a uma formação de blocos (aglomerado) no lodo entre a faixa de 50 a 60 % de umidade, este acontecimento é chamado por vários autores de zona “grudenta” ou “pegajosa”, sendo então esta zona iniciada no ponto C, observado na Figura 2.9 (SCHIP & EPPER *et al.* (1994); GRUTER *et al.* (1990); KAWAI & KUBOTA (1982)).

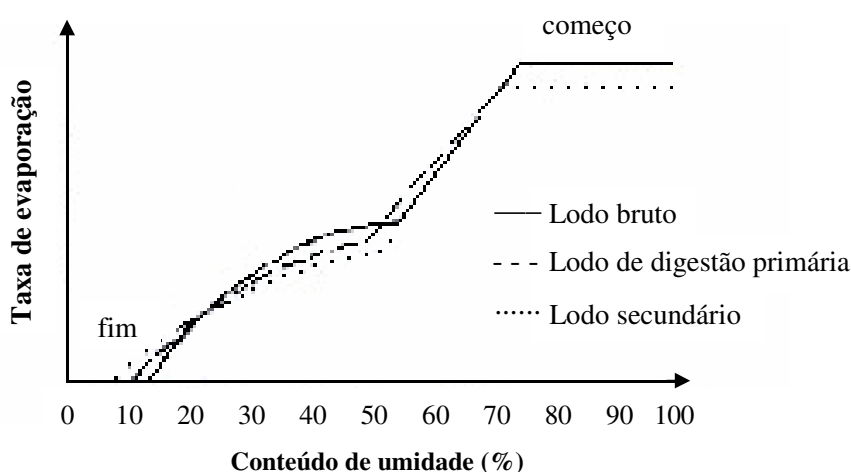


Figura 2.10: Curvas de secagem características de diferentes lodos de esgoto (LOWE, 1995).

Silva (2003) verificou que as curvas de secagem apresentadas por Lowe (1995) são para lodos provenientes das diferentes etapas de processamento do tratamento de esgoto, porém, apresentam as mesmas características, com ligeiras diferenças para o início da taxa decrescente secundária. Verificou também que o conteúdo de umidade entre 50 e 60%, considerada operacionalmente limitante e crítica nas tecnologias existentes de secagem, é uma “fase aderente”, onde a lama fica pastosa e não flui; sendo esta fase ligada à umidade superficial, a qual é associada à estrutura das partículas. Assim, este comportamento acaba dificultando a secagem completa do lodo em uma só etapa ou unidade.

2.5.3. Redução de volume por secagem

Como mencionado anteriormente, a grande quantidade de lodo gerada nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE's) torna o processo de secagem uma poderosa ferramenta no controle ambiental, devido à redução de volume ocasionada pela retirada de umidade do material.

Gruter *et al.* (1990) enfatizaram que a secagem térmica com a proposta de remoção de umidade é um importante elo no gerenciamento de resíduos, e que esta operação empregada para a secagem de lodos não só possibilita a redução de volume, minimizando a quantidade gerada e consequentemente a disposição final, como também melhora as condições higiênicas do resíduo.

Wang & Brennan (1995) observaram que o encolhimento de materiais biológicos durante a secagem ocorre simultaneamente com a difusão da umidade, afetando a taxa de remoção de umidade, sendo um fenômeno de grande importância para o entendimento do processo de secagem.

Para Mulet *et al.* (2000) a redução de volume é uma propriedade que representa um papel importante para a modelagem matemática de processos de secagem, pois o encolhimento causa mudanças nas condições de contorno para a resolução da 2.^a Lei de Fick.

Perez & Calvelo (1984) determinaram a redução de volume através da correlação entre a densidade aparente e a umidade do material através de balanço de massa, sendo esta correlação apresentada pelas Equações 2.1 e 2.2. A Equação 2.1 relaciona a densidade aparente inicial e final com a fração mássica do conteúdo de umidade em base úmida, e a Equação 2.2 relaciona a densidade aparente inicial e final com o conteúdo de umidade em base seca.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\rho_0(1 - W_0)}{\rho(1 - W)} \quad (2.1)$$

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\rho_0(1+X)}{\rho(1+X_0)} \quad (2.2)$$

Na qual, V é o volume da amostra seca, V_0 é o volume da amostra úmida, ρ_0 é a densidade aparente da amostra úmida (g/L), ρ é a densidade aparente da amostra seca (g/L), X_0 é o conteúdo de umidade da amostra úmida em B.S. (g/g), X é o conteúdo de umidade da amostra seca em B.S. (g/g), W_0 é a fração mássica do conteúdo de umidade da amostra úmida em B.U. (%) e W é a fração mássica do conteúdo de umidade da amostra seca em B.U. (%).

Este modelo foi utilizado satisfatoriamente por Rahman & Potluri (1990) na secagem de lula, por Wang & Brennan (1995) na secagem de batatas, e também no trabalho de Carvalho (2003) na secagem de resíduo hospitalar, obtendo excelentes resultados de redução de volume do material.

2.5.4. Desinfecção do lodo

A desinfecção do lodo está intrinsecamente ligada à sua disposição final e a sua utilização como biossólido. Vários órgãos ambientais brasileiros apresentam legislações ambientais próprias para este tipo de procedimento.

Para a EPA (2003), o lodo de esgoto contém nutrientes benéficos às plantas e propriedades condicionantes para o solo, no entanto, pode também conter bactérias patogênicas, vírus, protozoários, parasitas e outros microrganismos que podem causar doença.

Andreoli *et al.* (2000a) observaram que, inicialmente, o sistema para o tratamento de esgotos tinha um único objetivo, a redução da matéria orgânica, reduzindo assim seu potencial poluidor quantitativo; porém, atualmente existe a necessidade de se efetuar também uma desinfecção eficaz no lodo, eliminando os microrganismos patogênicos e determinando sua utilização segura como adubo orgânico na agricultura e descaracterizando o seu papel de agente veiculador de doenças.

A adição de biossólidos no solo implica em alteração nas suas propriedades físicas tais como porosidade e tamanho de poros, e químicas como material orgânico e conteúdo de metais pesados. Especialmente importante, no entanto, é seu efeito sobre as propriedades microbiológicas do solo, incluindo as quantidades de bactérias e fungos presentes, pois o lodo normalmente contém entre 100 e 1000 vezes mais microorganismos, enquanto que a interação solo-lodo tem uma considerável influência sobre a atividade microbiana (ESTRADA *et al.*, 2004).

Sahlström *et al.* (2004) observaram que se o lodo com bactérias patogênicas é espalhado em terra cultivável, existe um risco de se disseminar doenças em pessoas e animais. Vários dos patógenos encontrados no lodo são bactérias zoonóticas, que são importantes ao ecossistema.

Segundo Tsutiya (2000), os organismos patogênicos são inerentes aos esgotos sanitários e consequentemente aos biossólidos causando, com sua presença, um potencial poluidor devido a sua disseminação pelo meio ambiente. Outro fator relevante é a de que combinação de microrganismos pode acarretar uma atração de vetores, como os insetos, ratos e pássaros; que são os disseminadores potenciais de patógenos no ambiente.

Fernandes (2000) afirmou que a maioria dos microrganismos são inofensivos, porém, alguns grupos de patógenos são considerados perigosos pelo risco que representam para a saúde humana e animal, sendo muitos microrganismos eliminados pelo sistema de tratamento de esgoto, ocorrendo então uma diminuição significativa na concentração de patógenos na fase líquida e migração para a fase sólida (lodo).

SANEPAR (2000) identificou os principais patógenos presentes no lodo de esgoto e as doenças causadas por estes organismos. Os resultados encontram-se na Tabela 2.11 que apresenta de forma qualitativa a presença de microrganismos, bem como os malefícios trazidos pelos mesmos. A Tabela 2.12 mostra de forma quantitativa a concentração dos tipos de patógenos encontrados em diversos lodos de esgotos.

Verifica-se pela Tabela 2.12, que embora todos os tipos de lodos apresentem um valor acentuado da concentração de patógenos, o lodo com maior presença desses microrganismos é o lodo primário. Isto se deve ao fato do lodo primário não sofrer nenhum

tipo de processo para redução de patógenos. Desta forma, o lodo primário requer uma atenção especial relativa à desinfecção para a sua melhor disposição final.

Tabela 2.11: Principais agentes patogênicos presentes no lodo de esgoto (adaptado de SANEPAR, 2000).

Organismo	Distúrbio causado
<i>Escherichia coli</i> (cepas patogênicas)	Gastroenterites com diarreia aguda
<i>Clostridium</i> ssp	Gangrena, tétano, botulismo
<i>Salmonella</i> ssp	Gastroenterites agudas
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Shigela</i> ssp	Desintéria com febre e vômitos
<i>Mycobacterium</i> ssp	Tuberculose, granulomas de pele
<i>Leptospira</i> ssp	Leptospirose
<i>Entamoeba histolytica</i> (cistos)	Amebíase
<i>Balantidium coli</i>	Balantidíase
<i>Giardia</i> ssp	Giardíase
<i>Cryptosporidium</i> ssp	criptosporidiose
<i>Cyclospora cayetanensis</i>	Diarréia
<i>Toxoplasma gondii</i>	Linfadenopatia, febre, infecções congênitas
Enterovírus	Meningite, encefalite, febre
Poliovírus (Sabin)	Paralisia, febre
Hepatite A	Hepatite infecciosa
Rotavírus	Vômitos e diarreia
<i>Necatur americanus</i>	Necatoríase
<i>Ancylostoma</i> ssp	Ancilostomíase
<i>Ascaris</i> ssp	Ascaridíase
<i>Taenia</i> ssp	Teníase
<i>Toxocara canis</i>	Larva migrans
<i>Hymenopelis nana</i>	hymenolepíase

Tabela 2.12: Concentração de agentes patogênicos presentes em diferentes categorias de lodo (adaptado de TSUTIYA *et al.*, 2001).

Agente patogênico	Tipo de lodo	Concentração
Ovos de helmintos	Primário	$10^3 - 10^4/\text{kg}$
	Digerido	$10^2 - 10^3/\text{kg}$
	Semi desidratado	$10^1 - 10^3/\text{kg}$
Cistos de protozoários	Primário	$7,7.10^4 - 3.10^6/\text{kg}$
	Digerido	$3.10^4 - 4,1.10^6/\text{kg}$
	Semi desidratado	$7.10^1 - 10^2/\text{kg}$
Bactérias	Lodo	$10^1 - 8,8.10^6/\text{kg}$
Vírus	Primário	$3,8.10^3 - 1,2.10^5/\text{kg}$
	Digerido	$10^1 - 10^3/\text{kg}$
	biológico	$10^1 - 8,8.10^6/\text{kg}$

Para Andreoli *et al.* (1998a), entre os patógenos, são particularmente importantes os estreptococos, *Salmonella sp.*, *Shigella sp.*, helmintos (larvas e ovos), protozoários (cistos) e vírus (enterovírus e rotavírus), sendo a sanidade do lodo intrinsecamente relacionada com o perfil da saúde da população. Além disso, sua influência nas condições sanitárias varia conforme o organismo e as condições ambientais, pois, enquanto alguns agentes patogênicos não suportam o ambiente edáfico por mais de algumas horas, outros como, por exemplo, os ovos de helmintos, podem permanecer viáveis por vários anos. A Tabela 2.13 apresenta o tempo de sobrevivência de alguns patógenos no solo e sobre a superfície de plantas, de acordo com EPA (1992).

Portanto, os helmintos são os patógenos que mais suportam mudanças ambientais no lodo, e devido a sua resistência, são os microrganismos que trazem uma maior preocupação quanto ao estudo da desinfecção de lodos de esgotos. Os ovos de helmintos encontrados com maior frequência no lodo de esgoto são: *Ascaris lumbricoides*, *Ascaris suum*, *Toxocara sp.*, *Trichuris trichiura*, *Taenia solium*, *Taenia saginata*, *Necator americanus* e *Hymenolepis nana* (EPA, 2003).

Tabela 2.13: Tempo de sobrevivência de alguns patógenos no solo e sobre a superfície de plantas (adaptado de EPA, 2003).

Patógeno	Solo (máx. absoluto)	Plantas (máx. absoluto)
Bactéria	1 ano	6 meses
Vírus	1 ano	2 meses
Cistos de protozoários	10 dias	5 dias
Ovos de helmintos	7 anos	5 meses

Carrington (2004) observou que a redução de patógenos no lodo depende do método de tratamento usado para sua estabilização nas estações de tratamento de esgoto.

De acordo com David (2002), a secagem térmica realizada conforme os padrões estabelecidos pelas normas CETESB P-4.230 e EPA 503, como processo de redução adicional de patógenos, elimina os organismos patogênicos, e aponta para o uso do processo de secagem para a produção do biossólido do tipo Classe A, o qual não tem nenhuma restrição de uso na agricultura.

A redução de patógenos é dividida em duas classes: a Classe A e a Classe B, de acordo com as normas CETESB P-4.230 (CETESB, 1999) e EPA 40 CFR Part 503 (EPA, 2003).

2.5.4.1. Classificação do lodo segundo a redução de patógenos

A - Classe A

Conforme CETESB (1999), o lodo, ou biossólido, é considerado Classe A se a quantidade de coliformes fecais for inferior à 1000 NMP/g de sólidos totais, e a quantidade de *Salmonella* spp deve ser inferior à 3NMP/4g de sólidos totais. Para a verificação da redução adicional de patógenos, a concentração de vírus entéricos deve ser reduzida a um valor menor que 1 UFP/4g de sólidos totais, e os ovos de helmintos e os cistos de protozoários devem ser reduzidos a um valor menor que 1 un./4g de sólidos totais.

O processo adotado para o seu tratamento deve ser aprovado pelo órgão ambiental como processo de redução adicional de patógenos e, analisado quanto à presença de coliformes fecais e *Salmonella* spp, no momento de seu uso ou disposição no solo agrícola ou no momento da entrega a terceiros, responsáveis pela aplicação.

Para a EPA (2003), pertencem à Classe A aqueles cuja quantidade de coliformes fecais for inferior à 1000 NMP/g de lodo seco ou a quantidade de *Salmonella* spp for inferior à 4 NMP/4g de lodo seco, e preencher uma das seis opções de processo previstas na regulamentação: tempo e temperatura, uso de calor e elevação do pH, demonstração da eliminação de helmintos e vírus entéricos (os ovos viáveis de helmintos devem ser inferiores a 1 ovo/4g de lodo seco, e os vírus entéricos devem ser inferiores a 1 UFP/4g de lodo seco), e o tratamento que o lodo recebe deve ser enquadrado no *Process to Further Reduce Pathogens* (PFRP), que é análogo aos processos de redução adicional de patógenos recomendados pela CETESB.

Os lodos que atenderem essas condições podem ser ensacados para venda ou distribuição gratuita, ou aplicados em gramados e jardins residenciais, e não existem restrições para acesso público nos solos que receberam este material.

David (2002) salientou em seu trabalho a maior diferença entre as normas, pois a norma EPA 40 CFR Part 503 requer a verificação de coliformes fecais “ou” *Salmonella* spp, enquanto a norma CETESB P-4.230 requer a verificação de ambos.

B - Classe B

Segundo a CETESB (1999), o lodo ou biossólido é considerado Classe B se a quantidade de coliformes fecais for inferior a 2×10^6 NMP/g de sólidos totais. A classificação do lodo como Classe B deve passar por processos que são aceitos pelos órgãos ambientais, ou, o resultado do monitoramento de coliformes fecais indicar que a média geométrica da densidade de coliformes fecais de 7 amostras forem inferiores a 2×10^6 NMP/g de sólidos totais ou 2×10^6 UFP/g de sólidos totais.

Para a EPA (2003), o nível de coliformes fecais dos lodos classificados como B deve ser inferior à 2×10^6 NMP/g de lodo seco e o processo utilizado para o tratamento

deve estar enquadrado no Process to Significantly Reduce Pathogens (PSRF), que é análogo aos processos de redução de patógenos recomendados pela CETESB. Podem ser destinados a aplicação em granel, e pode ser aplicado em grandes culturas, reflorestamento e em locais que tenham acesso ao público normatizado. O lodo Classe B deve se enquadrar nas condições a seguir.

2.6. Processos recomendados para o tratamento do lodo

Os processos empregados para o tratamento do lodo, transformando-o em biossólido, devem atender àqueles recomendados pelos órgãos ambientais.

A norma CETESB P-4.230 (CETESB, 1999) e a norma EPA 40 CFR Part 503 (EPA, 2003) recomendam 11 processos de tratamento de lodo para a eliminação de patógenos, divididos em 6 processos para a Classe A (Processos de redução adicional de patógenos, PFRP) e 5 processos para a Classe B (Processos de redução de patógenos, PSRF). Os processos recomendados para as Classes A e B estão apresentados nas Tabelas 2.14 e 2.15 respectivamente.

Tabela 2.14: Processos de redução adicional de patógenos ou PFRP para o tratamento do lodo, recomendado para o biossólido Classe A (EPA, 2003).

Processo recomendado	Descrição do Processo
Compostagem	Compostagem para processos aerados (reator biológico ou leiras estáticas aeradas) à uma temperatura superior ou igual a 55°C durante pelo menos 3 dias. Para a compostagem em leiras, com revolvimento mecânico, a temperatura deve ser igual ou superior a 55°C durante 15 dias, sendo que neste período deve haver no mínimo 5 revolvimentos.
Secagem térmica	Secagem térmica direta ou indireta com ar. A umidade do lodo deve ser igual ou menor a 10%. A temperatura das partículas de lodo deve ser superior à 80°C ou a temperatura de bulbo úmido do gás em contato com o lodo, na saída do secador, supere 80°C
Tratamento térmico	O lodo é aquecido a 108°C no mínimo, pelo menos durante 30 minutos.

Tabela 2.14: Processos de redução adicional de patógenos ou PFRP para o tratamento do lodo, recomendado para o biossólido Classe A (EPA, 2003). (continuação)

Processo recomendado	Descrição do Processo
Digestão aeróbia termofílica	Digestão aeróbia a ar ou oxigênio, com o lodo sendo misturado e aerado, sendo mantidas as condições aeróbias por pelo menos 10 dias à temperatura de 55 – 60°C
Irradiação	Irradiação com raios beta emitidos por uma acelerador capaz de fornecer dosagens mínimas de 1 megarad a 20°C ou irradiação com raios gama à uma temperatura de 20°C à 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

Tabela 2.15: Processos de redução de patógenos ou PSRP para o tratamento do lodo, recomendado para o biossólido Classe B (EPA, 2003).

Processo recomendado	Descrição do Processo
Digestão aeróbia	Digestão aeróbia a ar ou oxigênio. O lodo deve ser misturado e aerado, mantendo-se as condições aeróbias por 40 dias a 20°C ou 60 dias a 15°C.
Secagem	A Secagem ocorre 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	A digestão anaeróbia deve ocorrer por pelo menos 15 dias a uma temperatura de 35 – 55°C ou por 60 dias a 20°C.
Compostagem	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 / calagem	É adicionada cal ao lodo, o suficiente para elevar o pH a 12 depois de 2 horas de contato.

2.7. Destino Final do Lodo

A destinação final de resíduos sólidos enquadra-se hoje, em um dos maiores problemas relacionados à área ambiental. E devido à larga produção do lodo de esgoto, as empresas responsáveis pelo abastecimento de água e esgotamento, procuram a melhor

solução para este problema. E o “custo x benefício” geralmente impera sobre as decisões da destinação final do lodo de esgoto.

Pires (2006) observou em seu trabalho que a maioria das cidades brasileiras não apresentam rede de coleta de esgotos e/ou estações de tratamento dos mesmos, e que segundo a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, 92% da população urbana tem água encanada, 25% tem rede de coleta de esgotos, e apenas 12% possui sistemas de tratamento do esgoto. Muitas vezes, o esgoto é lançado diretamente nas coleções hídricas, poluindo-as e resultando em situações caóticas como a do rio Tietê em São Paulo. Para tentar reverter ou ao menos amenizar o problema, foram criadas políticas de incentivo ao saneamento básico e à instalação de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) nas cidades, para que as águas residuárias sejam coletadas e tratadas devidamente antes da devolução aos mananciais.

Machado (2001), em seu extenso trabalho, verificou que a maioria das prestadoras de serviços em saneamento que operam as estações de tratamento de esgoto no Brasil, destinam o lodo produzido para aterros sanitários, onde são acomodados juntamente com os resíduos sólidos urbanos. Ainda que o lançamento em aterros sanitários venha se tornando cada vez menos interessante do ponto de vista ambiental e econômico, pois os custos com o transporte e com o aterramento são elevados, enquanto não se implementar uma política nacional séria de gestão dos bio sólidos no Brasil, o aterro continuará a ser o procedimento de disposição final mais empregado.

Vários autores, dentre eles: Pires (2003), David (2002), Tsutiya (2000) e Andreoli *et al.* (2000a) abordaram o uso do lodo como bio sólido na agricultura, após sofrer um processo adicional de redução de patógenos, pois alguns de seus constituintes são nutrientes encontrados em fertilizantes comerciais, garantindo uma saída viável para o destino final do lodo.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Neste Capítulo são apresentados os materiais, o procedimento experimental com descrição do sistema, o planejamento experimental, as metodologias para a caracterização físico-química do lodo estudado, determinação dos microrganismos patogênicos, verificação da redução (encolhimento) do volume e o estudo de modelos matemáticos para o estudo da secagem.

3.1. Material

O lodo estudado era oriundo do processo primário da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) – Tatu, da empresa Águas de Limeira S.A., responsável pelo esgotamento sanitário da cidade de Limeira – SP. Dentre as principais atividades produtivas da cidade, destacam-se um número significativo de pequenas caldeirarias e fábricas de semi-jóias, ou seja, indústrias que utilizam processos de galvanoplastia, que podem contribuir de alguma forma para a composição diferenciada de um lodo de ETE.

A Figura 3.1 mostra o fluxograma simplificado do processo da ETE. O lodo de interesse deste trabalho foi coletado após a etapa de centrifugação (1), que promove uma desidratação mecânica deixando o lodo bruto com aproximadamente 30% de sólidos.

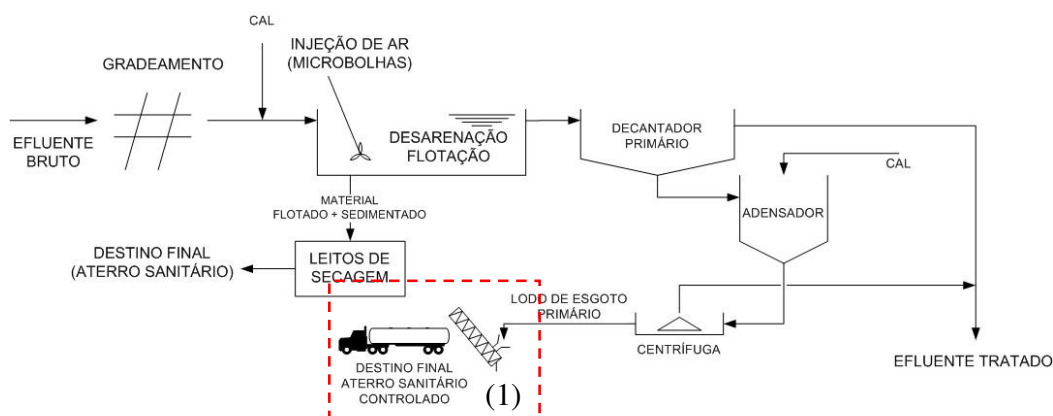


Figura 3.1: Fluxograma simplificado da ETE – Tatu (ÁGUAS DE LIMEIRA, 2008).

3.1.1. Preparação da amostra

O lodo primário bruto (“in natura”) foi coletado de uma única vez na ETE Tatu. Para o planejamento experimental deste estudo, apresentado no item 3.2.2, optou-se por uma única coleta, considerando informações da literatura e resultados preliminares, os quais indicaram que as variações nas características do lodo, ocasionada pelo recebimento sazonal de efluentes industriais e urbanos lançados no esgoto, teriam efeito pouco significativo. Sendo assim, as análises dos parâmetros físico-químicos foram efetuadas logo após a coleta do lodo bruto para posterior comparação com as análises do lodo submetido à secagem. Ainda que a questão da sazonalidade indique pouca relevância no caso deste trabalho, a região de coleta se caracteriza por atividades diversificadas e que podem gerar lodos diferenciados em período de coletas distintos. Portanto, para o caso deste estudo foi necessário realizar uma avaliação do efeito da sazonalidade e com isso foram coletadas amostras a cada duas semanas durante dois meses, visando a confirmação desta consideração.

O material coletado foi homogeneizado, quarterado, acondicionado em recipientes herméticos e armazenado à temperatura de 7°C aproximadamente. Os ensaios de secagem foram realizados em dias subseqüentes para que, caso ocorressem, as possíveis alterações das características do lodo devido ao tempo de armazenagem fossem minimizadas.

Após o processo de secagem, amostras do lodo tratado termicamente foram trituradas, quarteradas de acordo com a norma NBR 10007 (ABNT, 2004), para amostragem de resíduos sólidos, e acondicionadas em frascos plásticos vedados, identificados e armazenadas sob duas formas: sob refrigeração para as análises microbiológicas e sob congelamento para as análises físico-químicas (pH, Nitrogênio Total, metais pesados, Carbono Orgânico Total - COT). Todas as análises mencionadas foram também realizadas no lodo primário bruto.

As análises microbiológicas foram realizadas no Instituto Adolfo Lutz - IAL, enquanto as análises de Nitrogênio Total e COT foram feitas no Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, ambos os institutos localizados na cidade de Campinas – SP.

Considerando as condições de segurança e higiene, com relação ao manuseio do lodo, bem como a preparação das bandejas do secador para a secagem e as amostras para as análises, tais procedimentos foram realizados em capela. Após a realização dos experimentos, a bancada e os materiais utilizados foram submetidos à limpeza rigorosa com produtos desinfetantes (hipoclorito de sódio a 2%, e LYSOFORM®) e em seguida alguns materiais e as vidrarias eram mantidos em estufa à 105°C, por pelo menos 4 horas. Todo o resíduo sólido gerado foi armazenado e enviado posteriormente à Águas de Limeira S.A. para disposição final.

3.1.2. Caracterização físico-química do lodo

Os parâmetros físico-químicos determinados foram: umidade inicial, sólidos totais e voláteis, metais pesados, pH, nitrogênio total e carbono orgânico total.

Para a obtenção da umidade inicial foi utilizado o método gravimétrico que é considerado uma metodologia clássica, de acordo com APHA (1998), no qual as amostras, em duplicata, eram preparadas com uma porção do lodo bruto quarterado, maior que 3g, pesada em balança analítica com precisão de 0,0001 g, e submetidas à secagem em estufa a 105°C ± 5°C até peso constante. Para garantir que toda a umidade fosse retirada do sólido, a amostra foi mantida na estufa por 23 horas, em seguida o material foi pesado e retornado à estufa por mais uma hora, e novamente pesado. Após a verificação de peso constante, esta era considerada a massa final de sólido seco (M_{ST}). A umidade inicial foi determinada em base úmida pela Equação 3.1.

$$\% \text{ umidade inicial (b.u.)} = \frac{(M - M_{ST})}{M} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde: M , massa inicial úmida [M]; M_{ST} , massa final de sólido seco [M].

A determinação de sólidos totais e voláteis seguiu também a metodologia clássica da APHA (1998). A massa de sólidos totais é a mesma massa final obtida para a umidade inicial (M_{ST}).

As amostras secas foram submetidas por aproximadamente quatro horas à temperatura de 600°C até cinzas. As cinzas eram pesadas e então determinada a massa de sólidos fixos (M_{SF}). Por diferença dos sólidos totais e fixos foi obtida a porcentagem de sólidos voláteis, conforme a Equação 3.2.

$$\%_{SV} = \frac{M_{ST} - M_{SF}}{M_{ST}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Onde: M_{ST} , massa de sólidos totais [M]; e M_{SF} , massa de sólidos fixos [M].

Os metais pesados, analisados de acordo com a recomendação das normas da CETESB (1999), foram: zinco (Zn), cobre (Cu), cádmio (Cd), níquel (Ni), chumbo (Pb) e Cromo (Cr).

A determinação da concentração de cada metal nas amostras de lodo foi realizada por espectrometria de absorção atômica (AA), utilizando-se um espectrofotômetro da Marca PerkinElmer, Modelo AANALYST 100. Inicialmente foram testadas três metodologias de preparação de amostra para análise de metais, conforme Silva (2005). Na primeira metodologia o procedimento consistia em submeter a amostra a uma digestão ácida onde cerca de 2g de lodo previamente seco em estufa à temperatura de 40°C era colocada em um béquer e adicionado 20mL de ácido nítrico (HNO_3) 6 mol.L⁻¹. O béquer contendo a amostra era aquecido à 70°C por um período de 6 a 8 horas para promover a digestão total do material. Em seguida o material era suspenso em 10mL de HNO_3 0,5 mol.L⁻¹ e, após o resfriamento, o lodo digerido era separado do sobrenadante por filtração utilizando o filtro Milli Q, com membrana RC 0,45 µm de diâmetro de 47 ± 0,5 mm, com o auxílio de bomba a vácuo. O sobrenadante era transferido para um balão volumétrico de 50 mL, onde as amostras eram coletadas para a análise no espectrofotômetro.

No caso das duas outras têm-se que a primeira utiliza uma combinação de ácido nítrico e ácido clorídrico concentrados, e a segunda utiliza uma combinação de ácido nítrico e peróxido de hidrogênio concentrados. Os resultados obtidos por Silva (2005) nas três metodologias foram semelhantes, deste modo, optou-se por utilizar a digestão apenas com ácido nítrico, dada a sua simplicidade.

Para a determinação do pH, utilizou-se a metodologia descrita no trabalho de Chagas (2000). Inicialmente eram pesados 10g da amostra e colocadas em um béquer de 100mL, em seguida adicionava-se água fervida (isenta de gás carbônico) e após 4 horas era determinado o pH em um potenciômetro com eletrodo.

A determinação da quantidade de nitrogênio total e carbono orgânico total presente no lodo de esgoto bruto e no lodo seco foram realizadas no Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, conforme os procedimentos apresentados no trabalho de Andrade *et al.* (2006).

3.1.3. Determinação dos microrganismos patogênicos

O estudo dos microrganismos patogênicos foi desenvolvido em conjunto com o Instituto Adolfo Lutz - IAL de Campinas, SP.

Devido a grande diversidade microbiológica contida no lodo de esgoto, foram definidas duas etapas de trabalho, sendo uma para o estudo bacteriológico, e outra para o estudo parasitológico.

O estudo bacteriológico seguiu a metodologia apresentada pela EPA (2003), enquanto o parasitológico seguiu a Norma L5.550 (CETESB, 1989). Os procedimentos relativos a estas metodologias encontram-se descritos nas referências citadas, destacando que a Norma L5.550 (CETESB, 1989) não é de domínio público.

Em decorrência do grande volume de lodo de esgoto necessário para a realização das análises e a limitação da quantidade de material por bandeja do secador, optou-se por realizar análise composta, a partir da mistura do material das duas bandejas e o

quarteamento da coleta, obtendo-se assim a quantidade de lodo necessária para as análises bacteriológicas e parasitológicas. Este procedimento atende as normas de amostragem da CETESB (1989) e NBR 10007 (ABNT, 2004).

3.2. Procedimento Experimental de Secagem

3.2.1. Descrição do sistema experimental

A montagem do sistema de secagem convectivo e sua instrumentação foram projetadas e instaladas por Carvalho (2003) para secagem de resíduo hospitalar e, modificada por este trabalho para secagem de resíduo de ETE, onde 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.

A Figura 3.2 mostra o desenho esquemático do sistema experimental, instalado no Laboratório de Engenharia Ambiental da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas. O sistema é constituído pelas seguintes seções:

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;

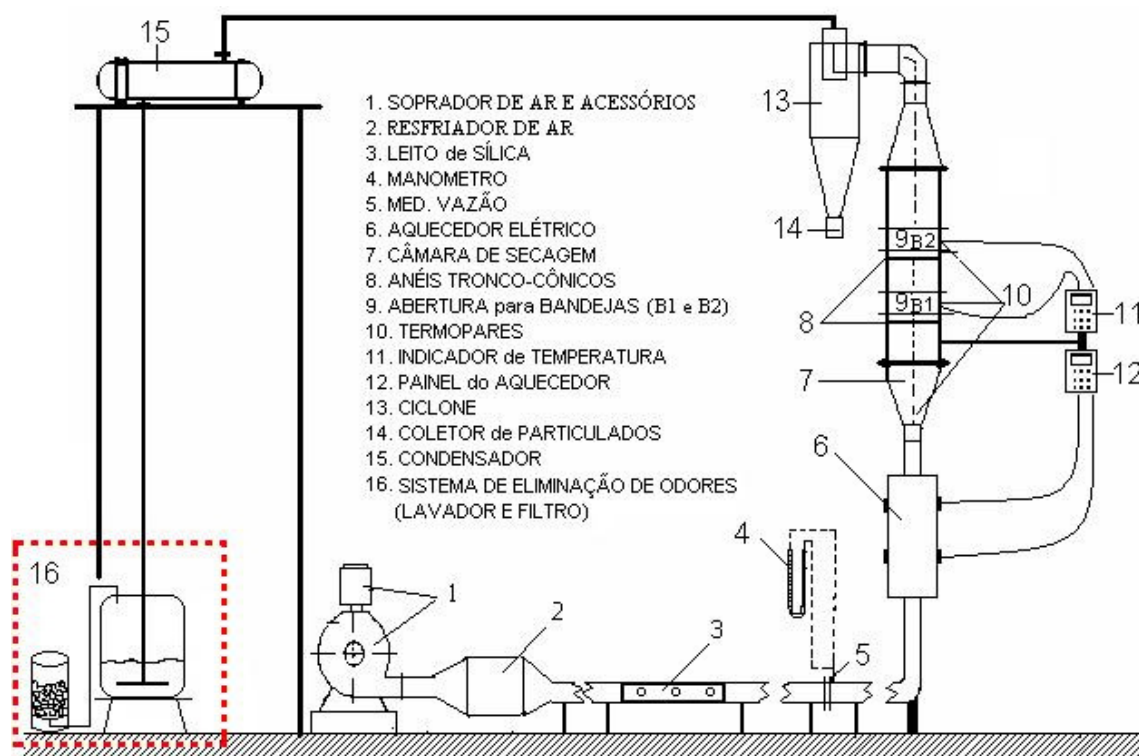


Figura 3.2: Desenho esquemático do sistema de secagem.

Leito de sílica (3): é 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. Possui ainda, três visores de acrílico que permitem a observação da saturação da sílica. Devido a grande perda de carga causada pelo leito, sendo este fator limitante para a vazão máxima do processo de secagem e a capacidade do soprador, foram colocados no leito de sílica capilares de plástico de 0,5mm de diâmetro e 10mm de comprimento a fim de aumentar as áreas livres do leito, minimizando a perda de carga, facilitando assim o escoamento do ar através deste;

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 04 resistências ôhmicas, sendo 03 resistências de 400 W e 01 resistência controladora de 1800 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), onde são colocadas as bandejas perfuradas (aço-inox) construídas com malha de 2mm e revestidas por uma malha de 0,05 mm para que o lodo utilizado não escoasse pela bandeja devido a 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
<i>Câmara:</i>	
- Diâmetro interno	16 cm
- Altura	70 cm
<i>Bandejas:</i>	
- Número	02
- Dimensões	15 x 4 cm
<i>Cones internos:</i>	
- Número	02
- Diâmetro	14 cm

Medida e registro de temperatura (10) e (11): o sistema de secagem possui cinco termopares do tipo “J” calibrados. Três termopares de 2 mm de diâmetro externo estão instalados, respectivamente na entrada da câmara de secagem e acima de cada bandeja. Dois termopares de 1,5 mm de diâmetro externo estão instalados no centro de cada

bandeja, para medir a temperatura interna da torta. Os registros das temperaturas são obtidos empregando-se um indicador de temperatura marca ROBERTSHAW, modelo T4WM, constituído de cinco canais e indicador digital de temperatura. A Figura 3.3 mostra a distribuição dos termopares no corpo do secador, onde os termopares 4 e 5 são colocados no interior da torta.

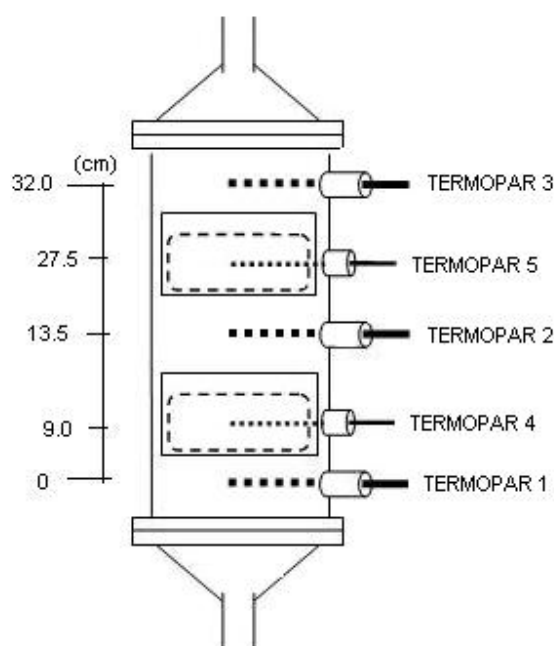


Figura 3.3: Distribuição dos termopares no corpo do secador.

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

Condensador (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 escoar na carcaça e o

fluido de resfriamento (água) nos tubos. O condensado é enviado para o sistema de eliminação de odores (16);

Sistema de Eliminação de Odores (16): constituído por um lavador e por um filtro de carvão vegetal. Para o lavador, responsável pela captura de odores, 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 $\frac{3}{4}$ in, sendo o acoplamento auxiliado com mangueira de diâmetro externo de 1 in. À luva foi conectado um tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ in com uma altura adequada para o borbulhamento do residual gasoso proveniente do condensador (que apresenta odor característico de liberação de gás sulfídrico e sulfetos) em solução de hipoclorito de sódio, sendo o tambor hermeticamente fechado. Os gases são liberados através de uma mangueira de $\frac{1}{2}$ in instalada na tampa deste tambor, percolando um filtro de carvão vegetal visando promover a adsorção de possíveis odores residuais, garantindo sua eliminação total, ou pelo menos uma considerável redução.

As Figuras 3.4 a 3.6 mostram o detalhamento do sistema de secagem. Na Figura 3.4 são visualizados: 1 - controlador do aquecedor elétrico, 2 - aquecedor elétrico, 3 - indicador de temperatura, 4 – conjunto dos termopares, 5 - câmara de secagem, 6 - ciclone, 7 - condensador, 8 - painel de manômetros e 9 – lavador. Na Figura 3.5 tem-se: 1 - filtro de carvão vegetal e 2 – lavador. Na Figura 3.6 são mostrados: 1 - soprador e os acessórios (2 - supressor de ruídos e 3 - filtro) e 4 - resfriador de ar.



Figura 3.4: Vista geral do sistema de secagem.



Figura 3.5: Sistema lavador de gases.



Figura 3.6: Vista do soprador (1) e acessórios (supressor de ruídos (2) e filtro de ar (3)) e resfriador de ar (4).

3.2.2. Planejamento Experimental

O estudo da secagem foi desenvolvido utilizando o secador convectivo direto com fluxo ascendente, apresentado na Figura 3.2. Os ensaios experimentais foram realizados conforme um Planejamento Fatorial 3^2 com duplicata, totalizando 18 experimentos (2 variáveis e 3 níveis), sendo a temperatura do ar de secagem e vazão do ar do processo de secagem as variáveis independentes. A aplicação deste planejamento teve como objetivo verificar a influência das variáveis independentes bem como a interação entre os fatores no processo de secagem, já que o secador é convectivo. Para a convalidação da análise estatística do planejamento adotado, os experimentos foram feitos de forma aleatória. A proposta de se empregar este tipo de planejamento teve como base as seguintes considerações:

A – Segundo Button (2005), o uso de réplicas permite obter uma estimativa de como o erro experimental afeta os resultados dos ensaios e se estes são estatisticamente diferentes.

Deste modo, por ser o primeiro trabalho realizado no LEA com lodo de esgoto, optou-se por fazer as réplicas de todos os ensaios, ao invés de somente a dos pontos centrais, verificando possíveis erros experimentais, pois, uma pequena diferença na fluidodinâmica do processo que não fosse observada durante o ensaio, como por exemplo o efeito de uma má vedação da porta de acesso das bandejas, poderia comprometer todo o planejamento;

B – Como um dos objetivos do trabalho era verificar através da secagem térmica a inativação microbiológica, optou-se por três níveis de temperatura, deixando o planejamento mais robusto; e

C – Em testes preliminares, foi verificado que mesmo preenchendo todo o volume das bandejas com o lodo bruto, no final do processo de secagem, a massa final não era suficiente para todas as análises, pois a metodologia para a avaliação da inativação microbiológica necessitava de uma quantidade de lodo seco maior do que a da bandeja em um único ensaio, e com isso, foi necessário fazer uma análise composta, ou seja, utilizando a massa final do ensaio e sua replicação.

A variável de resposta foi o tempo de secagem das bandejas 1 e 2, considerando como término do processo a obtenção de uma massa final entre 92 – 95% de sólidos na bandeja 2. A condição de parada para a obtenção de sólidos nesta faixa foi escolhida seguindo as recomendações da CETESB (1999), que indica que para o lodo se tornar um biossólido é necessário que tenha uma massa final superior a 90% de sólidos. A análise estatística foi desenvolvida com o auxílio do *STATISTICA 5.0*, empregando uma confiabilidade de 95%, para verificar o grau de influência das variáveis individuais e sua interação sobre a resposta tempo de secagem. Análises como estimativa de efeitos e ANOVA foram expressas pelos diagramas de barras (Pareto).

As temperaturas do ar foram selecionadas considerando os seguintes critérios: o nível mínimo para a temperatura de operação foi fixado em 80°C, a partir de estudos preliminares tendo se verificado que a temperatura no meio das tortas ultrapassou 60°C por mais de uma hora. Nesta condição a temperatura e o tempo de exposição são suficientes para a inativação de vários microrganismos patogênicos (STERN, 1974; ROEDIGER,

1979). Os perfis de temperatura durante o processo de secagem à 80°C, comprovando o tempo de exposição à temperatura adequada para eliminação microbiológica são apresentados no Apêndice D pelas Figuras D9, D10, e D13 a D16. O nível máximo foi fixado em 140°C, considerando-se que acima desta temperatura constituintes do lodo podem entrar em decomposição térmica e promover a emissão de possíveis compostos tóxicos para a atmosfera. Para uma análise do comportamento do processo, fixou-se um nível médio, de 110°C, e de acordo com trabalhos como o de Carvalho (2003), esta faixa de temperatura fornece bons resultados de redução de volume pela eliminação de água.

As normas P 4.230 (CETESB, 1999) e 40 CFR 503 (EPA, 2003) indicam que a temperatura no interior da torta 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 à uma temperatura de 60°C por um tempo superior a 30 min, já garantiria a completa inativação microbiológica, portanto o consumo de energia pelo processo é minimizado. Com isso, as temperaturas do ar de secagem adotadas neste trabalho foram 140°C, 110°C e 80°C, para os níveis máximo, médio e mínimo, respectivamente.

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 3 cm. O nível máximo foi estabelecido como sendo a máxima queda de pressão (Δh) na placa de orifício, para o qual o lodo permanece fixo, nas bandejas, sem que haja a expansão do leito, no caso em $0,4 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ devido a elevada perda de carga ocasionada principalmente pelo leito de sílica e os outros acessórios (resfriador de ar, aquecedor elétrico, entre outros), pois estes são acidentes limitantes para a escolha da vazão máxima do processo. Enquanto o mínimo foi fixado como sendo 50% da queda de pressão (Δh) do nível máximo, e mesmo com esta queda de pressão ainda ocorria a vazão de ar suficiente para a secagem. A vazão média correspondeu a média dos valores máximo e mínimo. Assim foram definidas as vazões de $0,4 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$, $0,3 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$, e $0,2 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$, níveis máximo, médio e mínimo, respectivamente.

As metodologias para a calibração dos termopares bem como a calibração da vazão de ar determinada pela placa de orifício estão descritas nos Apêndices A e B respectivamente.

O planejamento e ordem dos ensaios experimentais são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Planejamento Fatorial 3².

Temp. (°C)	Vazão (kg/min)		
	0,2	0,3	0,4
80	15	13	9
	16	14	10
110	17	3	1
	18	4	2
140	7	11	5
	8	12	6

Nos ensaios de secagem o procedimento operacional consistia inicialmente na fixação da vazão e estabilização da temperatura selecionada. Em seguida, o lodo bruto armazenado sob refrigeração à temperatura de 7°C, era acondicionado nas bandejas, e uma massa de 550 g de lodo/bandeja era distribuída uniformemente até atingir uma altura de 3 cm, garantida pelo mesmo procedimento de empacotamento do lodo para todas as condições estudadas. Após a estabilização do processo, iniciava-se a secagem. Durante o processo as bandejas eram pesadas em uma balança semi-analítica, da GEHAKA modelo BG 8000 com capacidade de 8.000 g e sensibilidade de 0,1 g, sendo a massa de sólidos determinadas de 5 em 5 min durante os 30 min iniciais. À partir dos 30 min de secagem, a pesagem era feita de 10 em 10 min até os 60 min, aumentado para 15 em 15 min até os 90 min, e à partir deste de 30 em 30 min, até o término do processo. No desenvolvimento desta etapa a estrutura do lodo era acompanhada visualmente para verificação da ocorrência do início da fissura da torta. Após a secagem, o lodo seco era triturado, quarteado e acondicionado em recipientes plásticos vedados, identificados, e armazenado sob congelamento para as análises físico-químicas e resfriado para serem submetidos às análises microbiológicas, conforme descrições nos itens 3.1.1 a 3.1.3.

As taxas de secagem foram obtidas a partir do diferencial ponto a ponto, apresentado pela Equação 3.3.

$$\frac{\Delta X_i}{\Delta t_i} = \frac{X_{i-1} - X_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (3.3)$$

No qual: X_{i-1} é o conteúdo de umidade em B.S. (g/g) da medida anterior; X_i , conteúdo de umidade em B.S. (g/g) atual; t_i , tempo atual (min); e, t_{i-1} , tempo da medida anterior (min).

A redução de volume foi avaliada pela Equação 2.2, proposta por Perez & Calvelo (1984), e aqui reapresentada.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\rho_0(1 + X)}{\rho(1 + X_0)} \quad (2.2)$$

A massa específica aparente inicial (lodo bruto) e final (após o processo de secagem) foram determinadas por deslocamento de volume usando picnometria a líquido, utilizando n-Hexano.

3.3. Modelagem Matemática

A modelagem matemática do processo de secagem foi realizada utilizando vários modelos disponíveis na literatura apresentados na Tabela 2.16 do Capítulo 2.

Inicialmente foi testada a aplicação da Lei de Fick, considerando o sólido como sendo uma placa plana, truncando a Equação 2.5 no terceiro termo.

Os demais modelos avaliados e respectivos períodos, para ajuste aos dados experimentais da cinética de secagem obtidos neste trabalho foram: o modelo linear para a fase à taxa constante (1); e 11 modelos não-lineares, sendo 8 semi-empíricos (2 a 9) e 3

empíricos (10 a 12) para as duas fases à taxa decrescente. Cada período foi determinado através de testes realizados à partir das taxas de secagem e verificando as derivadas das curvas de secagem.

As curvas preditas das cinéticas de secagem foram elaboradas com base no modelo que melhor atende aos critérios estatísticos, no caso, Coeficiente de correlação (R^2), Análise de resíduo e Gráfico 2D, onde são utilizadas as siglas PMP - Passa pela Maioria dos Pontos e NPMP - Não Passa pela Maioria dos Pontos, se o modelo passa ou tangencia uma maior ou menor quantidade de pontos experimentais.

Nestas correlações, *a*, *b*, *c*, *d*, *k*, *k1*, *k2*, e *n* são constantes obtidas no ajuste dos dados experimentais aos modelos, através do método dos mínimos quadrados.

Tanto o estudo estatístico do planejamento experimental como a modelagem foi desenvolvida com o auxílio do *STATISTICA 5.0*.

Os modelos foram escolhidos por serem difusivos, e pelo fato de a maioria destes serem propostos para a modelagem matemática da secagem de produtos orgânicos, especialmente grãos como milho, arroz e soja. No caso do lodo, pode-se considerar que praticamente toda sua composição o caracteriza como material orgânico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo são apresentados os resultados experimentais, das simulações, e discussões.

Inicialmente são colocados os resultados da caracterização físico-química do lodo bruto e tratado, e os resultados do estudo da secagem bem como a análise estatística do planejamento experimental proposto. Em seguida, são analisados a redução de volume decorrente do processo de secagem e os resultados das simulações que possibilitaram a escolha dos modelos que melhor se ajustaram aos dados cinéticos da secagem de lodo de esgoto primário. São apresentados também a avaliação do estudo da secagem sob o efeito da sazonalidade do lodo, e os resultados da verificação da inativação microbiológica para cada condição proposta.

4.1. Características físico-químicas

4.1.1. Umidade Inicial e Sólidos Totais e Voláteis

O conteúdo de umidade inicial do lodo obtido foi de 70,95%. Este resultado encontra-se na faixa de 28 – 30% de teor de sólidos típico para o lodo bruto primário após o processo de centrifugação (desidratação mecânica), conforme Gonçalves & Ludovice (2000).

Os resultados de sólidos totais e fixos estão apresentados na Tabela 4.1. A partir destes dados e com a Equação 3.1, obteve-se a porcentagem de sólidos voláteis que foi de 55,83%, valor este próximo ao da faixa de 60 – 80% encontrada no trabalho de Metcalf e Eddy (1991). A pequena diferença de valor de sólidos voláteis em relação à faixa encontrada na literatura pode ser explicada pela quantidade de produtos inorgânicos presentes no lodo bruto, visto que a empresa Águas de Limeira S.A. utiliza cal para o adensamento do lodo. Além disso, o período de chuvas, ou outros fatores ambientais, podem ocasionar o assoreamento das margens, provocando o arraste de maior quantidade

de areia, portanto, diminuindo o valor de sólidos voláteis que é diretamente ligado à quantidade de produtos orgânicos presentes no lodo de esgoto.

Tabela 4.1: Massa de sólidos totais e fixos no lodo seco.

Sólidos totais (M_{ST}) (g)	Sólidos fixos (M_{SF}) (g)
1,556	0,687

4.1.2. Metais Pesados

A Tabela 4.2 mostra os resultados das análises de metais pesados para o lodo bruto e seco. Em função de sua heterogeneidade as amostras para análises foram obtidas seguindo o procedimento de quarteamento recomendado pela ABNT (2004). Para o lodo tratado termicamente, foi escolhida a condição máxima de processo ($T = 140^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$), ou seja, na condição mais severa.

Tabela 4.2: Concentração de metais no lodo bruto e após a secagem (mg de metal/kg de lodo seco).

Amostra	Metais Pesados					
	Zn	Ni	Cu	Cr	Pb	Cd
Lodo bruto	3736	421	3424	184	229	17
Bandeja 1	3856	413	3545	182	229	17
Bandeja 2	3734	428	3360	182	234	17
Permitido pela CETESB	7500	420	4300	3000	840	85
Limite de erro	3549	400	3253	175	218	16
$\pm 5\%$ (faixa)	3922	442	3596	193	241	18

Verifica-se a partir da Tabela 4.2 uma pequena diferença nos resultados das bandejas 1 e 2 com relação aos valores do lodo bruto, contudo, esta diferença é inferior a 5%, o que corresponde à faixa de desvio do equipamento de análise, no caso, o espectrofotômetro de AA. Com isso, pode-se considerar que não ocorreu volatilização de nenhum dos metais estudados, e portanto, não ocorreu emissão de metais pesados para a atmosfera sob as condições escolhidas neste estudo.

Observa-se que o níquel encontra-se em condição limite do padrão de concentração permitido pela CETESB. Esta concentração é decorrente do tipo de efluentes descartados na região, que se caracteriza fortemente por atividades ligadas a fabricação de jóias e semi-jóias que utilizam o banho de níquel em uma das etapas de processo destes produtos. Assim como o níquel, o banho de cobre também é utilizado em uma das etapas deste processo, porém, como sua concentração máxima permitida pelo órgão ambiental é bem mais elevada, o mesmo encontra-se dentro do padrão permitido.

4.1.3. pH

O pH medido para o lodo bruto foi de 6,8 e os dados obtidos em duplicata para as amostras de lodo seco encontram-se na Tabela 4.3. Verifica-se que o pH do lodo após a secagem não sofreu alteração significativa em comparação com o pH do lodo bruto, sendo o desvio padrão das amostras de 0,1 para ambas as bandejas, e a diferença entre os resultados nas diferentes condições de secagem não ultrapassam 7,5% comparado ao resultado do lodo bruto.

Os valores determinados para o pH são comparáveis aos valores obtidos por Metcalf & Eddy (1991) para o lodo bruto, entre 5,0 e 8,0. Sabe-se que para o lodo proveniente de ETE, o valor de pH é influenciado pela quantidade de sólidos fixos e voláteis, pois na etapa de flotação e adensamento no processo (Figura 3.1) é utilizado cal, e este sendo um material inorgânico, quanto maior a quantidade empregada maior será a presença de sólidos fixos, maior será o pH, e conseqüentemente, menor será proporção de sólidos voláteis.

No caso deste trabalho, durante o processo de secagem pode ter ocorrido liberação de alguns sólidos voláteis. Portanto, a pequena diferença entre as amostras pode estar associada ao conteúdo de umidade das mesmas, uma vez que o maior valor de pH é o do lodo bruto (“in natura”), com conteúdo de umidade inicial superior a 70%, e comparando os resultados das bandejas 1 e 2, as amostras com menor pH foram as da bandeja 1, onde no final do processo, o conteúdo de umidade ficou abaixo de 5%, enquanto a bandeja 2 ficou entre 5 – 8%, isto pode ser claramente observado pela Figura 4.1.

Tabela 4.3: pH obtidos para as amostras de lodo seco, em duplicata (T em °C, e Q em kg.min⁻¹).

Condição	Amostras dos ensaios	Band. 1	Band. 2	Condição	Amostras dos ensaios	Band. 1	Band. 2
T=110 Q=0,4	1	6,7	6,7	T=80 Q=0,4	9	6,5	6,7
	2*	6,6	6,7		10*	6,6	6,7
T=110 Q=0,3	3	6,7	6,8	T=140 Q=0,3	11	6,3	6,5
	4*	6,7	6,9		12*	6,5	6,5
T=140 Q=0,4	5	6,6	6,7	T=80 Q=0,3	13	6,6	6,6
	6*	6,6	6,7		14*	6,5	6,6
T=140 Q=0,2	7	6,5	6,6	T=80 Q=0,2	15	6,3	6,5
	8*	6,5	6,5		16*	6,4	6,6
				T=110 Q=0,2	17	6,3	6,3
					18*	6,4	6,5

* duplicata

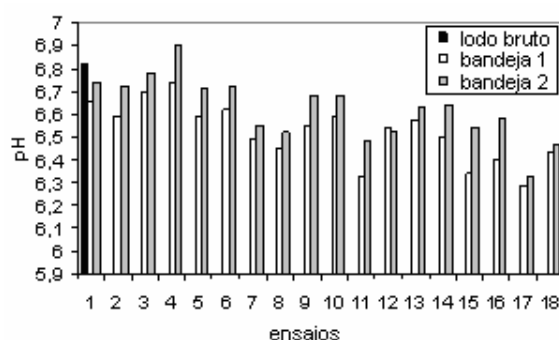


Figura 4.1: pH do lodo bruto e do lodo seco das bandejas 1 e 2.

4.1.4. Nitrogênio Total

A determinação da concentração de nitrogênio total presente no lodo em estudo foi realizada pelo Instituto Agrônomo de Campinas - IAC. O resultado obtido para a amostra de lodo bruto foi de 26 g/kg de lodo e os dados obtidos para o lodo seco estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Concentração de nitrogênio total no lodo seco, em duplicata (g/kg de lodo).

Condição	Amostras dos ensaios	Band. 1	Band. 2	Condição	Amostras dos ensaios	Band. 1	Band. 2
T=110 Q=0,4	1	25,7	24,5	T=140 Q=0,3	11	25,8	24,7
	2*	26,0	28,8		12*	25,6	25,2
T=110 Q=0,3	3	26,3	24,8	T=80 Q=0,3	13	23,7	23,8
	4*	25,0	24,7		14*	23,7	24,0
T=140 Q=0,4	5	26,4	24,9	T=80 Q=0,2	15	25,2	24,2
	6*	26,0	26,1		16*	24,8	23,9
T=140 Q=0,2	7	25,4	23,5	T=110 Q=0,2	17	25,2	24,4
	8*	24,3	25,6		18*	25,3	24,5
T=80 Q=0,4	9	25,9	25,8				
	10*	25,4	24,7				

* duplicata

A secagem também não alterou significativamente os valores de nitrogênio no lodo seco se comparado ao lodo bruto, pois, o desvio máximo encontrado para a bandeja 1 foi de 1,6, ou seja, uma diferença de 8,8%, e para a bandeja 2 foi de 2,0, ou seja, uma diferença de 10,8%, ambos em relação à quantidade inicial de nitrogênio; e o desvio padrão das amostras foi de 0,8 para a bandeja 1 e 1,2 para a bandeja 2.

Este resultado pode ser associado à quantidade de compostos nitrogenados presentes no lodo. Os efluentes das ETEs podem conter compostos orgânicos nitrogenados e nitrogênio inorgânico, principalmente na forma de amônia ionizada, que é na ordem de 25 – 30 mg/L (GERARDI, 2006). Ainda, Gerardi (2002) mostrou que a quantidade relativa de amônia ou íons amônio em águas residuárias é determinada pelo pH do efluente. Com o decréscimo de pH, íons amônio são favorecidos, e o acréscimo, amônia é favorecida, e, para valores de $\text{pH} \geq 9,4$, a amônia é fortemente favorecida.

Como os valores de pH deste trabalho foram de aproximadamente 6,5, pode-se inferir que a quantidade de nitrogênio presente no lodo em estudo esteja na forma de compostos orgânicos nitrogenados, íons amônio, nitrito e nitrato. Pois, caso estivesse presente amônia gasosa, durante a secagem, esta seria liberada reduzindo significativamente o nitrogênio total. Portanto, essa pequena diferença pode ser atribuída ao desprendimento de uma pequena porção de amônia, ou até mesmo a erros experimentais. Assim, pode-se considerar que a temperatura não teve efeito sobre a concentração destes compostos.

A Figura 4.2 mostra a comparação da concentração de nitrogênio presente no lodo bruto e do lodo seco proveniente das duas bandejas, onde a linha contínua corresponde a concentração inicial no lodo bruto e as tracejadas indicam desvios de $\pm 10\%$ das concentrações presentes no material seco em relação a concentração no lodo bruto.

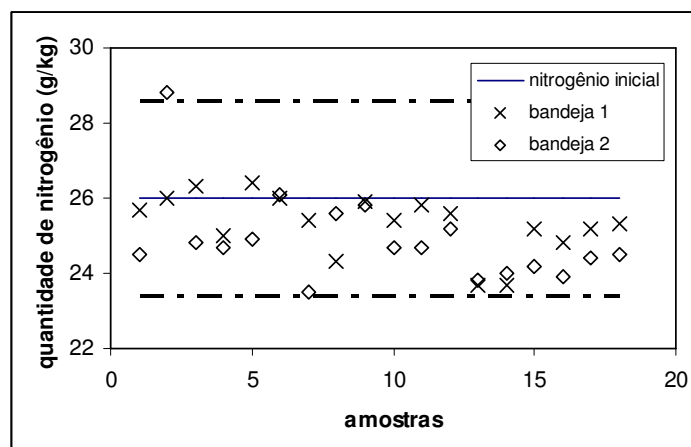


Figura 4.2: Comparação dos resultados da quantidade de nitrogênio do lodo bruto e seco.

4.1.5. Carbono Orgânico Total – COT

Como no item 4.1.4, a determinação de COT também foi realizada no IAC, adotando a metodologia apresentada no trabalho de Andrade *et al.*, 2006. A quantidade de COT encontrado no lodo bruto foi de 358 g de C/kg de lodo.

A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos para a análise de COT, após a secagem. Verifica-se, que assim como para o nitrogênio, a temperatura também não influenciou significativamente. Provavelmente não ocorreu oxidação térmica da matéria orgânica.

Na Figura 4.3 comparam-se os resultados das amostras secas com relação à quantidade de COT do lodo bruto (“in natura”). Verifica-se que os resultados das amostras secas estão distribuídas em torno de um erro de $\pm 10\%$ (linhas tracejadas). Dois pontos com erros bem superiores ao limite (10%), pode ser atribuído a erro experimental enquanto os demais podem estar relacionados à quantidade de umidade final das amostras, visto que as mesmas permaneceram mais tempo estocadas sob congelamento, pois este foi o último parâmetro físico-químico a ser analisado.

Tabela 4.5: Resultado das análises de COT das amostras de lodo tratado termicamente, em duplicata (em g de C/kg de lodo).

Condição	Amostras dos ensaios	Band. 1	Band. 2	Condição	Amostra dos ensaios	Band. 1	Band. 2
T=110 Q=0,4	1	325	351	T=140 Q=0,3	11	376	355
	2	383	357		12	312	388
T=110 Q=0,3	3	366	379	T=80 Q=0,3	13	368	371
	4	367	378		14	331	314
T=140 Q=0,4	5	381	377	T=80 Q=0,2	15	349	259
	6	418	331		16	338	345
T=140 Q=0,2	7	340	342	T=110 Q=0,2	17	356	368
	8	395	353		18	377	380
T=80 Q=0,4	9	329	360				
	10	357	344				

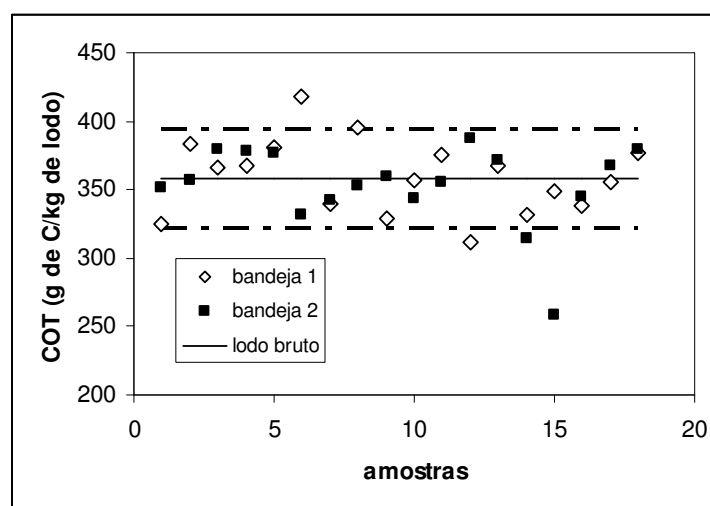


Figura 4.3: Comparação dos resultados das amostras com relação à quantidade de COT do lodo bruto (“in natura”).

4.2. Ensaios de Secagem

Os ensaios de secagem seguiram o planejamento experimental Fatorial 3^2 em duplicata e a ordem dos experimentos, conforme Tabela 3.2, apresentada no item 3.2.2. As curvas de cinéticas e de taxas de secagem relativas às condições de mínimo, médio e máximo do processo, estão apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5 para temperatura de 80°C e vazão de 0,2 kg.min⁻¹, nas Figuras 4.6 e 4.7 para temperatura de 110°C e vazão de 0,3 kg.min⁻¹ e nas Figuras 4.8 e 4.9 para temperatura de 140°C e vazão de 0,4 kg.min⁻¹. As demais condições encontram-se no Apêndice C.

Para a maioria dos ensaios, foi observado que tanto as curvas das cinéticas como as taxas de secagem referentes às duplicatas tanto da bandeja 1 quanto da bandeja 2 se sobrepuseram ou apresentaram comportamento bem próximo, convalidando os dados experimentais.

Em todos os ensaios foram verificados através das curvas de taxa de secagem, que houve um período inicial de aquecimento do material (segmento A-B das Figuras 2.5 e 2.6 (STRUMILLO & KUDRA, 1986)), pois, o lodo de esgoto foi armazenado sob refrigeração em aproximadamente 7°C. Este período se iniciava quando o material encontrava-se a 2,44 g/g (b.s.) e se estendia até se atingir um conteúdo de umidade de aproximadamente 2,35 g/g (b.s.). Esta condição ocorria em um tempo muito curto, inviabilizando a sua verificação nas curvas de secagem. A ocorrência desse período foi observada nas curvas de taxa de secagem. Em seguida, inicia-se o período à taxa constante, que também era relativamente curto quando comparado às taxas decrescentes, passando então ao 1.º período de taxa decrescente, seguido pelo 2.º período que é característico destes materiais.

Na 1.ª fase decrescente, entre uma pesagem e outra, observava-se visualmente que a torta começava a apresentar uma fissura ou até mesmo uma quebra. Estas condições foram verificadas posteriormente serem coincidentes com o momento em que se iniciava o 2.º período de taxa decrescente, pois, a taxa de secagem neste ponto apresentava um pequeno aumento até voltar a decrescer até o final do processo.

Este fenômeno de quebra ou fissura da torta foram observados por Foust *et al.* (1982) e Strumillo & Kudra (1986), os quais afirmaram que em virtude da água presente

fazer parte da estrutura do sólido, 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 decrescer, 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.

Deste modo, a quebra ou fissura da torta, verificada visualmente em um determinado tempo e também observada pelo término da 1.^a taxa decrescente, promoveu um aumento da taxa de secagem, influenciando o processo, ao ponto de as taxas para ambas as bandejas apresentarem valores semelhantes, como pode ser visto na Figura 4.5, mesmo tendo uma diferença significativa do conteúdo de umidade.

Nas legendas das Figuras 4.4 a 4.9 e as constantes no Apêndice C que correspondem ao estudo da secagem, band. 1 representa a bandeja 1 do sistema de secagem, band. 2 representa a bandeja 2, enquanto, 1/18, representa o 1º ensaio dentre os 18 experimentos, e assim sucessivamente.

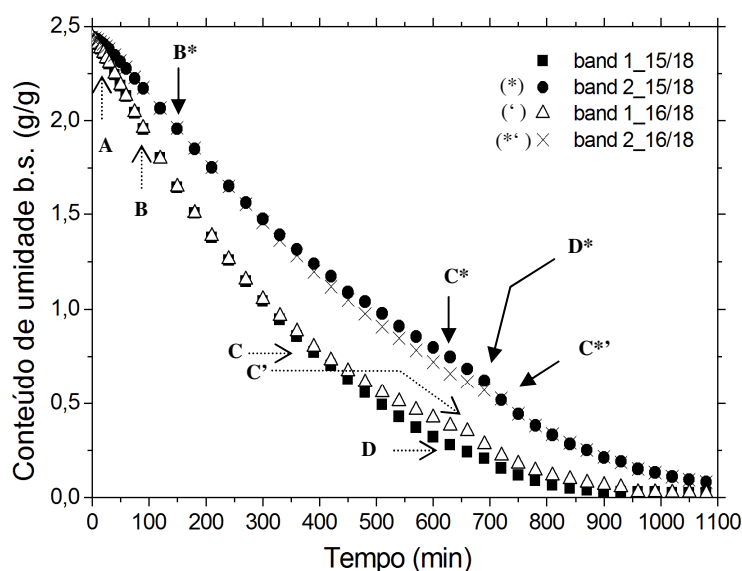


Figura 4.4: Cinética de secagem relativa aos ensaios 15 e 16 ($T=80^{\circ}\text{C}$; $Q=0,2 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$). Onde: A, início da taxa constante; B, início da 1.^a taxa decrescente; e C, início da 2.^a taxa decrescente.

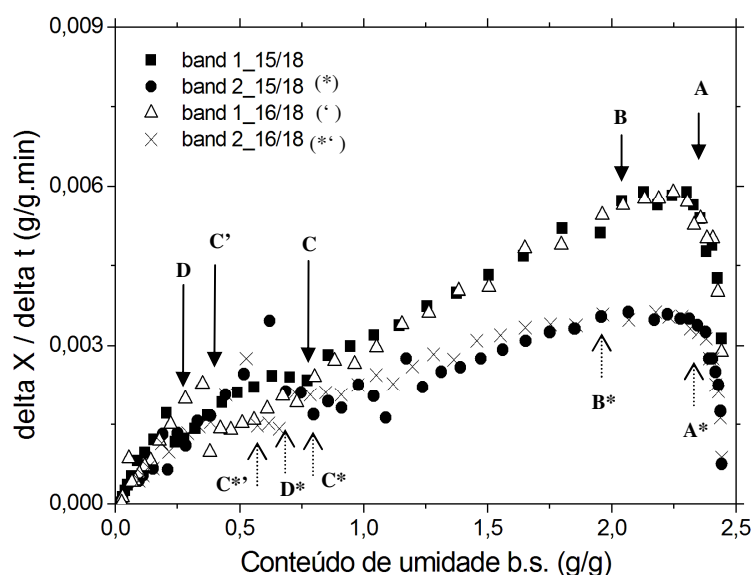


Figura 4.5: Taxa de secagem relativa aos ensaios 15 e 16 ($T=80^{\circ}\text{C}$; $Q=0,2 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

Onde: A, início da taxa constante; B, início da 1.^a taxa decrescente; e C, início da 2.^a taxa decrescente.

O tempo de secagem do lodo na condição mínima de processo foi o mais longo comparado com as demais condições de processo. O período inicial de aquecimento do material para ambas as bandejas para atingir o valor de $2,35 \text{ g/g}$ (b.s.), ocorreu em um tempo de secagem entre 20 – 25 min, indicados pelas setas A nas curvas de cinética e de taxa de secagem. Para a bandeja 1, no experimento band 1_15/18, o período de taxa constante transcorreu até os 90 min, indicado pela seta B na curva de cinética de secagem, iniciando a 1.^a taxa decrescente após este tempo. A 2.^a taxa decrescente iniciou-se à um conteúdo de umidade em torno de $0,75 \text{ g/g}$ (b.s.) e o tempo de secagem para a obtenção deste teor de umidade é de 360 min, indicados pelas setas C nas curvas de taxa e de cinética de secagem, observando neste tempo pequenas fissuras na torta. Foi verificado, após transcorridos 630 min do processo de secagem que houve um novo aumento da taxa de secagem, indicado pela seta D das respectivas Figuras 4.4 e 4.5. Este aumento da taxa ocorreu pela quebra da torta, pois, como a secagem à temperatura de 80°C foi a mais branda, tanto a difusão quanto o gradiente de temperatura interna da torta foram menores que as demais secagens. Nesta condição, foi observado experimentalmente que a torta sofreu um maior enrijecimento superficial, dificultando a secagem, além disso, durante a

etapa de pesagem e retorno da bandeja ao sistema ocorreu uma nova quebra do material durante a recolocação do termopar 4 no interior da torta. Para o experimento band 1_16/18 (duplicata), as mesmas características iniciais foram observadas, iniciando o 2.º período de taxa decrescente após 660 min do processo de secagem, à um conteúdo de umidade em torno de 0,37 g/g (b.s.), indicados pelas setas C' das curvas de cinética e de taxa de secagem, e houve apenas uma quebra da torta.

Para a bandeja 2, observa-se que a taxa de secagem foi bem menor, pois esta recebe o ar que atravessa a bandeja 1, alterando as características iniciais da vazão de ar, em decorrência de efeitos fluidodinâmicos e de secagem, como o aumento da umidade relativa do ar, diminuição da temperatura, perda de carga ocasionada pela passagem nos anéis tronco-cônicos, entre outros. Porém, características semelhantes foram observadas. Para o experimento band 2_15/18 a taxa constante ocorreu até os 150 min, indicado pela seta B* da Figura 4.4, e verificado a mudança a uma taxa de secagem de 1,96 g/g (b.s.), indicado pela seta B* da Figura 4.5, iniciando após este tempo o 1.º período de taxa decrescente. A 2.ª taxa decrescente iniciou-se a um conteúdo de umidade de aproximadamente 0,8 g/g (b.s.), indicado pela seta C* da Figura 4.5, a aproximadamente 630 min de secagem, na Figura 4.4. Também devido ao endurecimento superficial, ocorreu a quebra adicional da torta com o encaixe do termopar 5, aumentando novamente a taxa de secagem em um tempo de 690 min, indicado pela seta D* da Figura 4.5. Para o experimento band 2_16/18 o 2.º período de taxa de secagem iniciou-se à uma taxa de secagem de 0,62 g/g (b.s.) com um tempo em torno de 720 min, e como a duplicata da bandeja 1 (experimento band 1_16/18) ocorreu apenas uma quebra da torta.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram a secagem na condição média do processo, e observa-se que a mudança da 1.ª taxa decrescente para a 2.ª é bem mais suave. Isto provavelmente ocorreu porque não houve uma quebra acentuada da torta e sim a formação de fissuras e canais no seio da torta, observado visualmente, o que permitiu um melhor escoamento do ar de forma direcionada através da torta.

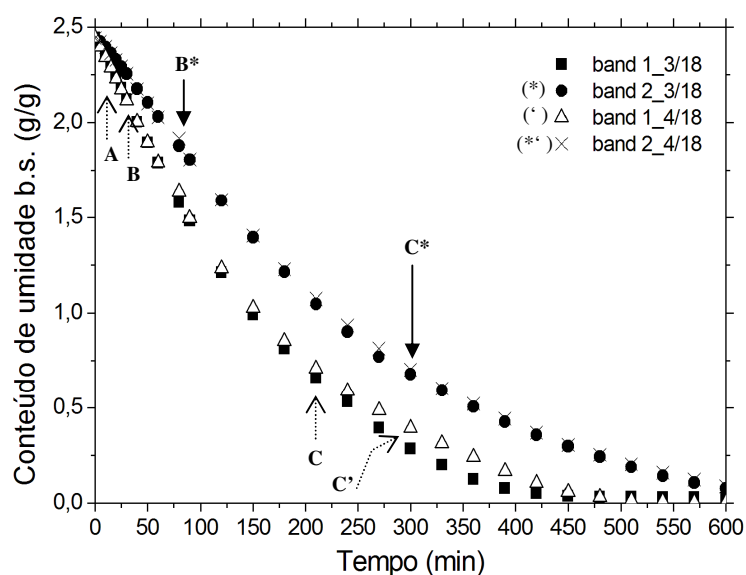


Figura 4.6: Cinética de secagem relativa aos ensaios 3 e 4 ($T = 110^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,3 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$). Onde: A, início da taxa constante; B, início da 1.^a taxa decrescente; e C, início da 2.^a taxa decrescente.

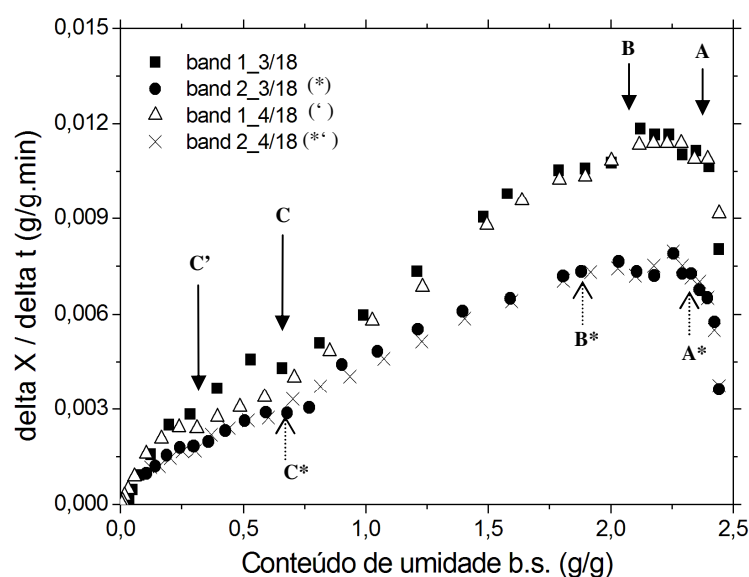


Figura 4.7: Taxa de secagem relativa aos ensaios 3 e 4 ($T = 110^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,3 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$).

Onde: A, início da taxa constante; B, início da 1.^a taxa decrescente; e C, início da 2.^a taxa decrescente.

Assim como as demais condições, para as Figuras 4.6 e 4.7, o período inicial de aquecimento do material encerrou-se em um conteúdo de umidade de $2,35 \text{ g/g}$ (b.s.),

indicado pelas setas A e A* das respectivas figuras, o que indicou um início de processo em torno de 10 – 15 min, indicado pela seta A na Figura 4.6, ou seja, um período mais curto se comparado à secagem nas condições mínimas de processo. Para a bandeja 1, em ambos experimentos, a taxa constante ocorreu até os 40 min, iniciando a 1.^a fase decrescente, indicado pela seta B na Figura 4.6, com a taxa de secagem em torno de 2,10 g/g (b.s.), na Figura 4.7. O experimento band 1_3/18, iniciou o 2.^o período decrescente à uma taxa de secagem de 0,66 g/g (b.s.), indicado pela seta C da Figura 4.7, com um tempo de secagem de 210 min, na Figura 4.6. Para a sua duplicata (experimento band 1_4/18), o 2.^o período de taxa decrescente iniciou à uma taxa de 0,31 g/g (b.s.), indicado pela seta C' da Figura 4.7, em um tempo de 300 min, indicado pela seta C' da Figura 4.6. Esta diferença foi decorrente do tempo de quebra/fissura da torta, pois a duplicata levou um tempo maior para que isso ocorresse, provavelmente provocado por alguma alteração no empacotamento da torta na bandeja. Para a bandeja 2, em ambos experimentos, o período de taxa constante ocorreu até os 90 min de secagem com uma taxa de 1,85 g/g (b.s.), indicados pelas setas B* das Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente, e o 2.^o período de taxa decrescente iniciou-se em torno de 300 min, a uma taxa de 0,7 g/g (b.s.).

Características semelhantes às Figuras 4.4 a 4.7 foram observadas para a condição máxima de processo, conforme as Figuras 4.8 e 4.9, porém, devido a maior temperatura e vazão, houve um aumento significativo da taxa de secagem, e com isso foi necessário um menor tempo de secagem para a obtenção da massa final na condição desejada.

Para ambas as bandejas o período inicial se desenvolveu também até um conteúdo de umidade de 2,35 g/g (b.s.) indicado pela seta A na Figura 4.9, que corresponde um tempo de aproximadamente 10 min, na Figura 4.8. Para a bandeja 1, em ambos experimentos, a taxa constante ocorreu até a taxa de secagem de aproximadamente 2,0 g/g (b.s.) indicado pela seta B na Figura 4.9, com um tempo de processo de secagem em torno de 30 min, na Figura 4.8, iniciando o 1.^o período de taxa decrescente. Após os 150 min, indicado pela seta C na Figura 4.8, iniciou-se o 2.^o período de taxa decrescente com uma taxa na ordem de 0,6 g/g (b.s.), indicado pela seta C na Figura 4.9, e após este período foi observada a presença de pequenas fissuras na torta enquanto a torta da bandeja 2 apresentava-se fortemente quebrada permitindo um maior contato do material com o ar de secagem. Esses dois comportamentos distintos, podem ter contribuído para as taxas de

secagem de ambas as bandejas serem equivalentes, como pode ser verificado pelas setas C e C* na Figura 4.9. Para a bandeja 2, em ambos experimentos, a taxa constante ocorreu até os 50 min, indicado pela seta B* na Figura 4.8 com uma taxa de secagem de 1,8 g/g (b.s.), na Figura 4.9, iniciando após este a 1.^a taxa decrescente. Após os 150 min de processo de secagem, indicado pela seta C* na Figura 4.8, iniciou-se o 2.^o período decrescente com uma taxa de 0,75 g/g (b.s.), e também foi observado visualmente a quebra total da torta, aumentando consideravelmente a taxa de secagem.

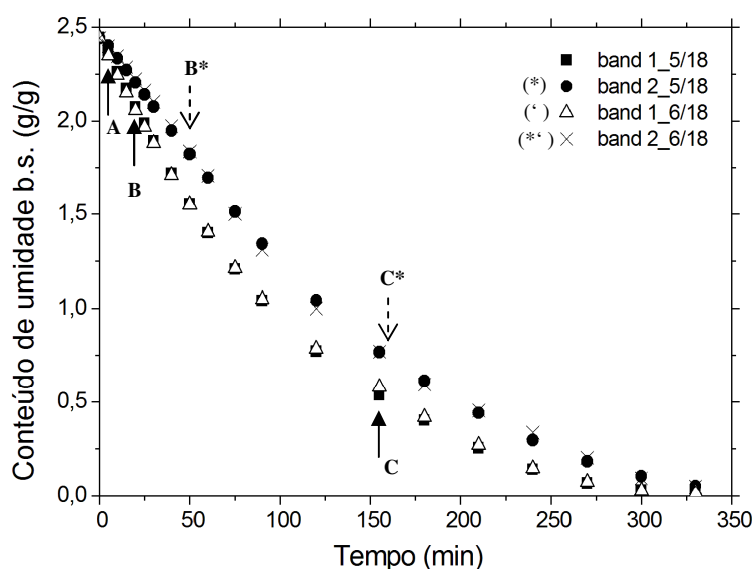


Figura 4.8: Cinética de secagem relativa aos ensaios 5 e 6 ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q=0,4\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$). Onde: A, início da taxa constante; B, início da 1.^a taxa decrescente; e C, início da 2.^a taxa decrescente.

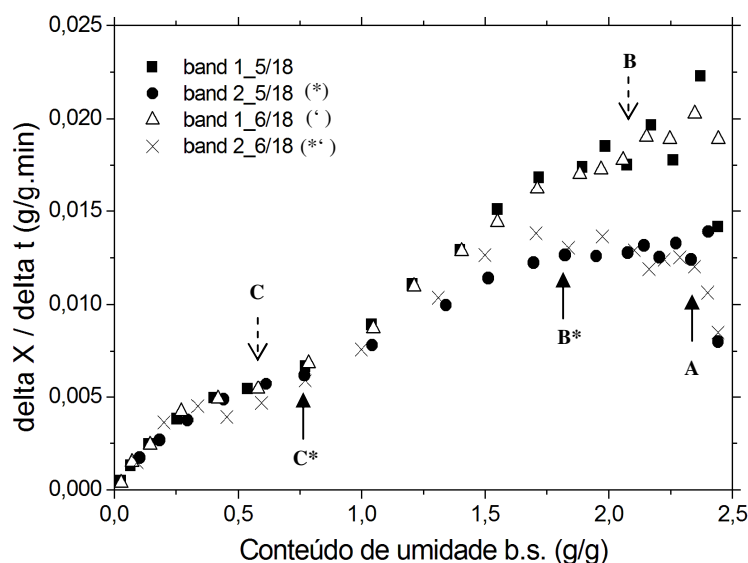


Figura 4.9: Taxa de secagem relativa aos ensaios 5 e 6 ($T=140^{\circ}\text{C}$; $Q=0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

Onde: A, início da taxa constante; B, início da 1.^a taxa decrescente; e C, início da 2.^a taxa decrescente.

Os resultados obtidos são similares aos apresentados para a maioria dos sólidos orgânicos que ou é amorfa, ou fibrosa ou gelatinosa. Estes materiais retêm a umidade como parte integral da estrutura do sólido, ou então a retém no interior de fibras ou de poros delgados internos, com isso, o movimento da umidade é lento e provavelmente ocorre pela difusão do líquido através da estrutura do sólido (FOUST *et al.*, 1982; STRUMILLO & KUDRA, 1986). Os autores ainda verificaram que as curvas de secagem destas substâncias mostram períodos de taxa constante muito curtos, e pelas mesmas razões, o primeiro período a taxa decrescente é muito reduzido, e a maior parte do processo de secagem é controlada pela difusão do líquido, ou seja, a velocidade de secagem é controlada pela velocidade de difusão do líquido através dos sólidos, sendo a maior parte da secagem ocorrida no segundo período a taxa decrescente.

Neste trabalho, observa-se um comportamento similar, porém, pela condição proposta para o fim da secagem, que era a obtenção de um biossólido entre 92 – 95% de sólidos na bandeja 2, a 1.^a taxa decrescente ocorreu em um maior tempo, e o início da 2.^a taxa decrescente está relacionado diretamente com a quebra ou fissura da torta, que ocorria com o lodo já parcialmente seco. Portanto, o efeito do enrijecimento superficial do material

parcialmente seco que acabava inibindo o processo de secagem no interior do sólido era reduzido, o que provocava, com este fenômeno, a abertura de áreas úmidas recebendo diretamente o ar de secagem.

No processo de secagem do lodo de esgoto deste trabalho, todas as características da cinética de secagem e da taxa de secagem foram comprovadas, conforme literatura (CHUN & LEE, 2004; TSANG & VESILIND, 1990; LOWE, 1995), em especial a ocorrência da quebra ou fissuras da torta, que aumenta a transferência de calor e massa no processo de secagem.

Outro fenômeno importante observado durante o processo de secagem do lodo foi o encolhimento da torta em todas as condições estudadas. A primeira observação visual da redução de volume foi verificada no sentido radial, ou seja, a diminuição do diâmetro da torta, pois, a configuração do secador promove a passagem de ar pelo fundo e pela lateral da bandeja (através do fluxo de ar pelos anéis tronco-cônicos). O encolhimento da espessura da torta também ocorre, porém, não é tão pronunciado quanto a redução do diâmetro. Após a quebra ou fissura da torta observa-se maior encolhimento da espessura, alterando todas as características do encolhimento do material, transformando em uma massa não uniforme. A verificação da redução de volume ocasionada com a secagem térmica é apresentada no item 4.4 deste trabalho.

4.3. Análise estatística do Planejamento Fatorial 3²

A partir do planejamento proposto para o estudo da secagem, foi definido o tempo para a obtenção da massa final entre 92 – 95% de sólidos na bandeja 2, sendo o tempo de secagem a variável de resposta, para a verificação da influência das variáveis independentes bem como a da sua interação sob o processo de secagem proposto. A Tabela 4.6 apresenta o tempo de secagem de cada experimento para obtenção de massa final de sólidos nesta faixa.

Verifica-se pela Tabela 4.6 que a bandeja 1 necessitou de um tempo de secagem bem menor que o da bandeja 2. Este fato deve-se à posição destas bandejas, pois a primeira recebe diretamente todo o ar de secagem, enquanto na segunda, o ar passa pelos segmentos

tronco-cônicos e através do lodo da bandeja 1, fazendo com que o ar de secagem encontre-se à uma temperatura menor e com maior umidade relativa, provocando alterações significativas na secagem da bandeja 2, reduzindo com isso o potencial de secagem nesta bandeja em relação a primeira.

Tabela 4.6: Tempo de secagem de sólidos nas bandejas 1 e 2 (em minutos).

Temp. (°C)	Vazão (kg.min ⁻¹)					
	0,2		0,3		0,4	
	Bandejas					
	1	2	1	2	1	2
80	810	1080	840	900	660	780
	870	1080	750	900	690	720
110	510	690	390	600	420	540
	510	600	450	600	360	510
140	420	600	270	330	270	330
	390	570	300	360	270	330

A partir dos dados da Tabela 4.6 e com o auxílio da ferramenta computacional *STATISTICA 5.0* foi desenvolvido o estudo estatístico do Planejamento Fatorial 3² em duplicata, para uma confiabilidade de 95%, no qual foi verificado o grau de influência das variáveis individuais temperatura (T) e vazão do ar de secagem (Q) e sua interação (TxQ) sobre a resposta tempo de secagem. Os resultados obtidos foram expressos por diagramas de Pareto, conforme a Figura 4.10 para a bandeja 1 e Figura 4.11 para a bandeja 2.

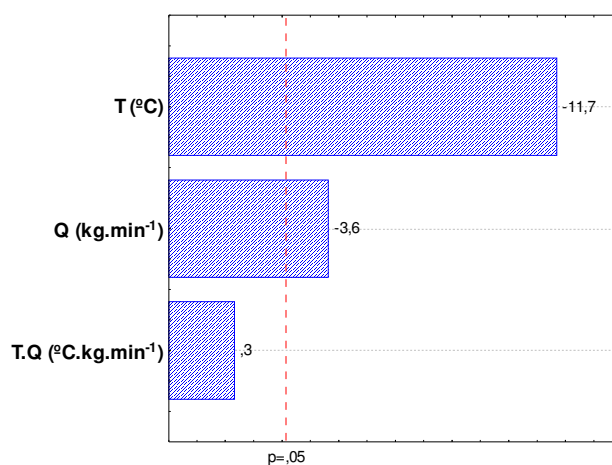


Figura 4.10: Diagrama de Pareto para a secagem na bandeja 1 (T – temperatura; Q – vazão; TxQ – interação entre os fatores).

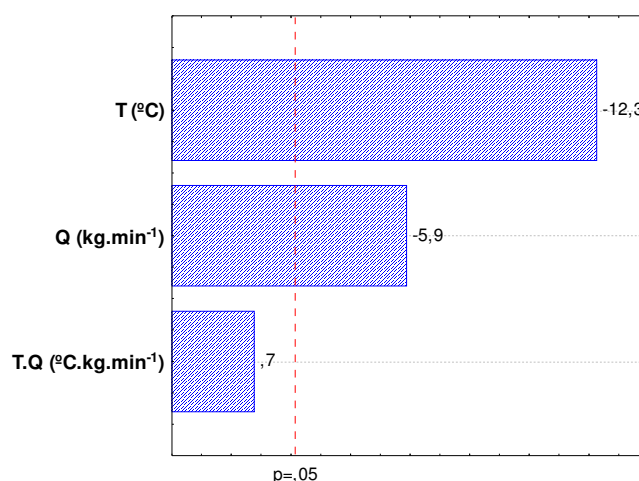


Figura 4.11: Diagrama de Pareto para a secagem na bandeja 2 (T – temperatura; Q – vazão; TxQ – interação entre os fatores).

Pelas Figuras 4.10 e 4.11, pode-se afirmar para ambas as bandejas, que T é a variável de maior influência, com uma menor influência da variável Q, ou seja, a variável temperatura é mais significativa, seguido pela menor influência da vazão, sendo este efeito mais significativo para a bandeja 2.

Os valores negativos para os fatores T e Q indicam que na mudança do nível mínimo para o nível máximo das variáveis temperatura e vazão de ar, a variável resposta, ou seja, o tempo de secagem, decresce com o aumento da temperatura e da vazão. Sendo assim, quanto maior a temperatura e a vazão, menor será o tempo para a obtenção de biossólido entre 92 – 95% de sólidos para a secagem de lodo de esgoto primário no secador convectivo direto de fluxo ascendente. Este comportamento era esperado uma vez que o mecanismo de secagem de lodo de esgoto é predominantemente difusivo.

Observa-se também que a interação entre as variáveis T e Q não é significativa. Contudo, sendo o secador deste estudo do tipo convectivo direto de fluxo ascendente era esperado que a interação fosse significativa devido aos fortes efeitos fluidodinâmicos ocasionados pelo projeto do secador.

Carvalho & Silva (2006) utilizando equipamento similar para secagem de resíduos hospitalares, verificaram também que a interação entre as variáveis de processo temperatura e vazão do ar de secagem não influenciaram significativamente, porém, a predominância de uma ou de outra variável ocorreu em função do mecanismo de secagem controlador de processo.

Dos resultados obtidos verifica-se que a melhor condição é representada pela vazão do ar de secagem à 0,4 kg/min e temperatura de 140°C, ou seja, nos pontos máximos de processo, comprovado pelas superfícies de resposta do respectivo planejamento proposto, mostrados nas Figuras 4.12 e 4.13.

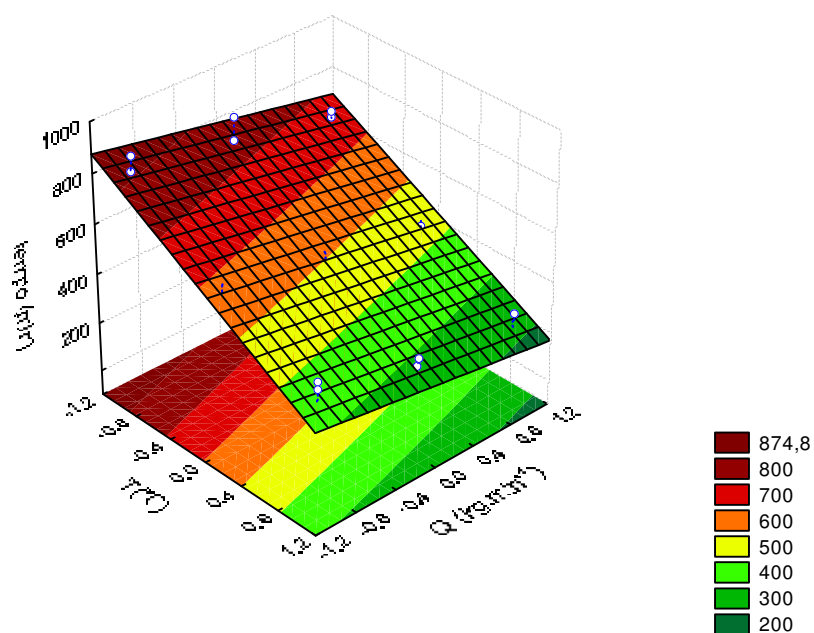


Figura 4.12: Superfície de resposta do Planejamento Fatorial 3^2 - secagem na bandeja 1 (T – temperatura; Q – vazão; tempo – tempo de secagem).

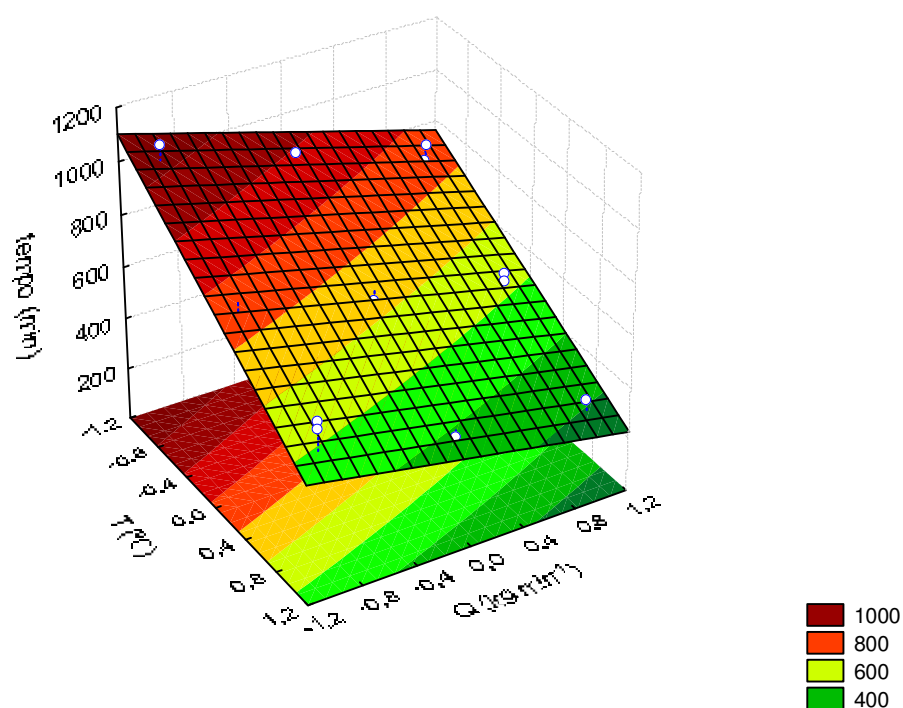


Figura 4.13: Superfície de resposta do Planejamento Fatorial 3^2 - secagem na bandeja 2 (T – temperatura; Q – vazão; tempo – tempo de secagem).

4.4. Verificação da redução de volume

Para a verificação da redução de volume a partir do processo de secagem, foi realizado um novo ensaio com as condições ótimas de processo (temperatura de 140°C e vazão de ar de 0,4 kg.min⁻¹).

O lodo bruto encontrava-se com uma umidade inicial de 72,53 % (base úmida). Foi escolhido o lodo da primeira bandeja, pois, o mesmo atingiu uma umidade final de 4,2 % (base úmida), ou seja, 95,8 % de sólidos.

A Tabela 4.7 mostra os dados utilizados na Equação 2.2 para a determinação da razão (V/V_0), relativa à redução do volume, cujo resultado foi de aproximadamente 50% de redução.

Tabela 4.7: Redução do volume (V/V_0).

ρ_0 (g/L)	ρ (g/L)	X (g/g)	X_0 (g/g)	V/V_0
39,433	22,197	0,044	2,640	0,51

Onde: ρ_0 = massa específica do lodo bruto; ρ = massa específica do lodo seco; X = conteúdo de umidade final (em base seca); e X_0 = conteúdo de umidade inicial (em base seca).

Ruiz *et al.* (2007) verificaram a cinética de encolhimento de lodo biológico de três diferentes ETEs. Estes lodos foram coletados após o estágio de desaguamento mecânico, após o processo de digestão aeróbia e anaeróbia. Os lodos se diferenciaram na quantidade de sólidos totais iniciais, bem como na quantidade de matéria orgânica, representada pela porcentagem de sólidos voláteis, determinando a razão SV/ST, onde SV são os sólidos voláteis, e ST são os sólidos totais secos. O primeiro lodo foi caracterizado contendo 23% de sólidos totais com uma razão SV/ST de 0,53; o segundo lodo obteve 15% de sólidos totais e uma razão SV/ST de 0,67; e o terceiro com uma porcentagem de 13% de sólidos totais com uma razão SV/ST de 0,75. Para ambos os lodos a cinética de secagem foi

praticamente a mesma, ainda que com um conteúdo de umidade diferentes, visto que os autores trabalham diretamente com a redução do conteúdo de água em porcentagem, porém, o encolhimento teve uma pequena variação. No final do processo de secagem, no conteúdo de umidade de equilíbrio, o primeiro lodo teve uma redução de aproximadamente 0,75. E, para o segundo e o terceiro lodo, foram praticamente iguais, obtendo uma redução de aproximadamente 0,85, e com isso, os autores determinaram por meio destes resultados que quanto maior a quantidade de material orgânico, maior é o encolhimento.

Wang & Brennan (1995) verificaram que a redução do volume após a secagem é diretamente proporcional ao conteúdo de umidade inicial da amostra, o que também pode ser comprovado pelo trabalho de Ruiz *et al.* (2007), uma vez que as umidades iniciais também eram diferentes.

Neste trabalho, a redução de volume do lodo de esgoto foi satisfatória, pois, a umidade inicial do lodo foi de 72,53%, ou seja, uma quantidade de sólidos iniciais de 27,5%, maior que a quantidade inicial de sólidos dos lodos estudados por Ruiz *et al.* (2007), e consequentemente um conteúdo de umidade menor, o que determinou uma menor redução de volume se comparado aos três lodos biológicos, uma vez que a redução é diretamente proporcional ao teor de umidade das amostras inicial e final.

4.5. Modelos Matemáticos

Os dados de secagem dos dezoito ensaios realizados, conforme mostrados na Tabela 4.6, foram ajustados e analisados com base nos critérios estatísticos: Coeficiente de determinação (R^2), Análise de resíduo e gráfico 2D.

Para o ajuste dos modelos foi usado o método dos mínimos quadrados com base na regressão específica que realiza a estimativa não linear, tendo como parâmetros o método de estimação de Quase-Newton, critério de convergência 10^{-6} e número máximo de interações igual a 50.

O primeiro ajuste foi desenvolvido para a Lei de Fick, truncado no terceiro termo, porém, o mesmo não conseguiu prever o processo de secagem estudado. Este resultado

era esperado, uma vez que a referida Lei de Fick assume a difusividade efetiva constante ou em função da concentração, umidade inicial uniforme e durante a secagem predominantemente unidirecional e geometria simples e constantes ao longo do processo, desprezando o encolhimento do material durante a secagem e a resistência externa ao transporte de massa. Desta forma, devido a falta de ajuste deste modelo aos dados experimentais, não foi possível a determinação da difusividade efetiva.

As Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam a porcentagem de modelos ajustados para as bandejas 1 e 2, respectivamente. Esta porcentagem significa o quanto, do total de ensaios, cada modelo pode ser ajustado aos dados de cinética de secagem de lodo para cada fase não linear, independente das condições operacionais dentro da faixa estudada para os fatores de temperatura e vazão. Como critério particular deste trabalho, os valores acima de 70% de ajuste foram considerados satisfatórios. Esta resposta é muito importante para projeto de secadores, pois permite a operação dos mesmos em várias condições entre as faixas limites dos fatores.

Tabela 4.8: Porcentagem de modelos ajustados para a bandeja 1.

Modelo	1.^a fase decrescente (%)	2.^a fase decrescente (%)
Lewis (1921)	0,00	0,00
Hederson & Pabis (1961)	61,11	22,22
Page (1949)	11,11	5,56
Overhults (1973)	0,00	5,56
Page modificado 2	61,11	33,33
Henderson (1974)	66,67	38,89
Midilli et al. (2002)	72,22	22,22
Thompson et al. (1968)	0,00	0,00
Wang & Sing (1978)	0,00	16,67
Logarítmico	100,00	88,89
Polinomial	100,00	72,22

Para a bandeja 1, a 1.^a fase à taxa decrescente teve 72,22% de ajuste das curvas de cinética realizadas pelo modelo semi-empírico de Midilli *et al.* (2002). Enquanto, para a 2.^a fase à taxa decrescente, os modelos semi-empíricos não obtiveram resultados satisfatórios.

Porém, os modelos empíricos Logarítmico e Polinomial apresentaram percentagem de ajuste a cima de 70% para ambas as etapas não lineares.

Tabela 4.9: Porcentagem de modelos ajustados para a bandeja 2.

Modelo	1.^a fase decrescente (%)	2.^a fase decrescente (%)
Lewis (1921)	5,56	0,00
Hederson & Pabis (1961)	72,22	44,44
Page (1949)	5,56	0,00
Overhults (1973)	0,00	0,00
Page modificado 2	61,11	50,00
Henderson (1974)	66,67	50,00
Midilli <i>et al.</i> (2002)	50,00	22,22
Thompson et al. (1968)	11,11	0,00
Wang & Sing (1978)	11,11	0,00
Logarítmico	94,44	72,22
Polinomial	100,00	50,00

Para a bandeja 2, apenas o modelo semi-empírico de Henderson & Pabis (1961), além dos modelos empíricos logarítmico e polinomial, ajustaram acima de 70% as curvas de cinética para a 1.^a fase decrescente. Para a 2.^a fase decrescente, apenas o modelo empírico logarítmico obteve ajuste satisfatório acima de 70%.

De acordo com o resultado da análise estatística do Planejamento Fatorial 3², a secagem do lodo é predominantemente difusiva, porém, sendo o secador convectivo direto, outros efeitos fluidodinâmicos podem também influenciar a secagem.

Henderson e Pabis (1961) observaram que o parâmetro k , em seu modelo, é influenciado positivamente pelos fatores temperatura e vazão de ar individualmente e por interação destes. Vieira (2006), utilizando este modelo para predizer a secagem convectiva de papel, verificou estes efeitos e comprovou o mesmo comportamento, onde o parâmetro k é influenciado pelos efeitos combinados e individuais da temperatura e da velocidade do ar, com a velocidade do ar apresentando um efeito mais pronunciado.

Assim, também verificou-se neste trabalho a influência das variáveis do processo sobre os parâmetros k e a da Equação 2.8. A Tabela 4.10 apresenta o ajuste dos parâmetros junto aos dados codificados das variáveis do processo.

Tabela 4.10: Ajuste dos parâmetros do modelo de Henderson e Pabis (1961) (variáveis do processo codificadas) para a bandeja 2.

Codificação dos dados		Parametros	
T	Q	k	a
-1	-1	0,000568	2,642451
0	-1	0,004667	2,777581
1	-1	0,00857	2,869805
-1	0	0,004578	2,716534
0	0	0,003499	2,572403
1	0	0,007253	2,947871
-1	1	0,002683	2,605927
0	1	0,001988	2,654997
1	1	0,003512	2,801661
-1	-1	0,005784	2,990001
0	-1	0,004441	2,71505
1	-1	0,00807	2,76293
-1	0	0,00474	2,777781
0	0	0,00328	2,527048
1	0	0,008201	2,509643
-1	1	0,003111	2,731254
0	1	0,002132	2,692883
1	1	0,003453	2,808725

Para o parâmetro k , foi verificado através do diagrama de Pareto, mostrado na Figura 4.14, que houve uma grande influência da temperatura (termo linear, efeito positivo e termo quadrático, efeito negativo), da vazão (termo linear, efeito negativo) e da interação entre os fatores (termo linear, efeito negativo), e para o parâmetro a , não houve qualquer influência das variáveis de processo. Vieira (2006), para a secagem de papel verificou um comportamento similar, porém, a vazão era a variável com efeito predominante, também verificando o efeito da interação entre os fatores.

A maior influência da temperatura para o parâmetro k , como pode ser visualizado na Figura 4.14, reforça o fato da secagem de lodo ser predominantemente difusiva.

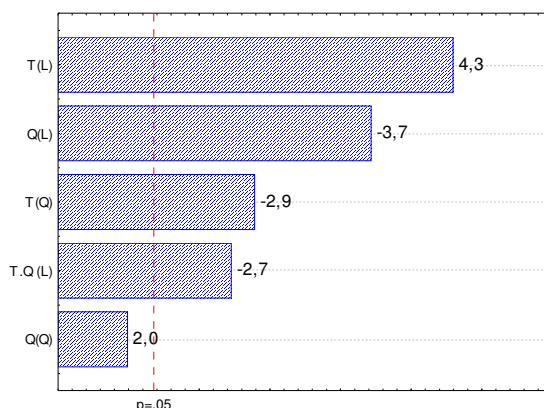


Figura 4.14: Diagrama de Pareto para o parâmetro k obtido pelo ajuste ao modelo de Henderson e Pabis (1961).

Como a bandeja 2 está acima da bandeja 1, o estado do ar de secagem após a bandeja 1 é completamente alterado, pois com a retirada de umidade da bandeja 1, aumenta-se a umidade relativa do ar, e ainda, o perfil de escoamento provavelmente torna-se randômico na passagem do ar pelos anéis tronco-cônicos, influenciando fortemente a velocidade do ar para a bandeja 2. A análise estatística do planejamento proposto, comprovou que a vazão do ar é mais influente para a bandeja 2, assim, o modelo proposto por Henderson & Pabis (1961) apresentou um melhor resultado para a bandeja 2 durante a 1.^a fase decrescente, pois o mesmo considera os efeitos de velocidade, temperatura, razão de mistura do ar, e da taxa de redução de volume durante o processo de secagem, sendo a bandeja 2 mais influenciada por estes efeitos fluidodinâmicos.

O modelo proposto por Midilli *et al.* (2002) mostrou-se adequado ao ajuste da secagem de lodos de esgoto, para a bandeja 1 durante a 1.^a fase decrescente. O próprio autor em seu trabalho comparou o ajuste deste modelo com demais encontrados em literatura, obtendo um melhor ajuste se comparado aos demais modelos. Porém, algumas observações devem ser expostas.

O pesquisador desenvolveu o modelo a partir de dados obtidos na secagem solar tanto natural quanto forçada, de cogumelo, pólen e pistache a temperatura relativamente baixa (20 a 32°C). Todos os parâmetros (a , k , n , b) são funções da temperatura, e ainda,

pela análise dos resultados, foi observado que para valores de conteúdo de umidade mais baixas, o erro aumenta.

Em relação ao resultado obtido para a secagem de lodo de esgoto, comparando também com os lodos estudados por Celma *et al.* (2007), pode-se destacar que o conteúdo de umidade de ambos os lodos são semelhantes, e a uma quantidade bem superior se comparado ao teor de umidade inicial de grãos estudados pelos diversos autores de modelos, como por exemplo no trabalho de Overhults *et al.* (1976), com a soja a 20 – 33% (b.u.). Também, no lodo de esgoto, durante a 1.^a taxa decrescente, o gradiente de temperatura, bem como a difusão são tão elevados no interior da torta que em um determinado tempo estes fatores fazem com que a torta se quebre ou forme fissuras, como confirmado pelos experimentos, porém, até que ocorra essa quebra ou fissura, tanto a redução de volume quanto o endurecimento da torta vão aumentando progressivamente. Provavelmente, até que a torta da bandeja 1 se quebre ou fissure, apenas a temperatura influencia no processo de secagem, o que seria também semelhante ao trabalho de Celma *et al.* (2007).

Portanto, é possível observar através destes resultados que para a bandeja 1 o modelo de Midilli *et al.* (2002) e para a bandeja 2 o modelo de Henderson & Pabis (1961), ambos semi-empíricos, descrevem a 1.^a fase decrescente, fundamentados na difusão. Ressalta-se ainda que Midilli *et al.* (2002) enfatiza que mais comparações são necessárias para confirmar a validação de seu modelo para aplicação geral.

Durante a 2.^a taxa decrescente, em ambas as bandejas, ocorreu um aumento da taxa de secagem, e posterior decréscimo, influenciando significativamente o processo de secagem, pois todas as condições internas do secador são alterados, como o aumento da temperatura interna da torta, uma melhor passagem do ar de secagem pela torta, entre outros, assim, os modelos semi-empíricos não conseguem descrever esta etapa do processo devido a esta mudança brusca no comportamento de secagem. Portanto, apenas os modelos empíricos puderam descrever este comportamento de secagem, devido ao comportamento similar ao de uma curva de um modelo Logarítmico.

Visando demonstrar o ajuste dos modelos às cinéticas estudadas e baseado nos critérios estatísticos adotados, as Tabelas 4.11 a 4.13 apresentam os parâmetros de ajuste

aos dados correspondentes para as condições, referentes ao valores mínimo ($80^{\circ}\text{C}/0,2 \text{ kg.min}^{-1}$), médio ($110^{\circ}\text{C}/0,3 \text{ kg.min}^{-1}$) e máximo ($140^{\circ}\text{C}/0,4 \text{ kg.min}^{-1}$) dos fatores do planejamento proposto, e seus respectivos coeficientes de determinação.

Tabela 4.11: Ajuste dos parâmetros dos melhores modelos para a condição de processo de 80°C e $0,2 \text{ kg.min}^{-1}$.

Modelo	R ²	constantes			
		a	b	k	n
Bandeja 1					
Linear	0,9986	-0,00551	2,45961		
Midilli <i>et al.</i> (2002)*	0,9979	0,06131	-0,00137	-5,82007	-0,10702
Logarítmico**	0,9999	414,14350	0,00002	0,01110	
Bandeja 2					
Linear	0,9859	-0,002890	2,458602		
Henderson & Pabis (1961)*	0,9961	2,65500		0,00199	
Logarítmico**	0,9997	3,31603	-0,00080	-0,00090	

* 1.^a fase decrescente

** 2.^a fase decrescente

Tabela 4.12: Ajuste dos parâmetros dos melhores modelos para a condição de processo de 110°C e $0,3 \text{ kg.min}^{-1}$.

Modelo	R ²	constantes			
		a	b	k	n
		Bandeja 1			
Linear	0,9994	-0,01089	2,45066		
Midilli <i>et al.</i> (2002)*	0,9996	0,04340	-0,00233	-6,63835	-0,13191
Logarítmico**	0,8233	0,604306	-0,001610	-0,002635	
Bandeja 2					
Linear	0,9981	-0,00725	2,46551		
Henderson & Pabis (1961)*	0,9988	2,77758	0,00467		
Logarítmico**	0,9826	1,31327	-0,00033	-0,000705	

* 1.^a fase decrescente

** 2.^a fase decrescente

Tabela 4.13: Ajuste dos parâmetros dos melhores modelos para a condição de processo de 140°C e 0,4 kg.min⁻¹.

Modelo	R ²	constantes			
		a	b	k	n
Bandeja 1					
Linear	0,9990	-0,01863	2,45041		
Midilli <i>et al.</i> (2002)*	0,9994	0,18684	-0,00652	-3,37798	-0,09811
Logarítmico**	0,9958	3,18456	-0,00025	0,01124	
Bandeja 2					
Linear	0,9990	-0,01266	2,45659		
Henderson & Pabis (1961)*	0,9955	2,76293		0,00807	
Logarítmico**	0,9730	2,67425	-0,00057	0,00750	

* 1.^a fase decrescente

** 2.^a fase decrescente

Com o ajuste paramétrico desenvolveu-se a simulação do processo de secagem nas condições destacadas, passando os pontos calculados nos modelos pela maioria dos pontos experimentais (PMP). Os resultados são apresentados nas Figuras 4.15 a 4.17.

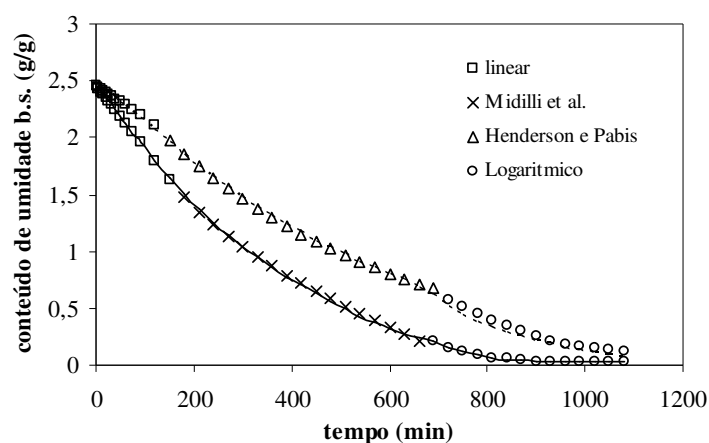


Figura 4.15: Cinética de secagem para a condição de processo de 80°C e 0,2 kg.min⁻¹ e dados preditos dos modelos propostos (— band. 1 e --- band. 2).

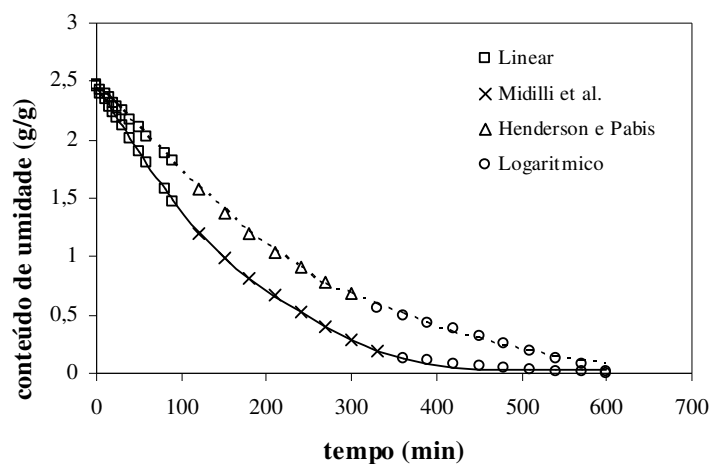


Figura 4.16: Cinética de secagem para a condição de processo de 110°C e 0,3 kg.min⁻¹ e dados preditos dos modelos propostos (— band. 1 e --- band. 2).

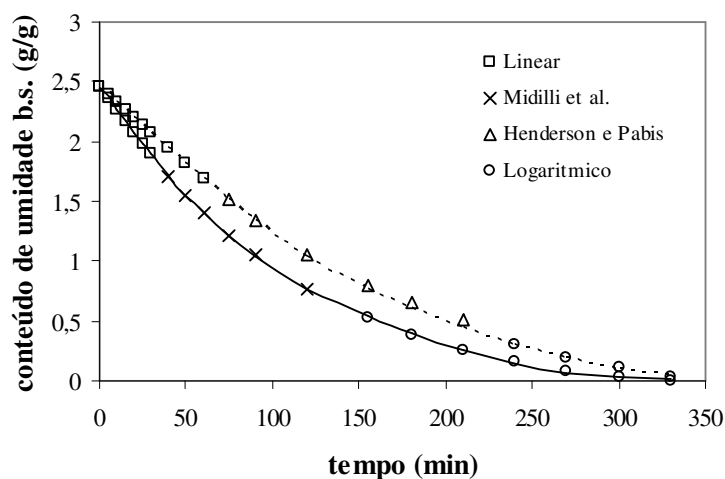


Figura 4.17: Cinética de secagem para a condição de processo de 140°C e 0,4 kg.min⁻¹ e dados preditos dos modelos propostos (— band. 1 e --- band. 2).

Os dados experimentais não foram ajustados aos demais modelos, independente da parte não linear e da bandeja, visto não passarem pela maioria dos pontos experimentais (NPMP), apresentando resíduos significativos e portanto, a porcentagem de modelos ajustados abaixo de 70% foi insatisfatória.

A Figura 4.18 apresenta uma comparação entre os dados experimentais e estimados para as três condições ajustadas nas Figuras de 4.15 a 4.17.

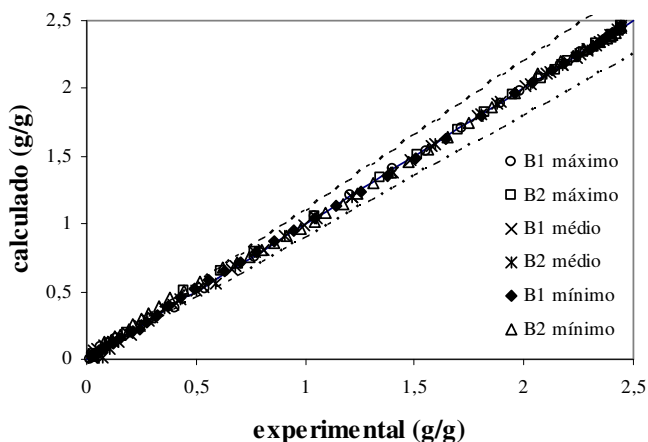


Figura 4.18: Comparação entre os resultados experimentais e os estimados para as condições mínimo, médio e máximo de processo de secagem.

A faixa de erros encontra-se em intervalos de $\pm 10\%$. Os maiores desvios observados correspondem a condição de baixa umidade, sendo que a maioria destes valores encontram-se na 2.^a fase decrescente, onde ocorre a quebra da torta e com isso altera-se o perfil de secagem, promovendo um maior efeito fluidodinâmico e uma menor umidade final.

4.6. Verificação da Sazonalidade

Embora os ensaios preliminares e informações da literatura indiquem que o material coletado em diferentes épocas apresentem alterações pouco significativas, quando tratado termicamente, o efeito da sazonalidade nas características do lodo foi avaliado através do pH, da umidade inicial e da cinética e taxa de secagem. Neste trabalho, a necessidade foi devido a característica especial das atividades produtivas desta região, na qual a existência de um número significativo de unidades de produção operam na informalidade, e, como consequência, o descarte de efluente é realizado na rede de esgoto urbano.

Para tanto, foram realizadas quatro coletas de lodo bruto, obtidas em datas distintas, com o espaçamento de duas semanas. Considerou-se que quatro coletas de lodo eram suficientes para analisar as variações nas características decorrentes da sazonalidade dos efluentes lançados no esgoto, em função dos procedimentos adotados pela ETE.

Os ensaios de secagem foram realizados utilizando-se vazão mássica de ar de $0,4 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ e temperatura de 140°C , ou seja, nas melhores condições estudadas no processo, de acordo com análise do planejamento estatístico proposto por este trabalho, apresentado no item 4.3.

De forma similar ao estudo da secagem, apresentado no item 4.2, o tempo de operação dos ensaios foi definido para que a torta seca de lodo da bandeja 2 atinja uma faixa de 92 a 95% de sólidos. A massa total de sólidos utilizada nos cálculos da umidade em base seca foi obtida considerando-se a massa inicial de 500,0 g do lodo em cada uma das bandejas e a umidade inicial do lodo. Os ensaios foram feitos em duplicata para cada coleta estudada.

O conteúdo de umidade inicial do lodo de esgoto foi praticamente o mesmo, variando numa faixa de 71 a 74%, destacando que o lodo bruto utilizado no estudo anterior de secagem foi de 70,95%. Os resultados estão apresentados pela Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Conteúdo de umidade inicial para as quatro amostras de lodo sazonal.

Coleta	Conteúdo de Umidade Inicial (%)
1	72,53
2	73,59
3	73,98
4	71,52

Estes resultados também estão de acordo com a faixa de teor de sólidos do lodo bruto primário, encontrada no trabalho de GONÇALVES & LUDUVICE (2000), 28 – 30%, que corresponde aproximadamente 70% de conteúdo de umidade inicial, que foi

obtido por desaguamento mecânico do lodo feito em centrífuga, sendo este processo utilizado pela ETE – Tatu, fornecedora do lodo para o presente trabalho.

O pH para as quatro amostras de lodo são apresentados na Tabela 4.15. Esses resultados mostram que o efeito da sazonalidade neste parâmetro é significativo, variando numa faixa de 7 a 8,5.

Tabela 4.15: Valores de pH para as quatro amostras de lodo estudadas.

Coleta	pH
1	7,9
2	8,5
3	7,1
4	7,9

Para se verificar o comportamento do processo de secagem para lodos com possíveis características distintas em função de coletas diferenciadas, foram obtidas as curvas da cinética e da taxa de secagem das bandejas 1 e 2, respectivamente, para as quatro coletas, apresentadas pelas Figuras 4.19 a 4.22.

De forma explicativa, nas legendas das figuras, por exemplo, 1/1, representa o 1º ensaio da 1ª coleta.

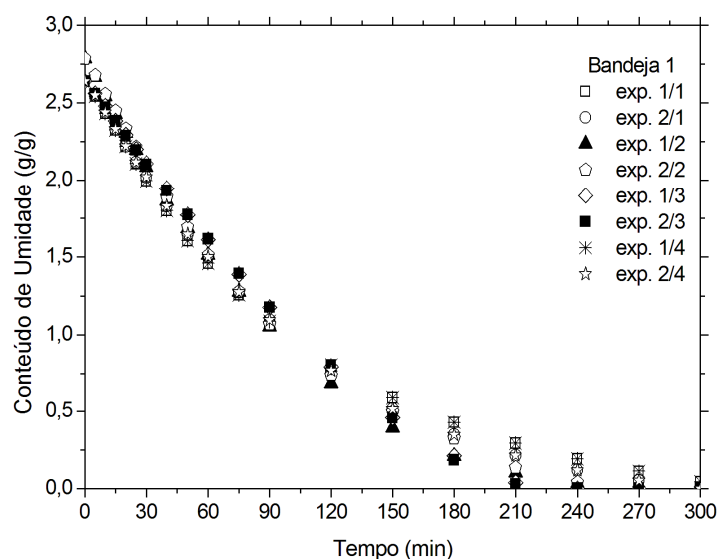


Figura 4.19: Cinética de secagem relativa à bandeja 1 para as quatro coletas.

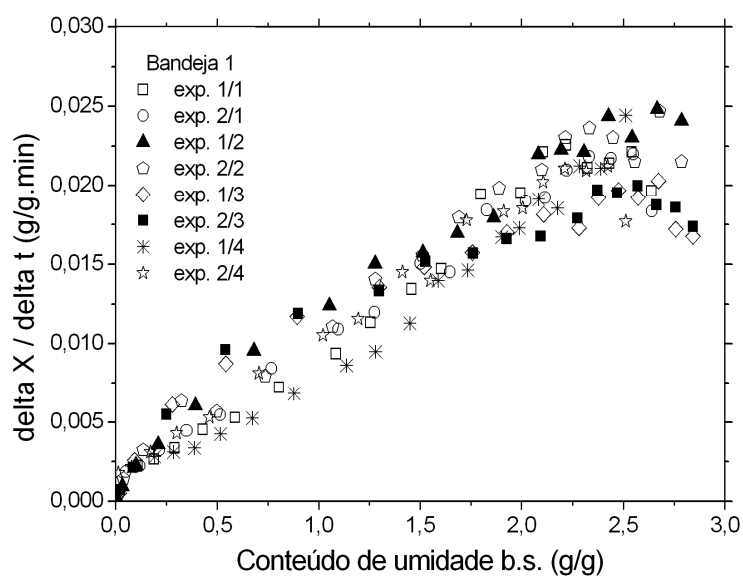


Figura 4.20: Taxa de secagem relativa à bandeja 1 para as quatro coletas.

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam as curvas de cinética e de taxa de secagem da bandeja 1. As características de secagem foram semelhantes, pois, o conteúdo de umidade durante o processo de secagem em todos os ensaios foram muito próximos. As análises das figuras indicaram que o lodo da 2.^a coleta apresentou uma leve melhora à transferência de massa, ou seja, uma maior facilidade de remoção de umidade comparado com os lodos das demais coletas.

As mesmas observações apresentadas acima foram verificadas também para a bandeja 2, apresentadas pelas Figuras 4.21 e 4.22, cinética e taxa de secagem respectivamente, onde o lodo da 2.^a coleta apresentou uma maior facilidade à transferência de massa.

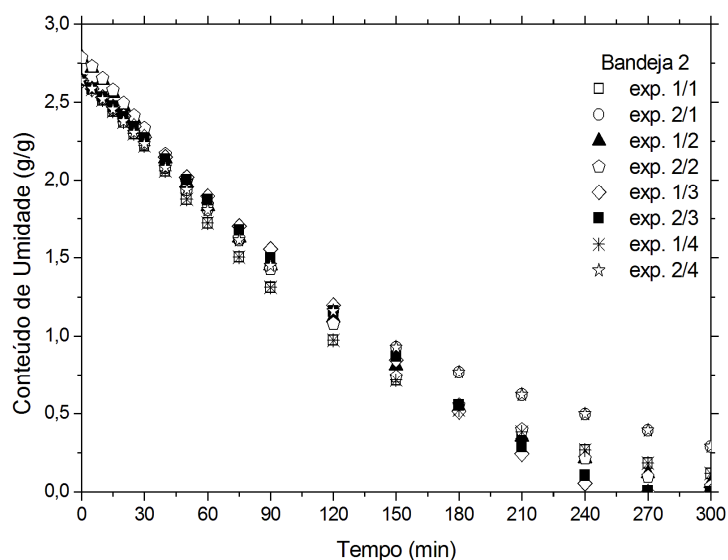


Figura 4.21: Cinética de secagem relativa à bandeja 2 para as quatro coletas.

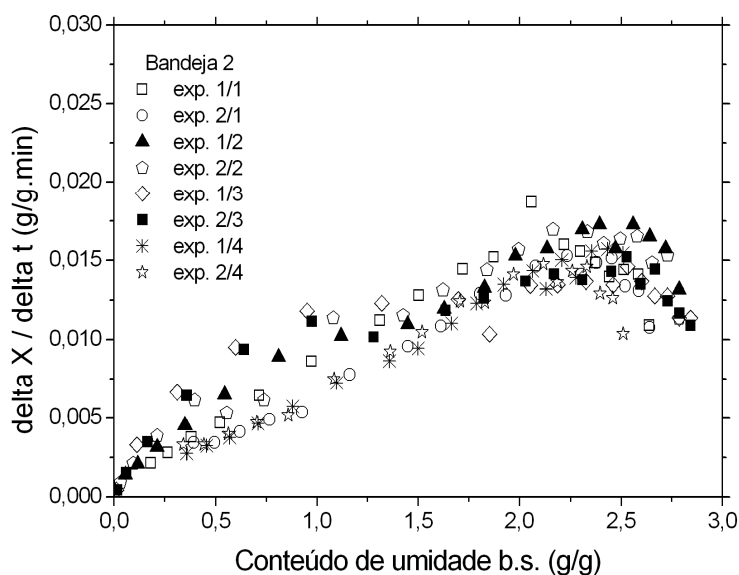


Figura 4.22: Taxa de secagem relativa à bandeja 2 para as quatro coletas.

Esta facilidade de remoção de umidade pode estar ligada às quantidades de sólidos totais e voláteis presentes nos lodos, no qual é diretamente relacionado ao pH dos mesmos, pois o pH da 2.^a coleta foi o mais elevado, como pode ser conferido pela Tabela 4.15. Esta

diferença de pH entre os lodos pode ser explicada em função do procedimento aplicado na empresa Águas de Limeira S.A. que tem como parâmetros operacionais o ajuste de pH do esgoto bruto, variando entre 8,0 – 10,0. Este ajuste é feito utilizando-se cal hidratada, que auxilia na floculação da suspensão. Assim, o lodo da 2.^a coleta, que possui maior valor de pH (8,5), provavelmente recebeu uma quantidade maior deste composto, aumentando a sua quantidade de sólidos fixos. Enquanto o lodo da 3.^a coleta deve ter recebido uma quantidade menor, pois apresenta o valor mais baixo de pH (7,1) dentre os lodos coletados. Além da cal, também adiciona-se ao lodo um polímero catiônico à razão de 5 g de polímero/kg de lodo seco à entrada da centrífuga, a fim de se auxiliar o processo de desidratação mecânica.

Dessa forma, pode-se afirmar que a alteração da composição pela adição destes compostos transforma o lodo em um material com maior facilidade de remoção de umidade.

Em geral, observou-se que houve uma discreta diferença nos valores da umidade e da taxa de secagem dos lodos, ocasionada pelos diferentes conteúdos de umidade inicial e pelas diferentes quantidades de compostos flocculantes adicionados. Porém, o comportamento apresentado pelas diferentes amostras para a cinética e taxa de secagem foram similares, sendo verificados os 3 períodos de secagem descritos no trabalho de Chun & Lee (2004). Dessa forma pode-se considerar que a sazonalidade de coleta não interferiu significativamente no comportamento da cinética de secagem do lodo, contudo provocou uma alteração nos valores de umidade e taxa de secagem ao longo do tempo, devido a variações de algumas características como pH e umidade inicial do lodo de esgoto ser uma função do período e tipo de descarte na região de abrangência deste estudo.

4.7. Inativação Microbiológica

A avaliação da inativação dos microrganismos patogênicos foi dividida em dois grupos: a bacteriológica e a parasitológica.

Para o estudo bacteriológico, foram escolhidas duas bactérias predominantes no lodo de esgoto, a *E. coli* e a *Salmonella* spp, respeitando a metodologia para cada microrganismo, e também por serem as bactérias recomendadas para acompanhamento segundo a CETESB (1999) e EPA (2003).

Para avaliar e comparar a microbiota do lodo bruto durante o tempo de armazenamento sob refrigeração à 7°C, foram feitas quatro análises em datas distintas, cujos resultados encontram-se na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Contagem de bactérias presentes no lodo bruto armazenado sob 7°C.

Amostras	<i>E. coli</i> (x10 ⁵ NMP/g)	<i>Salmonella</i> spp (NMP/4g)
1	9,7	126,4
2	7,6	221,5
3	6,0	30,5
4	4,5	74,6
Permitido pela CETESB (1999) para biossólido classe A	Inferior à 1000 NMP/g	inferior à 3 NMP/4g
Permitido pela CETESB (1999) para biossólido classe B	inferior à 2 x 10 ⁶ NMP/g	-----

As bactérias sob refrigeração podem tanto se multiplicar lentamente ou morrer, alterando a contagem inicial. Porém, devido a grande quantidade destes no lodo e apesar da diferença de aproximadamente 50% tanto para a *E. coli* quanto para a *Salmonella* spp quando comparados a primeira análise (amostra 1) e a última análise (amostra 4), ainda há contagem significativa destas mesmo após o tempo de armazenamento.

Os resultados da análise obtidos para *E. coli* e *Salmonella* spp para o lodo tratado termicamente foi de 0 NMP/g e 0 NMP/4g, respectivamente para os materiais das duas bandejas e em todas as condições do planejamento, mostrando que independente das

condições de processo estudadas, todas foram eficazes no tratamento térmico para fins bacteriológicos, eliminando tanto a *E. coli* quanto a *Salmonella* spp, atendendo a recomendação da CETESB (1999) onde a mínima temperatura para o processo de desinfecção térmica é de 80°C no meio da torta. Este resultado mostra que mesmo com a utilização, por este trabalho, de 80°C como temperatura do ar de secagem, foi possível inativar as bactérias em função do tempo do processo.

Para a análise parasitológica, o estudo foi qualitativo e quantitativo, e determinou uma grande diversidade de parasitas presentes no lodo bruto, destacando-se várias espécies de helmintos (nematelmintos e cestódeos) e protozoários, sendo todos de origem fecal. Dentre eles pode-se citar: ovos de *Enterobius vermicularis*, ovos de *Ancylostoma* sp, *Giardia* sp, *Ascaris* sp, *Entamoeba* sp, *Entamoeba coli*, entre outros.

Após a avaliação qualitativa, foi realizada a contagem de todos os parasitas, conforme a metodologia da CETESB (1989). A Tabela 4.17 apresenta a contagem de helmintos e protozoários no lodo bruto e tratado termicamente.

A análise parasitológica mostrou que o tratamento térmico promoveu eliminação ou redução de helmintos e protozoários, porém, em alguns ensaios os parasitas resistiram ao processo de desinfecção térmica, destacando as amostras 2 para helmintos e 1 e 3 para protozoários. Verifica-se portanto, que tanto os helmintos quanto os protozoários podem suportar algumas condições severas quando comparado às bactérias, no entanto não se avaliou a viabilidade destes ovos e cistos.

Jin *et al.*, 2008; Spinks *et al.*, 2006; Ward & Brandon, 1977; Roediger, 1976; Stern, 1974; definem que a desinfecção bacteriológica está diretamente relacionada ao binômio: temperatura - tempo de exposição. Com isso, para uma melhor compreensão dos resultados da inativação microbiológica foram elaborados os perfis de temperatura para condição de secagem estudada. A localização dos termopares encontra-se na Figura 3.3. As Figuras 4.23 a 4.25 apresentam os perfis referentes às condições de mínimo (80°C/0,2 kg.min⁻¹), médio (110°C/0,3 kg.min⁻¹) e máximo (140°C/0,4 kg.min⁻¹) dos fatores do planejamento proposto. Os demais perfis de temperatura estão apresentados no Apêndice E.

Tabela 4.17: Contagem de helmintos e protozoários no lodo bruto e tratado termicamente.

AMOSTRAS	Band.	centrifugação - Contagem S-R		
		HELMINTOS		PROTOZOÁRIOS
		n.º ovos/4 g	n.º larvas/4 g	n.º cistos/4 g
Lodo bruto	-----	4128	1652	1652
1 (110°C/0,4 kg.min ⁻¹)	1	ND	ND	82,8
	2	ND	ND	ND
2 (110°C/0,3 kg.min ⁻¹)	1	40,4	81,3	ND
	2	ND	ND	ND
3 (140°C/0,4 kg.min ⁻¹)	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	42
4 (140°C/0,2 kg.min ⁻¹)	1	A/I	ND	ND
	2	ND	ND	ND
5 (80°C/0,4 kg.min ⁻¹)	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
6 (140°C/0,3 kg.min ⁻¹)	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
7 (80°C/0,3 kg.min ⁻¹)	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
8 (80°C/0,2 kg.min ⁻¹)	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
9 (110°C/0,2 kg.min ⁻¹)	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND

ND = Não Detectados

A/I = Alterados/Inviáveis

A Figura 4.23 mostra o perfil da temperatura do processo de secagem para a condição mínima de processo, 80°C e 0,2 kg.min⁻¹, relativo ao ensaio 16. Verifica-se que o perfil de temperatura no interior das tortas (termopares 4 e 5) mostra que existe uma pequena alteração após aproximadamente 700 min, quando observa-se a quebra da torta nas

duas bandejas, iniciando a 2.^a fase à taxa decrescente. Nesta fase ocorre o aumento de transferência de calor e de massa para o interior da torta.

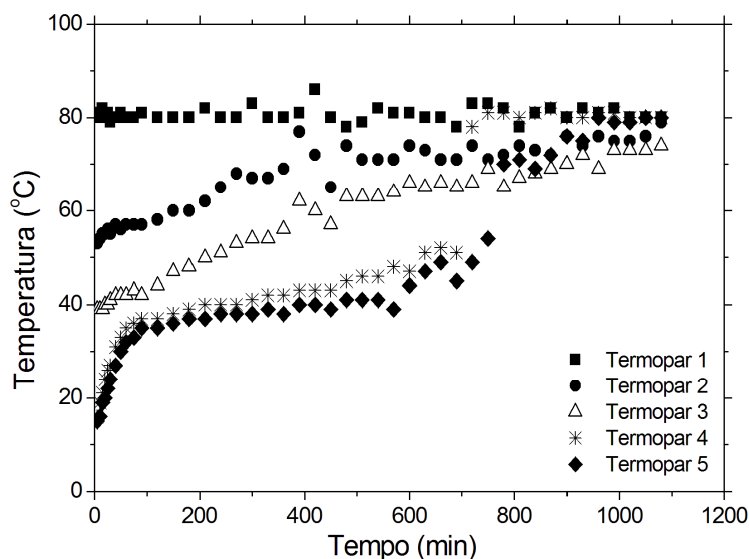


Figura 4.23: Perfil de temperatura do processo (80°C e vazão de ar de 0,2 kg.min⁻¹).

Para o ponto médio do processo (100°C e 0,3 kg.min⁻¹) mostrado na Figura 4.24, referente ao ensaio 3, foi observada a mesma característica de secagem no ponto mínimo. Contudo, verificou-se uma diferença mais significativa no perfil de temperatura entre as bandejas 1 e 2, devido a troca de calor mais rápida em decorrência da temperatura inicial do processo ser mais elevada. Foi observado que a quebra da torta nas bandejas 1 e 2 ocorreram em aproximadamente 250 min e 450 min, respectivamente.

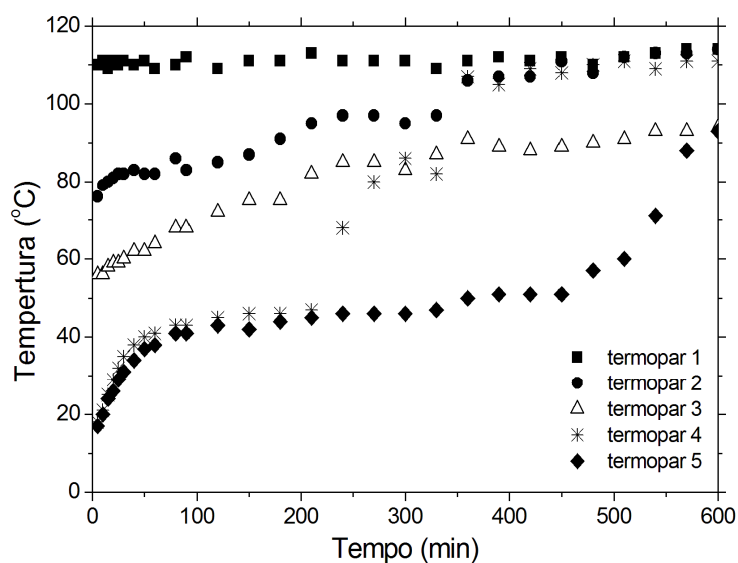


Figura 4.24: Perfil de temperatura do processo (110°C e vazão de ar de $0,3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

Na condição máxima do processo, não se observou a quebra total da torta na bandeja 2. Isto pode ser devido a uma maior taxa de secagem, e consequentemente um menor tempo para a cinética do processo.

Visto que a temperatura é a variável de maior influência para este processo, houve uma maior difusão da umidade interna, o qual pode ter contribuído para a deformação da torta e não a sua quebra. Com isso, obteve-se a redução de umidade estabelecida, mesmo com interior da torta não estando na temperatura de entrada do secador.

A Figura 4.25 apresenta o perfil de temperatura do processo de secagem para a condição máxima de processo (140°C e vazão de ar de $0,4 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$), referente ao ensaio.

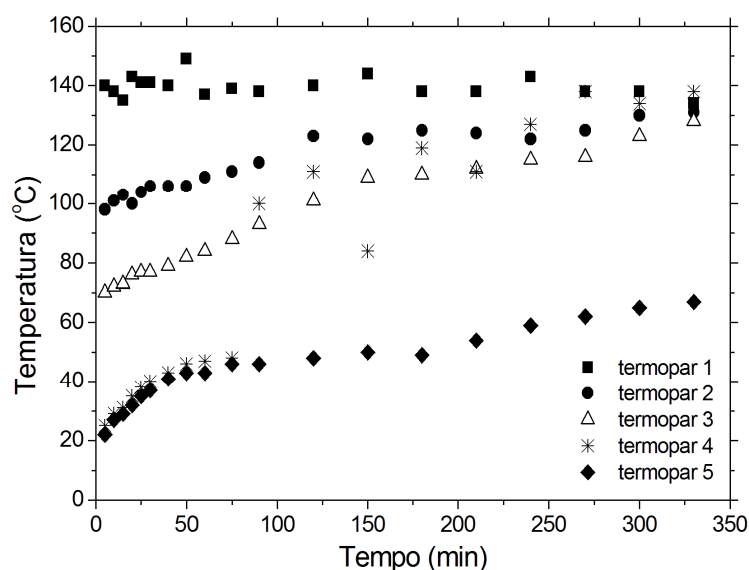


Figura 4.25: Perfil de temperatura do processo (140°C e vazão de ar de 0,4 kg.min⁻¹).

De acordo com Stern (1974), o tempo de destruição da *E. coli* para uma temperatura de 60°C deve ser de 60 min, porém aumentando a temperatura para 70°C, o tempo decresce para 5 min. Enquanto, para a *Salmonella thypi* o tempo de destruição à temperatura de 60°C é de 30 min, e aumentando para 70°C decresce para 4 min. Para a inativação de ovos de *Ascaris lumbricoides* a uma temperatura de 50°C o tempo de exposição deverá ser de 60 min, e aumentando a temperatura para 55°C este tempo decresce para apenas 7 min. O autor determinou estes tempos para o processo de pasteurização.

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.

Analisando as Figuras 4.23 a 4.25, pode-se observar que o tempo de exposição do lodo à temperaturas superiores a 60°C foi superior a 60 min em todos os ensaios, mesmo à temperaturas mais baixas utilizadas, o que seria suficiente para a completa destruição de microrganismos, comprovado pela total inativação das bactérias presentes no lodo bruto, embora, nas amostras 1 e 3 ainda terem sido detectados protozoários (cistos), e, na amostra 2 helmintos (ovos e larvas). Ainda, observa-se que há um aumento significativo da

temperatura após a quebra da torta, aumentando a taxa de secagem e consequentemente a temperatura interna da torta.

Estes resultados corroboram com a dificuldade de se eliminar os helmintos e protozoários, uma vez que esses são mais resistentes, suportando grandes mudanças ambientais.

Além de uma maior resistência dos referidos microrganismos, outra hipótese da inativação inadequada pode ser devido a formação de zonas de revestimento relativamente impermeável de material parcialmente seco, que pode ter inibido a secagem no interior do sólido e com este próprio revestimento ter protegido os parasitas, e deste modo, não recebendo todo o calor necessário.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

Nas condições desenvolvidas deste trabalho, que envolveu a avaliação do processo de secagem de lodo de ETE em um secador de bandeja convectivo direto, foi possível atender aos objetivos propostos de redução de volume e inativação de microrganismos patogênicos. A partir das conclusões que seguem, podem-se confirmar os resultados pretendidos e alcançados com esta pesquisa:

Para as características físico-químicas, que envolveram as análises de pH, metais pesados, nitrogênio total e COT, verificou-se que não ocorreram alterações significativas antes e após o processo de secagem. Observou-se que a relação do pH com o nitrogênio foi um fator determinante para a quantidade de nitrogênio final disponível no lodo seco. Com estes resultados pode-se considerar que não ocorreu emissão atmosférica destes componentes, que são atualmente os materiais perigosos que vem exigindo maior controle face à sua grande capacidade de movimentação no meio, especialmente quando se utiliza processos de tratamento com temperatura mais elevadas, como na secagem. Foi constatado que todas as características do lodo bruto e tratado estavam de acordo com o encontrado na literatura (GONÇALVES & LUDUVICE, 2000; METCALF & EDDY, 1991). Observou-se ainda que a relação do pH com o nitrogênio total foi um fator determinante para a quantidade de nitrogênio final disponível no lodo seco.

Durante o processo de secagem foram observados os diferentes períodos de secagem típicos de materiais como o lodo, polpa, etc., iniciando pelo período de aquecimento do material seguindo-se pelos períodos de secagem à taxa constante, 1.^a e 2.^a taxas decrescentes. O início do 2.^o período de taxa decrescente foi caracterizado pela quebra ou fissura da torta, observadas visualmente em todas as condições de processo, provocando pequeno aumento da taxa de secagem. Foi observado também que o processo de secagem foi predominantemente difusivo, e que os ensaios obtiveram um comportamento, tanto para a cinética quanto para a taxa de secagem, compatíveis com diversos trabalhos de literatura

para esta classe de material (CHUN & LEE, 2004; TSANG & VESILIND, 1990; LOWE, 1995).

A análise estatística do planejamento experimental fatorial 3^2 possibilitou identificar a melhor condição do processo e a determinação da influência das variáveis de entrada temperatura e vazão bem como sua interação sob a variável de resposta tempo de secagem. A temperatura foi a variável mais significativa, seguida pela menor influência da vazão para ambas as bandejas, sendo que o efeito da vazão foi mais forte para a bandeja 2, e não houve efeito da interação dos fatores. Estes resultados comprovaram que o processo de secagem de lodo de esgoto foi predominantemente difusivo, uma vez que a temperatura é a variável de maior efeito na difusão. Como o secador de estudo era do tipo convectivo direto de fluxo ascendente, outros efeitos fluidodinâmicos, podem também ter afetado a secagem, como a umidade do ar de secagem após a passagem pela bandeja 1, a perda de carga do sistema, entre outros.

A redução de volume de cerca de 50% pelo processo de secagem do material foi satisfatória, e observou-se, assim como outros pesquisadores (CARVALHO, 2003; WANG & BRENNAN, 1995), que a redução de volume é proporcional à quantidade de umidade inicial do material. Pode-se concluir que o processo de secagem apresenta um bom potencial como alternativa para minimização de resíduos.

Dentre os modelos matemáticos, semi-empíricos e empíricos, selecionados da literatura, os que apresentaram melhores ajustes aos dados experimentais da secagem de lodo de esgoto primário no secador foram:

Para a bandeja 1 durante a 1.^a fase decrescente, o modelo semi-empírico de Midilli *et al.* (2002). Para a bandeja 2 durante a 1.^a fase decrescente, que sofre maior influência fluidodinâmica, uma vez que todo o ar passa inicialmente pela bandeja 1, foi o modelo semi-empírico de Henderson & Pabis (1961). Para a 2.^a fase decrescente, o modelo Logarítmico descreveu o processo de secagem. Devido a mudança do comportamento de secagem ocasionada pela quebra ou fissura da torta, no qual ocorre um aumento da taxa de secagem e posterior decréscimo, nenhum modelo semi-empírico conseguiu prever o processo de secagem. Portanto, apenas os modelos empíricos foram capazes de descrever este comportamento, pois, o mesmo é similar ao de uma curva de um modelo logarítmico.

A avaliação da sazonalidade mostrou que houve uma discreta diferença nos valores de pH e umidade inicial dos lodos estudados, e que a quantidade de produtos químicos adicionados ao efluente bruto para o adensamento e floculação do lodo no efluente bruto, alterando a composição do material, pode transformar o lodo em um material com maior facilidade de remoção de umidade. Porém, o comportamento tanto da cinética quanto da taxa de secagem foram similares entre as amostras de lodo coletado nos diferentes períodos. Portanto, pode-se considerar que o efeito da sazonalidade de coleta no processo de secagem não foi significativo.

A avaliação da inativação microbiológica indicou que o binômio temperatura x tempo de exposição está diretamente associado à eliminação total ou parcial dos microrganismos. O estudo bacteriológico mostrou que a eliminação da *E. coli* e da *Salmonella* spp foi total, e que à temperatura igual ou superior a 60°C com um tempo de exposição superior a 60 min foi suficiente para a inativação destes microrganismos. Enquanto o estudo parasitológico indicou a dificuldade de se eliminar helmintos e protozoários, pois os mesmos são mais resistentes e suportam grandes mudanças ambientais. Mesmo com o tempo de exposição e a temperatura apresentados acima, em alguns casos, foram detectadas a permanência de parasitas. Além da resistência acentuada destes microrganismos, um possível endurecimento do lodo, formando zonas de revestimento, pode ter ocorrido, inibindo a secagem de lodo nestas zonas, e consequentemente, protegendo os parasitas devido a não eliminação de toda a água necessária para a sua inativação total. Desta forma, foi verificado que apenas 16,7% das amostras de lodo seco não se adequaram como um bio sólido classe A, sendo as mesmas enquadradas como bio sólido classe B, pois não foram obtidos contagem bacteriológica das amostras de lodo seco, portanto, a inativação de patógenos do lodo primário pelo processo de secagem torna-o um tratamento alternativo para viabilizar a utilização do lodo de ETE como um bio sólido classe A, atendendo todos os padrões permitidos, conforme CETESB (1999) e EPA (2003).

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para a continuidade da pesquisa, sugere-se os seguintes trabalhos:

- Avaliação da secagem de lodo de esgoto em outros tipos de secadores, procurando reduzir o tempo de secagem, e ainda promover a completa eliminação microbiológica.
 - Avaliação da secagem de outros lodos de ETE, com características específicas diferentes do material deste estudo, e
 - Avaliação comparativa do processo de secagem com outros processos físicos de redução de umidade, considerando eficiência, qualidade final do lodo e custo de processo.
-

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

AFZAL, T.M.; ABE, T. Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying. *Comput. Eletron. Agric.*, 26, 2000, pp. 137-45.

ÁGUAS DE LIMEIRA. Estação de Tratamento de Esgoto Tatu URL
<http://www.aguasd limeira.com.br> (visitado em novembro de 2008).

ANDRADE, J. C.; de ABREU, M. F.; FALCÃO, A. de A. Protocolos de Análises Químicas. In: ANDRADE, J. C.; de ABREU, M. F. (editores), *Análise Química de Resíduos Sólidos para Monitoramento e Estudos Agroambientais*, Editora IAC, Campinas, 2006, pp. 130-135.

ANDREOLI, C. V.; CHERUBINI, C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R. Avaliação de parâmetros para a secagem e desinfecção do lodo de esgoto em condições artificiais (estufa). In: IX SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais... Porto Seguro, 2000a.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; CHERUBINI, C.; BERNET, P. M.; FAVARIN, F.; CASTRO, L. R. Avaliação da eficiência do uso de estufa plástica, revolvimento de lodo e injeção de calor na secagem e desinfecção de lodo anaeróbio em leito de secagem. In: IX SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais... Porto Seguro, 2000b.

ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I. de; FERREIRA, A. C.; BONNET, B. R. P.; PEGORINI, E. S. Gestão de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto doméstico. *Engenharia e Construções*. Curitiba – PR, set., 24, 1998.

APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19th edition, Washington, 1998.

ARLABOSSE, P.; CHAVES, S.; PREVOT, C. Drying of municipal sludge: from a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer. In: DRYING 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp. 965-971.

BIAGI, J. D.; VALENTINI, S. R. T.; QUEIROZ, D. M. Secagem de produtos agrícolas. In: CORTEZ, L. B.; MAGALHÃES, P. S. G. *Introdução à engenharia agrícola*. Campinas, UNICAMP, Série Manuais, 1992.

BRUCE, D. M. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150°C. *J. Agric. Eng. Res.*, 32, 1985, pp. 337-47.

BUTTON, S. T. IM 317 – Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. *Apostila*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

CAMBERO, C. A. P.; ARLABOSSE, P.; LECOMTE, D. Thermal efficiency in sewage sludge fry drying. In: DRYING 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp. 972-978.

CARRINGTON, EG. Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction – Final Report. *European commission*. Report No 5026/1; 2001. *apud* SAHLSTRÖM, S., ASPAN, A., BAGGE, E., DANIELSSO-THAM, M., ALBIHN, A. Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water Research*, 38, 2004, pp.1989-1994.

CARVALHO, S. M. L. de. *Gerenciamento de resíduos hospitalares e avaliação da secagem como método de redução de volume e grau de periculosidade*. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2003, 196 p.

CARVALHO, S. M. L.; SILVA, M. G. C. da. “Infectious Healthcare Waste: Evaluation of The Performance of a Tray Dryer for Volume and Microbiological Load Reduction”, *Drying Technology*, volume 24, n° 4, 2006, pp 517-522.

CAVALCANTE, J. de; A. *Análise experimental da cinética de secagem da alga marinha sargassum sp.* Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2003, 138 p.

CELMA, A. R.; ROJAS, S.; LÓPEZ, F.; MONTERO, I.; MIRANDA, T. Thin-layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*, 80, 2004, pp 1261-1271.

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Norma L5.550 – Helminthos e Protozoários Patogênicos, contagem de ovos e cistos em amostras ambientais. Método de ensaio. *Manual Técnico*. SP: CETESB, 1989, 23 p.

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Norma P-4.230. Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas. Critérios para projeto e operação. *Manual Técnico*. SP: CETESB, 1999, 32 p.

CHAGAS, W. F. *Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro*. Dissertação de mestrado. Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2000, 89p.

CHUN, W. P.; LEE, K. W. Sludge drying characteristics on combined system of contact dryer and fluidized bed dryer. In: DRYING 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp. 1055-1061.

COOK, E. M.; DUMONT, H. D. *Process drying practice*. New York: McGraw-Hill, 1991.

COSCIONE, A. R.; CEOLATO, L. C. Resíduos de origem orgânica: o lodo de esgoto doméstico. In: ANDRADE, J. C.; de ABREU, M. F. (editores), *Análise Química de Resíduos Sólidos para Monitoramento e Estudos Agroambientais*, Editora IAC, Campinas, 2006, pp. 33-45.

CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. Clarendon Press, Oxford, 2nd ed., 1975.

DAVID, A. C. *Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio*. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo, 2002, 151 p.

EPA – U. S. Environmental Protection Agency. Environmental Regulations and Technology. *Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge(including Domestic Septage) under 40 CFR part 503*. revised in 2003, 186 p.

EPA – U. S. Environmental Protection Agency. Office of Wastewater Management. *Guide to field storage of biosolids*, July 2000, 134 p.

ESTRADA, I.B., ALLER, A., ALLER, F., GÓMEZ, X., MORÁN, A. The survival of *Escherichia coli*, faecal coliforms and enterobacteriaceae in general in soil treated with sludge from wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, 93, 2004, pp.191-198.

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. In: Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. pp. 45-67. *apud* MACHADO, M. F. S. *A Situação Brasileira dos Biossólidos*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2001. 282 p.

FORTUNY, J.A.; FULLER, W.H. Trace metals in municipal sludges. Evaluation procedures for solid wastes. *Biocycle*, v.20, p.27-29, 1979. *apud* GUEDES, M. C. *Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com eucalyptus grandis*. Tese de doutorado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005, pp. 1-16.

FOUST, A. A.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. *Princípios das operações unitárias*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

FRANÇA, M.; ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C. Avaliação do desaguamento do lodo de esgoto anaeróbio tratado termicamente em leitos de secagem em bancada. In: 22.º

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais... Joinville, set., 2003.

FROST, R.; POWLESLAND, C.; HALL, J. E.; NIXON, S. C.; IOUNG, C. P. *Review of sludge treatment and disposal techniques*. Report n.º DoE 2306-M/1, Water Research Centre, 1990.

GEANKOPLIS, C. *Transport and Unit Operations*. 2nd ed., Prentice-Hall International Inc., New Jersey, USA, 1983.

GERARDI, M. H. *Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process*. Wastewater Microbiology Series, Wiley-Interscience, 2002, 193 p.

GERARDI, M. H. *Wastewater Bacteria*. Wastewater Microbiology Series, Wiley-Interscience, 2006, 255 p.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M. Alternativas de minimização da produção e desaguamento de lodo de esgoto. In: Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. pp. 25-43. *apud* MACHADO, M. F. S. *A Situação Brasileira dos Bio sólidos*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2001. 282 p.

GRUTER, H.; MATTER, M.; OEHLMAN, K. H.; HICKS, M. D. Drying of Sewage Sludge – An Important Step in Waste Disposal. *Water Science and Technology*, 22 (12), 1990, pp. 57-63.

HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.*, 17, 1974, pp. 1167–8.

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

HASSEBRAUCK, M.; ERMEL, G. Two examples of thermal drying of sewage sludge. *Wat. Sci. Tech.*, 33 (12), 1996, pp. 235-242.

JIN, T., ZHANG, H. BOYD G., TANG, J. Thermal resistance of *Salmonella enteritidis* and *Escherichia coli* K12 in liquid egg determined by thermal-death-time disks. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84, 608-614.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 3ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 720 p.

KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. Modeling of thin-layer drying kinetics of red chillies. *Journal of Food Engineering*. 2005a.

KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. Drying Kinetics of Red Chillies in a Rotary Dryer. *Biosystems Engineering*. v. 92., 2005b, pp. 15-23.

KAWAI, S.; KUBOTA, A. Drying and granulation of sludge materials in rotary dryer equipped with disintegration device of conglomerate materials. *Proceeding of 3rd International Drying Symposium*, 1982, pp. 413-416.

LEWIS, W. K. The drying of solid materials. *J. Ind. Eng.*, 5, 1921, pp. 427–33.

LOWE, F. R. S. C. Developments in the Thermal Drying of Sewage Sludge. *Journal of the Chartered Institution of Water Environmental and Management*. June, 9, 1995, pp. 306-316.

LUBOSCHIK, U. Solar Sludge Drying – Based on the 1ST Process. *Renewable Energy*, 16, 1999, pp. 785-788.

MACHADO, M. F. S. *A Situação Brasileira dos Biossólidos*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2001. 282 p.

MALINA Jr., J. Tratamento e Destino Final do Lodo. In: SEMINÁRIO DE TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA, 2., 1993, Rio de Janeiro, RJ. Anais... Rio de Janeiro: ABES – WEF, 1993. p. 01-151.

MATTHEWS, P. Sustainability in biosolids management. *Water Science Technolology*, v.38, n.2, p.97-102, 1998. *apud* GUEDES, M. C. *Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre latossolo cultivado com eucalyptus grandis*. Tese de doutorado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005, pp. 1-16.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. *Units Operations of Chemical Engineering*. 6.^a ed., Ed. McGraw-Hill, 2001, pp. 773-811.

METCALF e EDDY, Inc. *Wastewater Engineering – Treatment Disposal Reuse*. Third Edition. McGraw-Hill, Inc. 1991, 1334p.

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

MUJUMDAR, A. S. Drying fundamentals. In: BAKER, C. G. J. (Ed.). *Industrial drying of foods*. London: Chapman e Hall, 1997.

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.

MULET, A.; GARCIA-REVERTER, J.; BOM, J.; BERNA, A. A effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology*, 18 (6), 2000, pp. 1201-1219.

NONHEBEL, G. M. A.; MOSS, A. A. H. *El secado de sólidos en la industria química*. Editorial Reverté S.A., 1979.

OUTWATER, A. B. *Reuse of sludge and minor wastewater residuals*. Lewis Publishers: Boca Raton, 1994, 179 p. *apud* ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; CHERUBINI, C.; BERNET, P. M.; FAVARIN, F.; CASTRO, L. R. Avaliação da eficiência do uso de estufa plástica, revolvimento de lodo e injeção de calor na secagem e desinfecção de lodo anaeróbio em leito de secagem. In: IX SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais... Porto Seguro, 2000b.

OVERHULTS, D.G.; WHITE, H.E.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. Drying of soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16, 1973, pp. 112–113.

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.

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, 21(3), 2001, pp. 288-292.

PEREZ, M. G. R.; CALVELO, A. Modelling the thermal conductivity of cooked meat. *Journal of Food Science*, 49, 1984, pp. 152-156.

PINTO, L. A. A. *Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixes*. Dissertação de mestrado, UFSCar, São Carlos, SP, 1992 *apud* PORTO, P. S. da S. *Cinética da secagem de cebola (Allium cepa L.) em camada delgada*. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Engenharia de Alimentos – FURG, Rio Grande, RS, 2001, 102 p.

PIRES, M. S. G. *Avaliação da presença de patógenos no lodo líquido estabilizado de ETE (processo aeróbio) quando aplicado ao solo arenoso-siltoso*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2003, 138 p.

PRIESTLEY, A. J. Report on Sewage Sludge Treatment and Disposal – Environmental Problems and Research Needs From an Australian Perspective, CSIRO, Division of Chemical and Polymers, 2001. *apud* SILVA, D. P. da. *Estudo da secagem de lodo de esgoto através da fritura de imersão*. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Campinas, SP: [s.n.], 2003.

QUEIROZ, M. R. de. *Estudo Teórico-Experimental da cinética de secagem de bananas*. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP: [s.n.], 1994.

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.

RAHMAN, M. S.; POTLURI, P. L. Shrinkage and density of squid flesh during air drying. *Journal of Food Engineering*, 12, 1990, pp. 133-143.

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, Part B, Process Safety and Environmental Protection*, 85 (B1), 2007, pp. 104-110.

SABESP. Tratamento de esgotos URL
http://www.sabesp.com.br/o_que_fazemos/coleta_e_tratamento/tratamento_de_esgoto.htm.
(visitado em maio de 2005).

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná. Curitiba – PR, 2000, 96 p.

SAHLSTRÖM, S., ASPAN, A., BAGGE, E., DANIELSSO-THAM, M., ALBIHN, A. Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water Research*, 2004, 38, 1989-1994.

SCHIP, R.; EPPER, W. One-stage process for combined dewatering and drying of sewage and industrial sludge. Presented at VDI – Symposium, BW 43-36-11, Sewage sludge disposal, Munich, 1994 *apud* CHUN, W. P.; LEE, K. W. Sludge drying characteristics on

combined system of contact dryer and fluidized bed dryer. In: DRYING 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp. 1055-1061.

SILVA, C. M. (2005), *Dinâmica de metais potencialmente tóxicos no solo após aplicação de lodo de esgoto*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas – SP, 140 p.

SILVA, D. P. da. *Estudo da secagem de lodo de esgoto através da fritura de imersão*. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Campinas, SP: [s.n.], 2003.

SILVA, D. P. da; RUDOLPH, V.; TARANTO, O. P. Drying of sewage sludge through immersion frying. In: DRYING 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp. 1005-1012.

SPELLMAN, F. R. *Dewatering Biosolids*. Lancaster, U.S.: Technomic Publishing, 1997, 275 p.

SPINKS, A.T., DUNSTAN, R.H., HARRISON, T., COOMBES, P., KUCZERA, G. T. Thermal inactivation of water-borne pathogenic and indicator bacteria at sub-boiling temperatures. *Water Research*, 2006, 40, 1326-1332.

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.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. (1968). Mathematical simulation of corn drying – A new model. *Trans. ASAE*, 24 (3), 582-586.

TRAUB, H. Drying – The Cinderella of the process industry. In: DRYING 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp. 798-804.

TSANG, K. R.; VESILIND, P. A. Moisture Distribution in Sludges. *Water Science and Technology*, 22 (12), 1990, pp. 135-142.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. pp. 69-105. *apud* MACHADO, M. F. S. *A Situação Brasileira dos Biossólidos*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2001. 282 p.

TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. *Biossólidos na agricultura*. 1.^a ed., SABESP, São Paulo, 2001, 468 p.

VIEIRA, M. G. A. *Análise da secagem de polpa de celulose para a obtenção de papel reciclado tipo cartão*. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Campinas, SP: [s.n.], 2006.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. Changes in Structure, Density and Porosity of Potato during Dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24, 1995, pp. 61-76.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. A single layer drying equation for rough rice. Paper no. 3001. *American Society of Agricultural Engineers*. 1978.

WARD, R.L., BRANDON, J.R. Effect on Heat on Pathogenic Organisms found in Wastewater Sludge. In: Proceedings of National Conference on Composting of Municipal Residue and Sludges, Washington, D.C. August 23-25, 1977. Information Transfer Inc., Rockville, Maryland 20852. p. 122 *apud* EPA – U. S. Environmental Protection Agency. *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal*. September 1979.

WEF – Water Environmental Federation. Operation of municipal wastewater treatment plants. *Manual of practice*. 5.^a ed., Alexandria, 1996.

APÊNDICE A
CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

A. Calibração dos termopares

O conjunto termopares/indicador de temperatura foi calibrado empregando-se chapa de aquecimento, béquer, agitador magnético e como referência um termômetro de mercúrio calibrado e certificado.

Para garantir a abrangência da faixa de temperatura desejada (80°C - 140°C) utilizou-se óleo de soja comercial como fluido térmico. Os resultados foram obtidos a partir da média de duas leituras para cada termopar. A localização dos termopares no secador está apresentada pela Figura 3.3, do Capítulo 3. Nas Figuras A1 a A5 são mostradas as curvas de calibração e as equações ajustadas correspondentes para cada termopar.

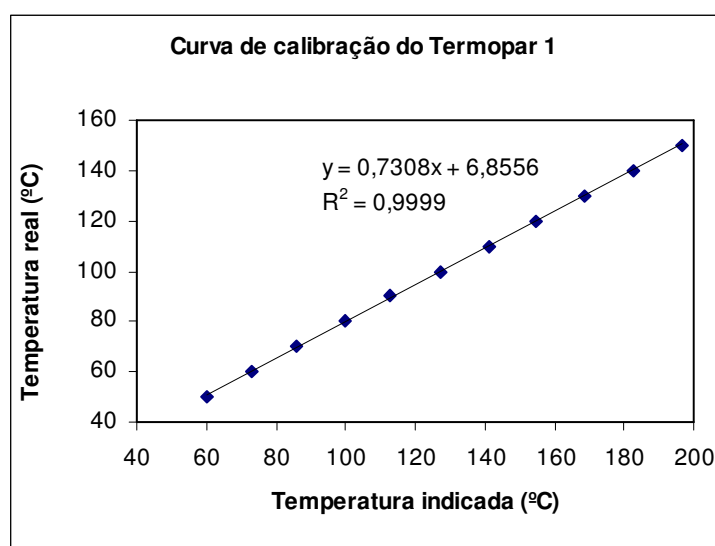


Figura A1: Curva de Calibração do termopar 1.

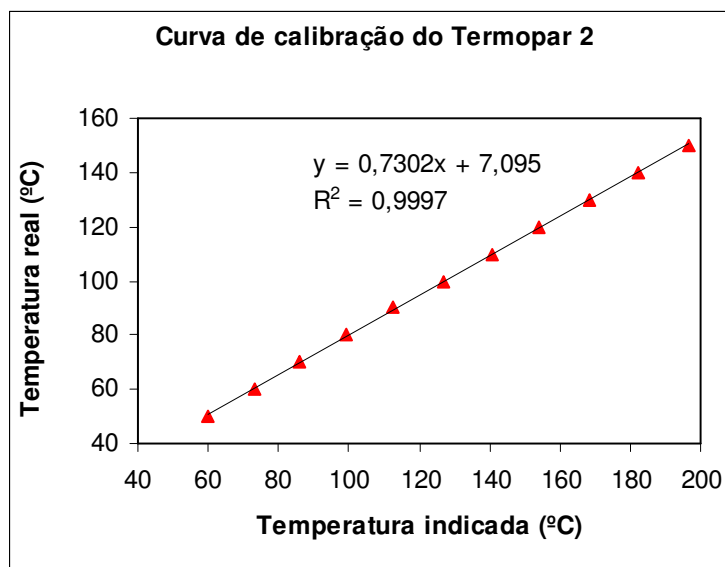


Figura A2: Curva de Calibração do termopar 2.

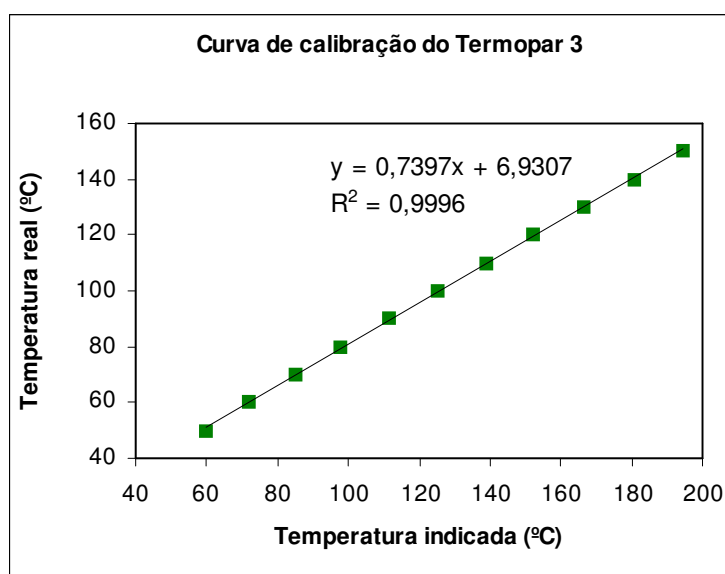


Figura A3: Curva de Calibração do termopar 3.

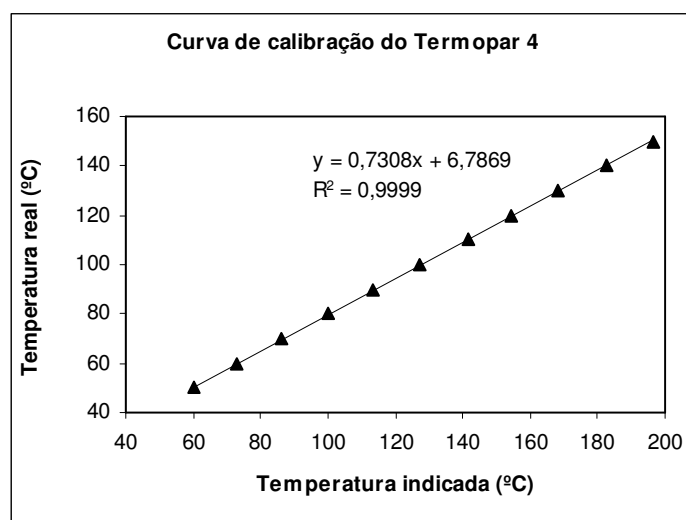


Figura A4: Curva de Calibração do termopar 4.

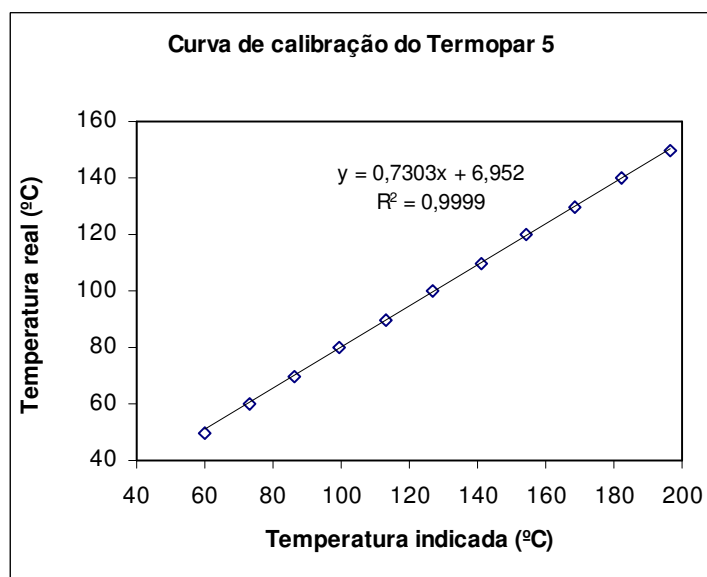


Figura A5: Curva de Calibração do termopar 5.

APÊNDICE B
CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

B. Calibração da placa de orifício

As medidas da vazão do ar de secagem foram obtidas empregando-se placa de orifício com diâmetro do orifício igual a 20mm, para um tubo de 50,8mm. As leituras do diferencial de pressão e de pressão estática foram realizadas 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 de OWER e PANKHURST (1977) para fluxo gasoso e que foi utilizada para a obtenção da curva de calibração desta placa é representada pela Equação B1.

$$Q_m = k \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot a_2 \sqrt{\frac{1}{1-m^2} (\Delta h) \frac{b}{k_1 + T}} \quad (B1)$$

Onde:

Q_m = vazão mássica (kg/min);

$\varepsilon = 1 - \beta \frac{\Delta h}{\Delta P + b}$ (fator de compressibilidade);

$\beta = 0,3041 + 0,0876m - 0,1166m^2 + 0,4089m^3$ (ADM);

ΔP = pressão estática a montante da placa de orifício (cmH₂O);

$\alpha = 0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4$ (coeficiente de descarga) (ADM);

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

b = pressão barométrica local (mmHg);

T = temperatura do ar (°C);

$m = \frac{a_2}{a_1}$ (ADM);

a_1 = área do tubo (cm²);

a_2 = área do orifício (cm²);

$k = 0,0573$ (constante de correção de unidades) (ADM) e

$k_1 = 273,15$ K

A curva de calibração obtida é mostrada na Figura B1. Na Tabela B1 são mostrados os dados obtidos na calibração da placa de orifício.

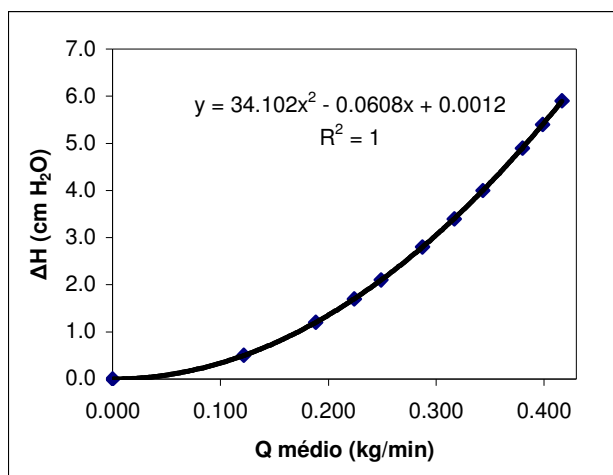


Figura B1: Curva de calibração da placa de orifício.

Tabela B1: Dados obtidos na calibração da placa de orifício para: T=28°C; b=760mmHg; d1=50,8mm e d2=20,1mm.

ΔH (cm H ₂ O)	ΔP (cm H ₂ O)	Q média (kg/min)
0,00	0,00	0,000
0,50	13,60	0,122
1,20	22,00	0,188
1,70	28,10	0,224
2,10	32,10	0,249
2,80	38,30	0,287
3,40	45,30	0,317
4,00	53,30	0,343
4,90	59,60	0,380
5,40	64,80	0,399
5,90	69,40	0,417

APÊNDICE C

CINÉTICA E TAXA DE SECAGEM DOS ENSAIOS REALIZADOS

- Ensaios 1 e 2 ($T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,4\text{ kg/min}$)

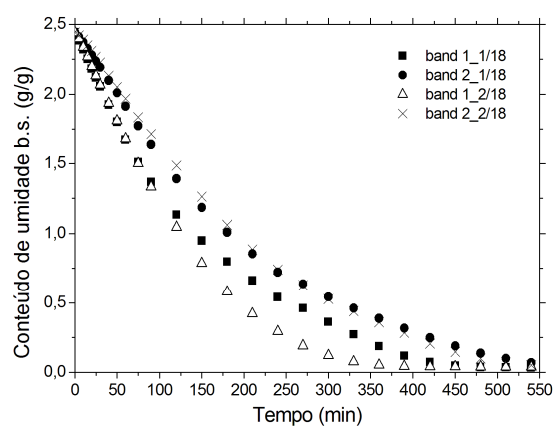


Figura C1: Cinética de secagem relativa aos ensaios 1 e 2.

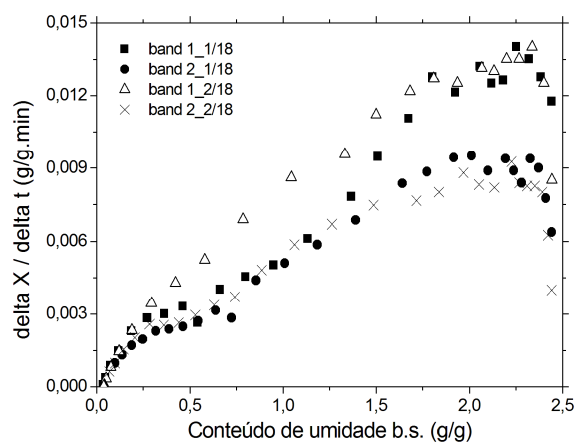


Figura C2: Taxa de secagem relativa aos ensaios 1 e 2.

- Ensaios 3 e 4 ($T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,3\text{ kg/min}$)

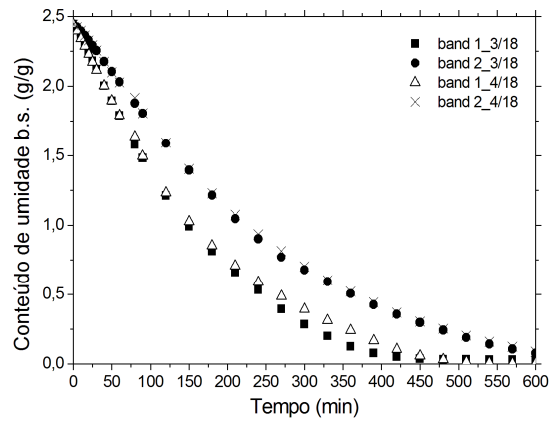


Figura C3: Cinética de secagem relativa aos ensaios 3 e 4.
(apresentada no Capítulo 4 como Figura 4.6)

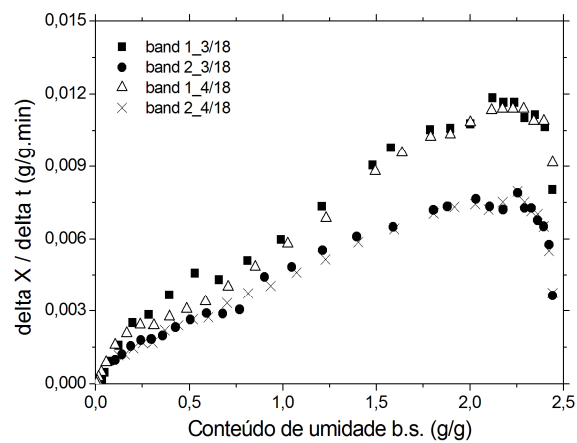


Figura C4: Taxa de secagem relativa aos ensaios 3 e 4.
(apresentada no Capítulo 4 como Figura 4.7)

• Ensaio 5 e 6 ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,4\text{ kg/min}$)

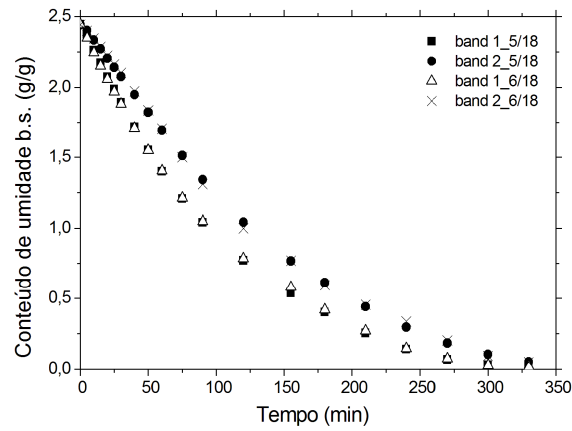


Figura C5: Cinética de secagem relativa aos ensaios 5 e 6.
(apresentada no Capítulo 4 como Figura 4.8)

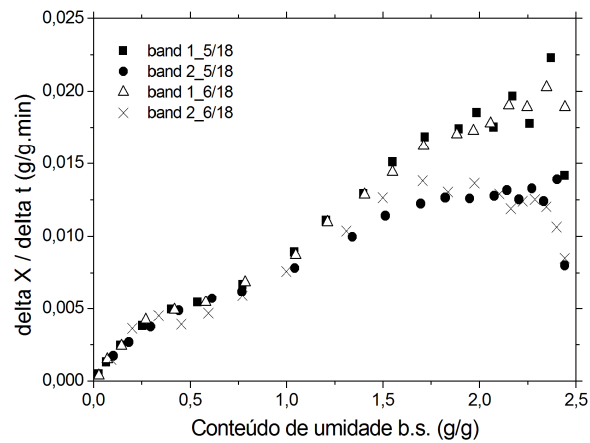


Figura C6: Taxa de secagem relativa aos ensaios 5 e 6.
(apresentada no Capítulo 4 como Figura 4.9)

- Ensaios 7 e 8 ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,2\text{ kg/min}$)

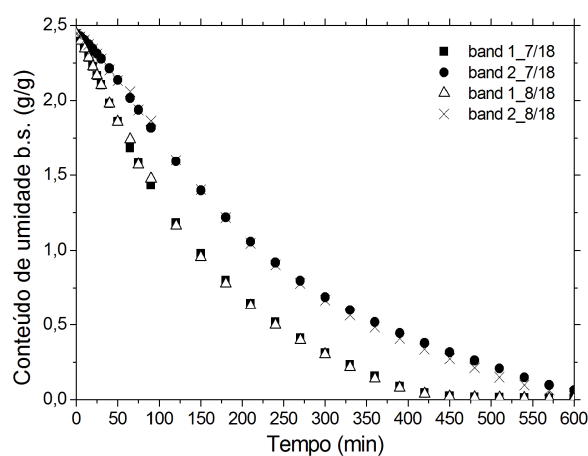


Figura C7: Cinética de secagem relativa aos ensaios 7 e 8.

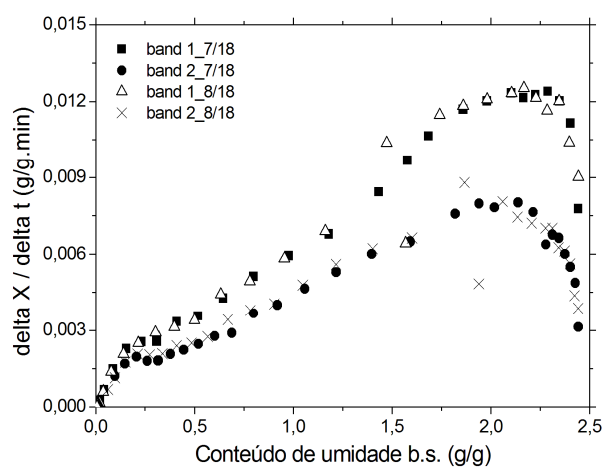


Figura C8: Taxa de secagem relativa aos ensaios 7 e 8.

- Ensaios 9 e 10 ($T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,4\text{ kg/min}$)

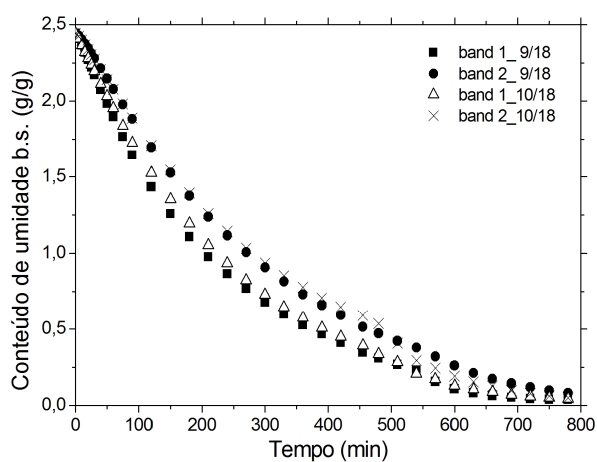


Figura C9: Cinética de secagem relativa aos ensaios 9 e 10.

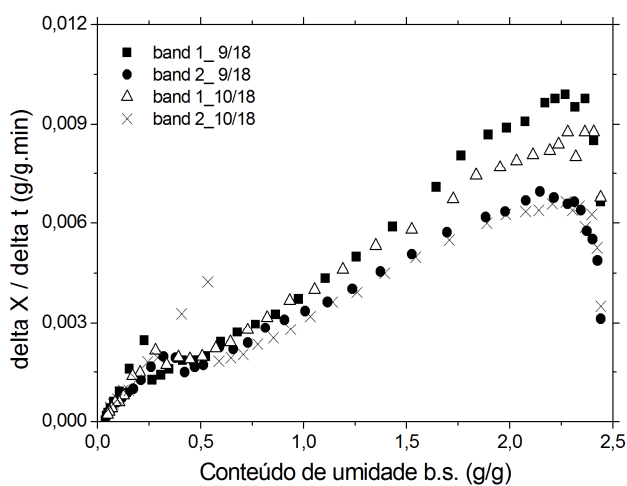


Figura C10: Taxa de secagem relativa aos ensaios 9 e 10.

- Ensaios 11 e 12 ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,3\text{ kg/min}$)

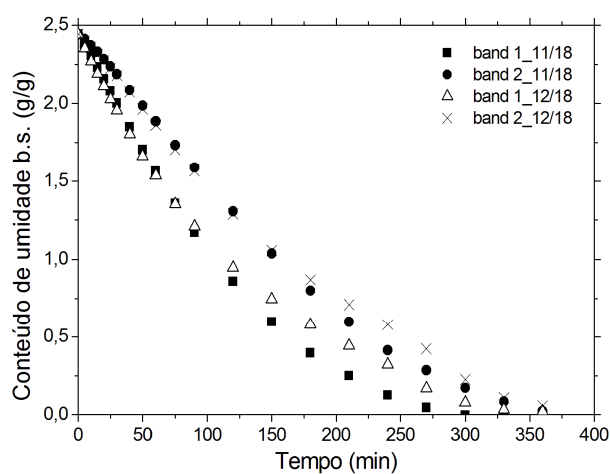


Figura C11: Cinética de secagem relativa aos ensaios 11 e 12.

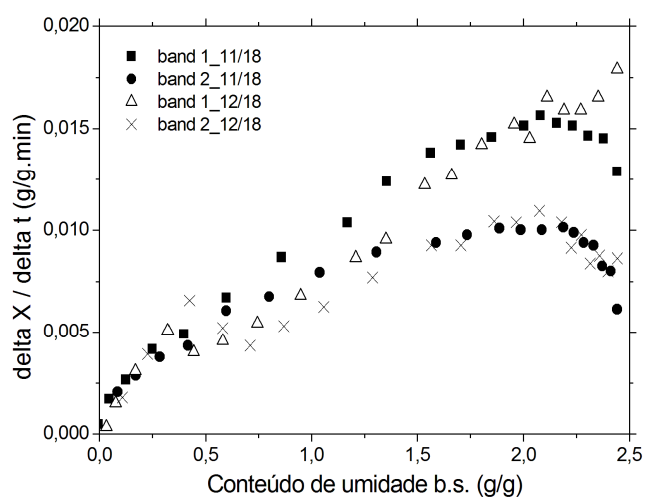


Figura C12: Taxa de secagem relativa aos ensaios 11 e 12.

- Ensaios 13 e 14 ($T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,3\text{ kg/min}$)

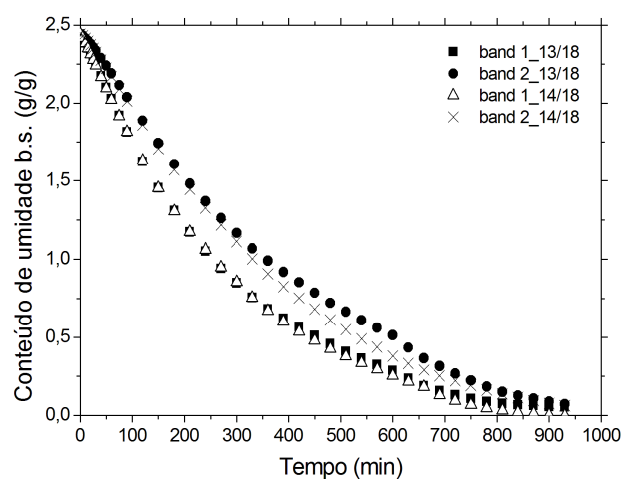


Figura C13: Cinética de secagem relativa aos ensaios 13 e 14.

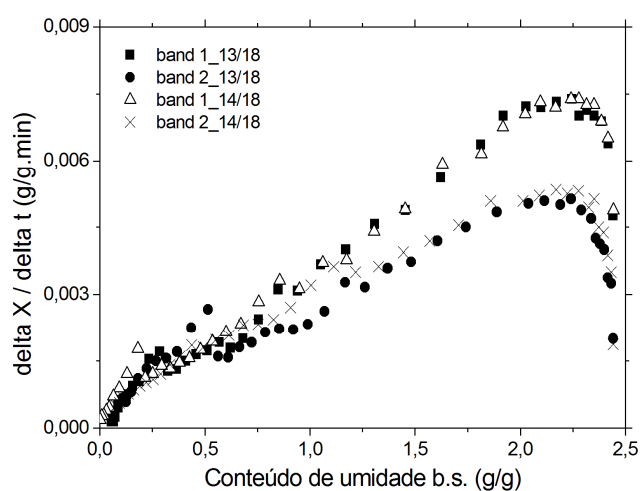


Figura C14: Taxa de secagem relativa aos ensaios 13 e 14.

- Ensaios 15 e 16 ($T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,2\text{ kg/min}$)

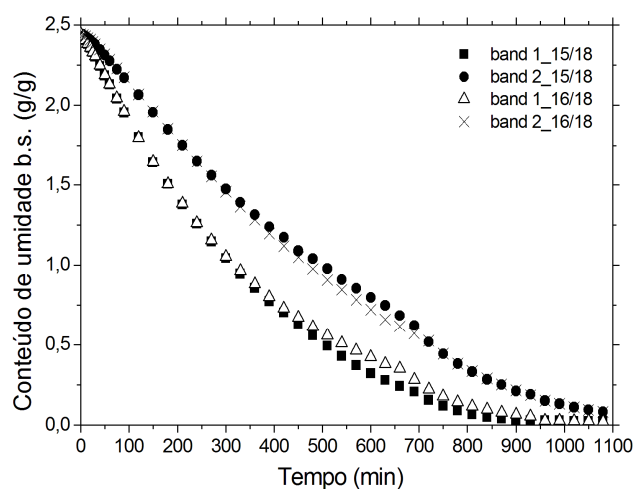


Figura C15: Cinética de secagem relativa aos ensaios 15 e 16.
(apresentada no Capítulo 4 como Figura 4.4)

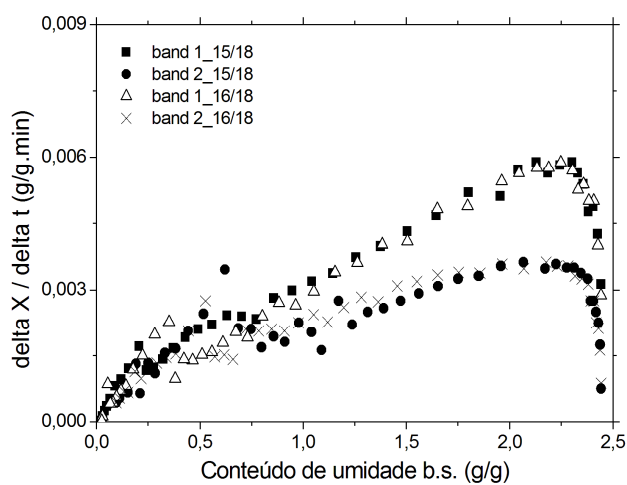


Figura C16: Taxa de secagem relativa aos ensaios 15 e 16.
(apresentada no Capítulo 4 como Figura 4.5)

- Ensaios 17 e 18 ($T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,2\text{ kg/min}$)

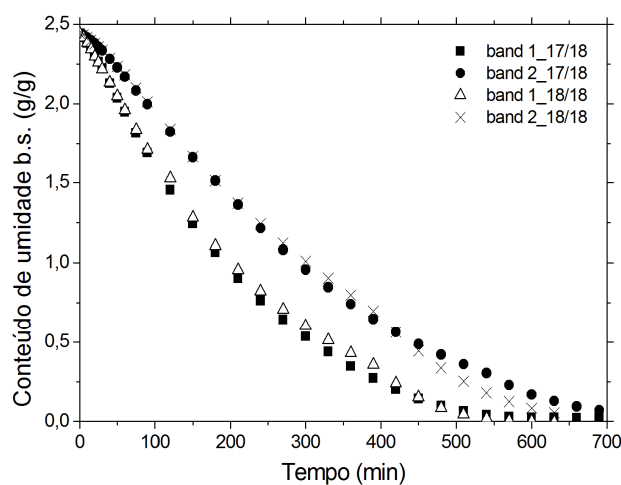


Figura C17: Cinética de secagem relativa aos ensaios 17 e 18.

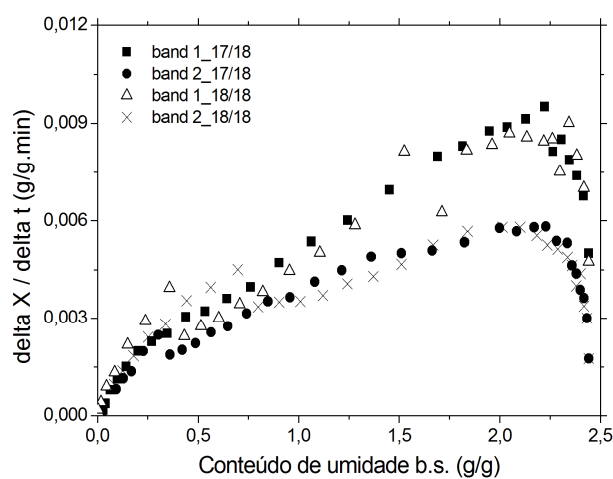


Figura C18: Taxa de secagem relativa aos ensaios 17 e 18.

APÊNDICE D

PERFIS DE TEMPERATURA DOS ENSAIOS DE SECAGEM

- Ensaios 1 e 2 ($T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,4\text{ kg/min}$)

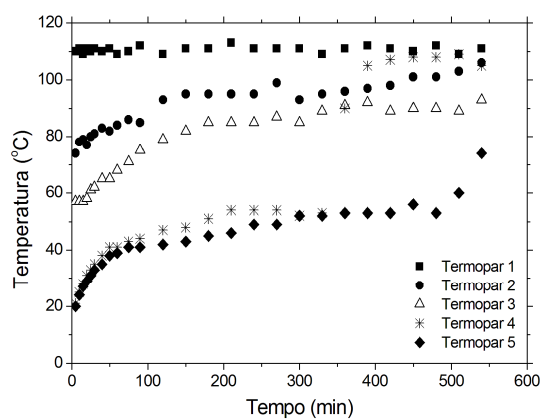


Figura D1: Perfil de temperatura do ensaio 1.

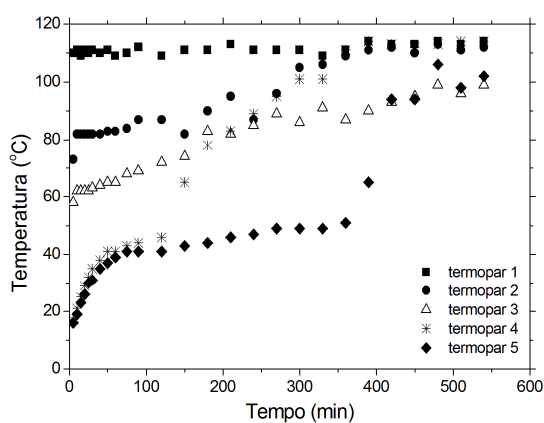


Figura D2: Perfil de temperatura do ensaio 2.

- Ensaios 3 e 4 ($T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,3\text{ kg/min}$)

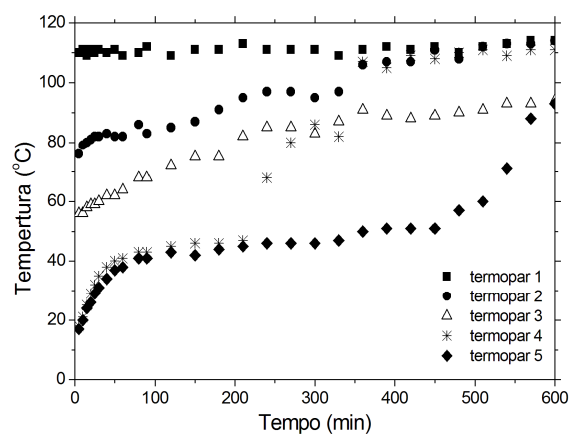


Figura D3: Perfil de temperatura do ensaio 3.

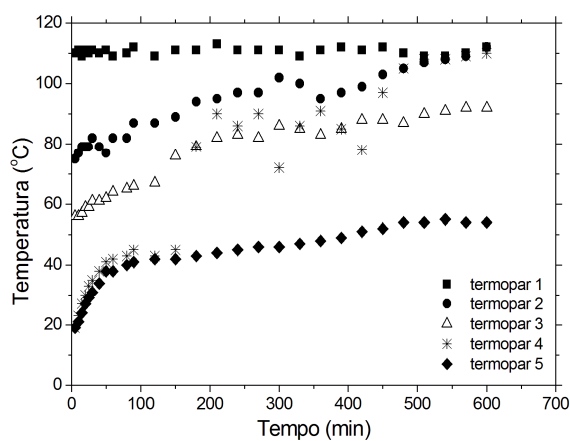


Figura D4: Perfil de temperatura do ensaio 4.

- Ensaio 5 e 6 ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,4\text{ kg/min}$)

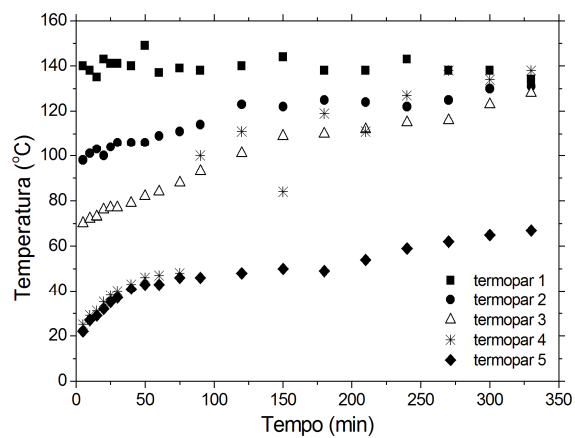


Figura D5: Perfil de temperatura do ensaio 5.

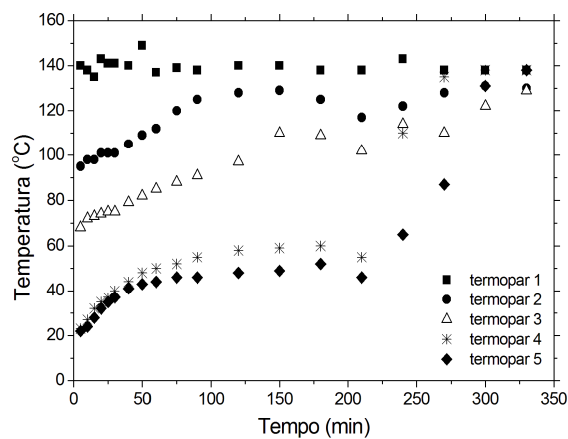


Figura D6: Perfil de temperatura do ensaio 6.

• Ensaios 7 e 8 ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,2\text{ kg/min}$)

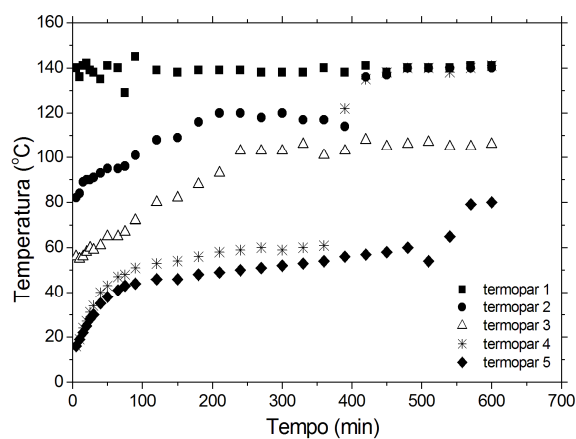


Figura D7: Perfil de temperatura do ensaio 7.

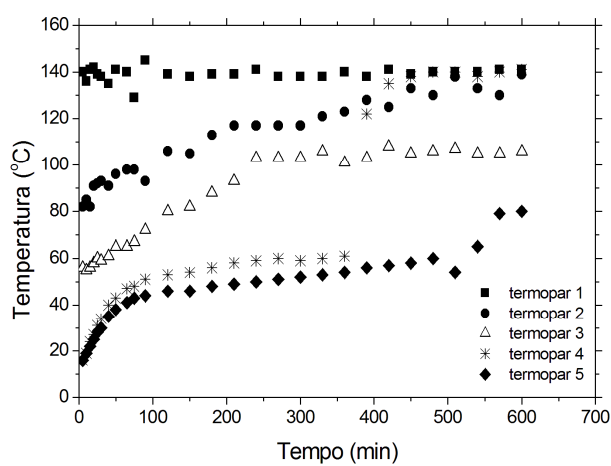


Figura D8: Perfil de temperatura do ensaio 8.

- Ensaios 9 e 10 ($T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,4\text{ kg/min}$)

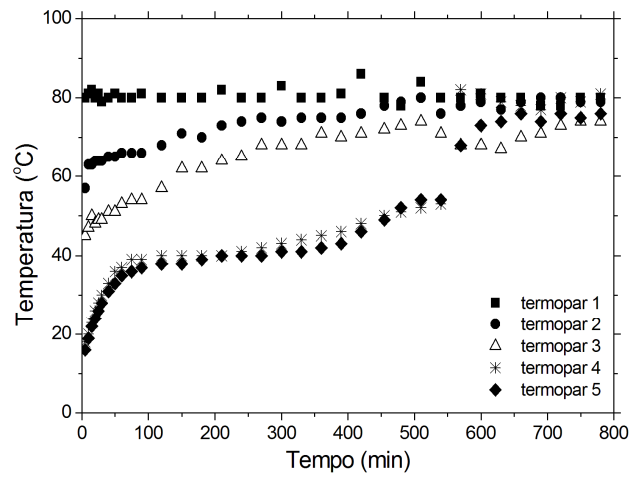


Figura D9: Perfil de temperatura do ensaio 9.

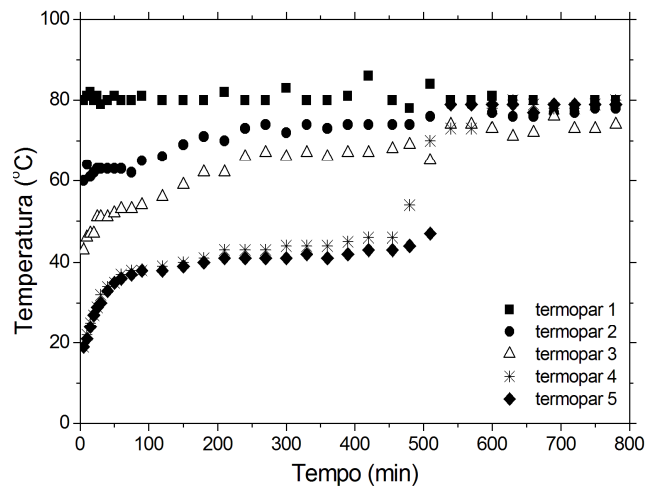


Figura D10: Perfil de temperatura do ensaio 10.

- Ensaio 11 e 12 ($T=140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,3\text{ kg/min}$)

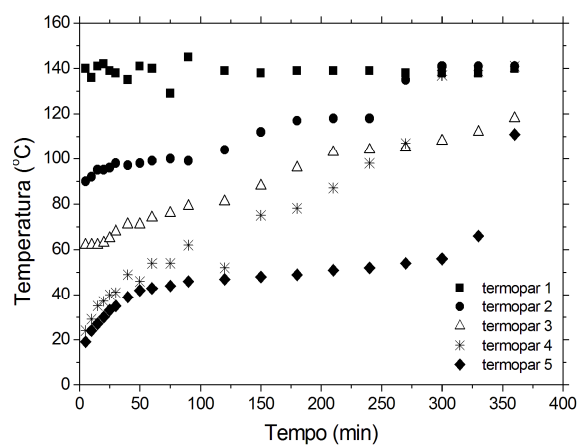


Figura D11: Perfil de temperatura do ensaio 11.

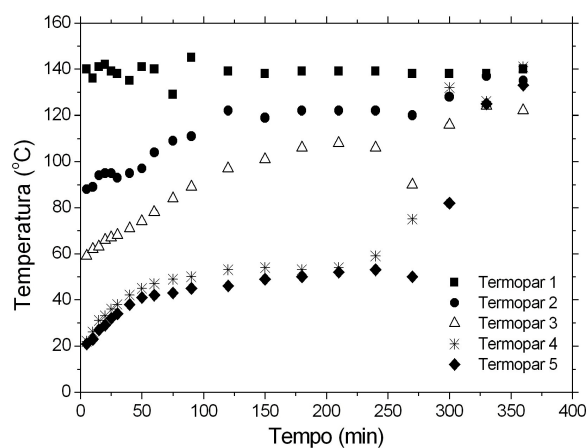


Figura D12: Perfil de temperatura do ensaio 12.

- Ensaios 13 e 14 ($T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,3\text{ kg/min}$)

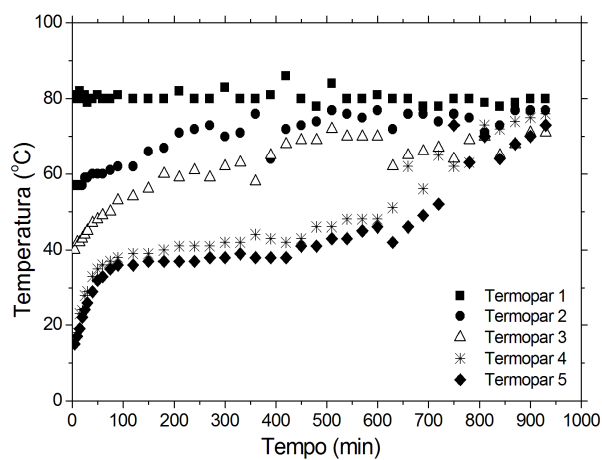


Figura D13: Perfil de temperatura do ensaio 13.

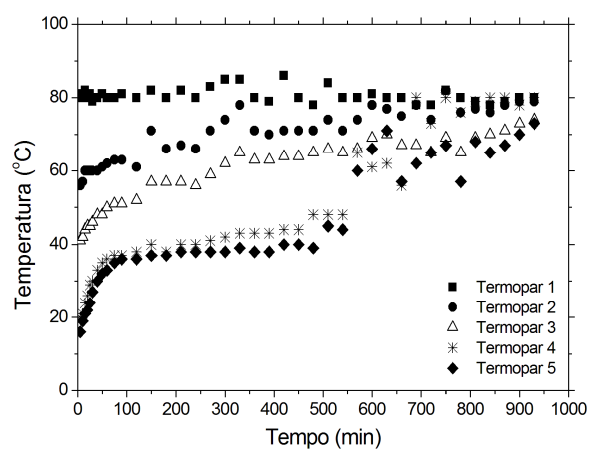


Figura D14: Perfil de temperatura do ensaio 14.

- Ensaios 15 e 16 ($T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,2\text{ kg/min}$)

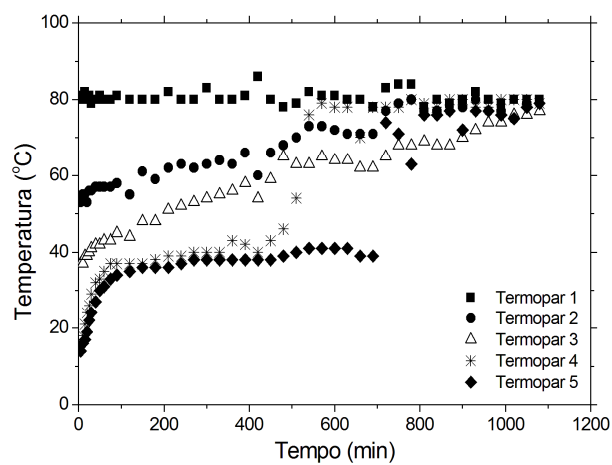


Figura D15: Perfil de temperatura do ensaio 15.

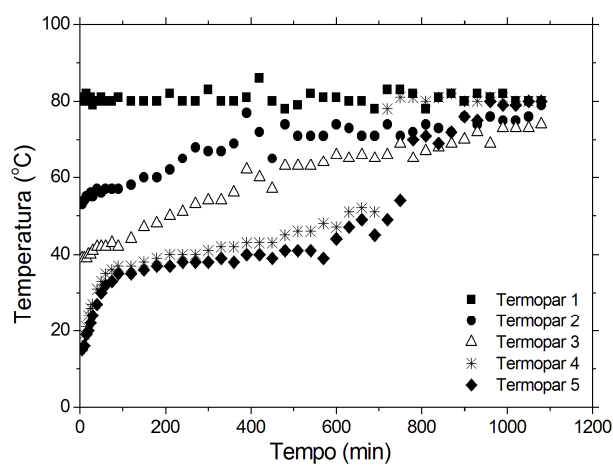


Figura D16: Perfil de temperatura do ensaio 16.

- Ensaios 17 e 18 ($T=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $Q=0,2\text{ kg/min}$)

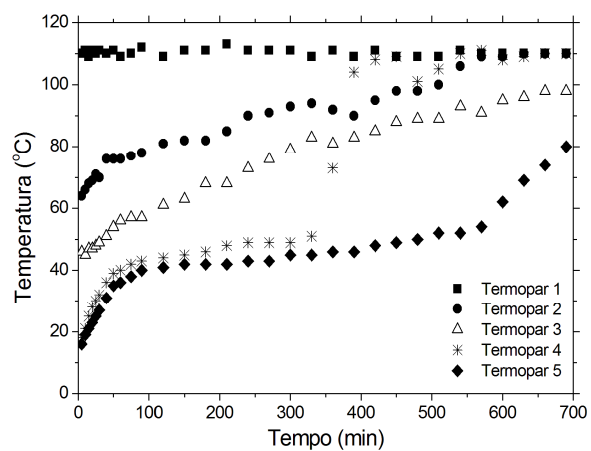


Figura D17: Perfil de temperatura do ensaio 17.

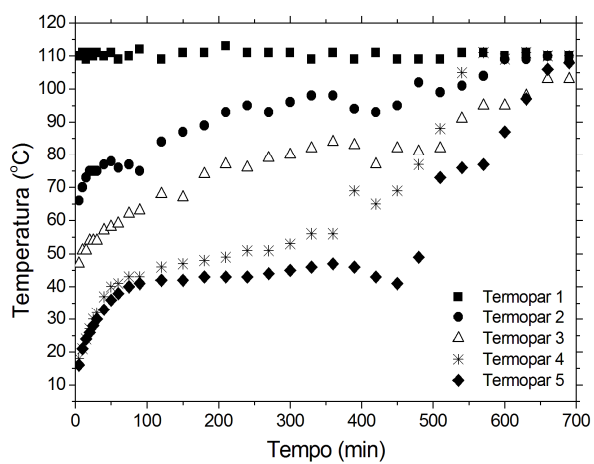


Figura D18: Perfil de temperatura do ensaio 18.

APÊNDICE E**TABELAS DE DADOS DOS ENSAIOS DE SECAGEM**

Tabela E1: Dados relativos ao ensaio 1 ($T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,4\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 ($^{\circ}\text{C}$)	Termopar 2 ($^{\circ}\text{C}$)	Termopar 3 ($^{\circ}\text{C}$)	Termopar 4 ($^{\circ}\text{C}$)	Termopar 5 ($^{\circ}\text{C}$)
0	550	550	110	-----	-----	-----	-----
5	540,6	544,9	110	74	57	21	20
10	530,4	538,7	111	78	57	25	24
15	519,6	531,5	109	79	57	28	27
20	508,4	524	111	77	58	31	29
25	498,3	517,3	110	80	61	33	31
30	488,3	510,2	111	81	62	35	33
40	467,2	495,2	110	83	65	38	35
50	447,8	481	111	82	65	41	38
60	427,4	465,8	109	84	68	41	39
75	400,9	443,2	110	86	71	43	41
90	378,2	422	112	85	75	44	41
120	340,7	381,9	109	93	79	47	42
150	311,4	349	111	95	82	48	43
180	287,3	320,9	111	95	85	51	45
210	265,5	296,4	113	95	85	54	46
240	246,2	275,3	111	95	85	54	49
270	233,5	261,7	111	99	87	54	49
300	217,6	246,6	111	93	85	52	52
330	203,2	233,6	109	95	89	53	52
360	189,6	221,7	111	96	91	90	53
390	178,6	210,3	112	97	92	105	53
420	171,5	199,3	111	98	89	107	53
450	167,3	189,9	110	101	90	108	56
480	165,5	181,7	112	101	90	108	53
510	165,3	175,4	109	103	89	109	60
540	164,9	170,7	111	106	93	105	74

Tabela E2: Dados relativos ao ensaio 2 – duplicata (T = 110 °C; Q = 0,4 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	110	-----	-----	-----	-----
5	543,2	546,8	110	73	58	17	16
10	533,2	541,8	111	82	62	21	19
15	522	535,4	109	82	62	25	23
20	511,2	528,8	111	82	62	29	26
25	500,4	522,2	110	82	62	32	30
30	490	515,5	111	82	63	35	31
40	469	500,7	110	82	64	38	35
50	449	487,6	111	83	65	41	37
60	428,7	474,3	109	83	65	41	39
75	399,5	453,2	110	84	68	43	41
90	372,6	434	112	87	69	44	41
120	326,7	397,3	109	87	72	46	41
150	285,4	361,5	111	82	74	65	43
180	252,4	329,4	111	90	83	78	44
210	227,3	301,3	113	95	82	83	46
240	206,7	278,2	111	87	85	89	47
270	190,2	260,4	111	96	89	95	49
300	179	244,2	111	105	86	101	49
330	172	230	109	106	91	101	49
360	168,1	217,3	111	109	87	111	51
390	166,5	205,1	114	111	90	114	65
420	166,2	192,7	113	112	93	113	94
450	166,1	183	113	110	95	112	94
480	166	175,6	114	113	99	113	106
510	165,9	170,9	113	111	96	114	98
540	165,8	167,9	114	112	99	114	102

Tabela E3: Dados relativos ao ensaio 3 (T = 110 °C; Q = 0,3 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	110	-----	-----	-----	-----
5	543,6	547,1	110	76	56	18	17
10	535,1	542,5	111	79	56	21	20
15	526,2	537,3	109	80	58	25	24
20	517,4	531,9	111	81	59	29	26
25	508,1	526,1	110	82	59	32	29
30	498,8	520,3	111	82	60	35	31
40	479,9	507,7	110	83	62	38	34
50	462,7	496,2	111	82	62	40	37
60	445,8	484,5	109	82	64	41	38
80	412,2	460,1	110	86	68	43	41
90	396,6	448,4	112	83	68	43	41
120	353,3	414	109	85	72	45	43
150	318,2	382,9	111	87	75	46	42
180	289,6	353,7	111	91	75	46	44
210	265,2	327,2	113	95	82	47	45
240	244,6	304	111	97	85	68	46
270	222,7	282,8	111	97	85	80	46
300	205,2	268,2	111	95	83	86	46
330	191,6	254,4	109	97	87	82	47
360	179,6	240,5	111	106	91	107	50
390	172,1	227,9	112	107	89	105	51
420	167,7	216,8	111	107	88	109	51
450	165,5	207,3	112	111	89	108	51
480	164,8	198,5	110	108	90	110	57
510	164,7	189,9	112	112	91	111	60
540	164,4	182,5	113	113	93	109	71
570	164,3	176,7	114	113	93	111	88
600	164,2	172	114	114	94	111	93

Tabela E4: Dados relativos ao ensaio 4 - duplicata (T = 110 °C; Q = 0,3 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	110	-----	-----	-----	-----
5	542,7	547	110	75	56	19	19
10	534	542,6	111	77	56	23	21
15	525,3	537,4	109	79	57	27	24
20	516,2	531,8	111	79	59	30	27
25	507,1	526,1	110	79	59	33	29
30	498	520,1	111	82	61	35	31
40	479,9	507,4	110	79	61	38	34
50	462,6	495,4	111	77	62	41	38
60	446,1	483,9	109	82	64	42	38
75	421,6	466,1	110	82	65	43	40
90	398,7	448,6	112	87	66	45	41
120	356,6	414,9	109	87	67	43	42
150	323,8	384,2	111	89	76	45	42
180	296	356,1	111	94	79	79	43
210	272,8	331,4	113	95	82	90	44
240	253,6	309,3	111	97	83	86	45
270	237,4	289,9	111	97	82	90	46
300	222,7	272	111	102	86	72	46
330	209,5	256,1	109	100	85	86	47
360	198	243	111	95	83	91	48
390	186,4	230,3	112	97	85	85	49
420	176,5	218,8	111	99	88	78	51
450	168,9	208,3	112	103	88	97	52
480	164,7	200,2	110	105	87	105	54
510	162,4	192,2	109	107	90	108	54
540	161,1	185,2	109	108	91	108	55
570	160,6	179,4	110	109	92	109	54
600	160,5	173,8	112	112	92	110	54

Tabela E5: Dados relativos ao ensaio 5 ($T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 0,4\text{ kg.min}^{-1}$).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 ($^{\circ}\text{C}$)	Termopar 2 ($^{\circ}\text{C}$)	Termopar 3 ($^{\circ}\text{C}$)	Termopar 4 ($^{\circ}\text{C}$)	Termopar 5 ($^{\circ}\text{C}$)
0	550	550	140	-----	-----	-----	-----
5	538,7	543,6	140	98	70	25	22
10	520,9	532,5	138	101	72	29	27
15	506,7	522,6	135	103	73	31	29
20	491	512	143	100	76	35	32
25	477	502	141	104	77	38	35
30	462,2	491,5	141	106	77	40	37
40	434,4	471,1	140	106	79	43	41
50	407,5	451	149	106	82	46	43
60	383,4	430,8	137	109	84	47	43
75	352,5	401,5	139	111	88	48	46
90	326	374,2	138	114	93	100	46
120	283,2	326,4	140	123	101	111	48
155	245,8	282,6	144	122	109	84	50
180	224,1	257,8	138	125	110	119	49
210	200,4	230,4	138	124	112	111	54
240	182,1	207,1	143	122	115	127	59
270	170,4	189,1	138	125	116	138	62
300	164,2	176,3	138	130	123	134	65
330	161,9	168	134	131	128	138	67

Tabela E6: Dados relativos ao ensaio 6 - duplicata (T = 140 °C; Q = 0,4 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	140	-----	-----	-----	-----
5	534,9	543,2	140	95	68	23	22
10	518,7	534,7	138	98	72	27	24
15	503,6	525,1	135	98	73	32	28
20	488,4	515,1	143	101	74	35	32
25	474,2	505,2	141	101	75	37	35
30	460,4	495,7	141	101	75	40	37
40	433,2	475,1	140	105	79	44	41
50	407,3	453,3	149	109	82	48	43
60	384,3	432,5	137	112	85	50	44
75	353,5	399,4	139	120	88	52	46
90	327,2	369,1	138	125	91	55	46
120	285,4	319,4	140	128	97	58	48
150	252,6	283	140	129	110	59	49
180	226,6	254,8	138	125	109	60	52
210	203,1	232,4	138	117	102	55	46
240	182,9	213,6	143	122	114	110	65
270	171,3	192	138	128	110	135	87
300	164,2	174,6	138	131	122	138	131
330	162,4	167,5	138	130	129	138	138

Tabela E7: Dados relativos ao ensaio 7 (T = 140 °C; Q = 0,2 kg.min-1).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	140	-----	-----	-----	-----
5	543,8	547,5	140	82	56	16	16
10	534,9	543,6	136	84	55	19	19
15	525,3	539,2	141	89	56	24	22
20	515,4	534,4	142	90	58	27	25
25	505,6	529,1	139	90	60	31	28
30	495,9	523,7	138	91	59	34	30
40	476,2	513,5	135	93	61	40	35
50	457	501,3	141	95	65	43	38
65	429	482,1	140	95	65	47	41
75	412	469,6	129	96	67	48	43
90	388,8	450,5	145	101	72	51	44
120	348,4	414,2	139	108	80	53	46
150	315,9	383,1	138	109	82	54	46
180	287,4	354,3	139	116	88	56	48
210	262,8	328,9	139	120	93	58	49
240	242,3	306,6	139	120	103	59	50
270	225,2	287,4	138	118	103	60	51
300	209,2	269,8	138	120	103	59	52
330	196,9	255,9	138	117	106	60	53
360	184,7	242,6	140	117	101	61	54
390	173,8	230,8	138	114	103	122	56
420	166,7	220,1	141	136	108	135	57
450	163,5	210,2	138	137	105	138	58
480	162,3	201,5	140	140	106	140	60
510	162	192,9	140	140	107	140	54
540	161,4	183,5	140	140	105	138	65
570	161,2	175,4	141	140	105	140	79
600	161	169,6	141	140	106	141	80

Tabela E8: Dados relativos ao ensaio 8 – duplicata (T = 140 °C; Q = 0,2 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	140	-----	-----	-----	-----
5	542,8	546,9	140	82	56	16	16
10	534,5	543,4	136	85	55	19	19
15	524,9	538,9	141	82	56	24	22
20	515,6	534	142	91	58	27	25
25	505,9	529	139	92	60	31	28
30	495,9	523,4	138	93	59	34	30
40	476,2	512,2	135	91	61	40	35
50	456,9	500,7	141	96	65	43	38
65	438	488,8	140	98	65	47	41
75	410,5	469,5	129	98	67	48	43
90	395,1	457,9	145	93	72	51	44
120	345,4	415,7	139	106	80	53	46
150	312,4	383,9	138	105	82	54	46
180	284,4	354,1	139	113	88	56	48
210	260,7	327,2	139	117	93	58	49
240	239,5	304,2	141	117	103	59	50
270	223,2	284,8	138	117	103	60	51
300	208,2	266,6	138	117	103	59	52
330	194,2	250,2	138	121	106	60	53
360	182,2	237	140	123	101	61	54
390	172,3	225	138	128	103	122	56
420	165,7	213,5	141	125	108	135	57
450	162,9	203,5	139	133	105	138	58
480	162,1	193,7	140	130	106	140	60
510	161,6	183,8	140	138	107	140	54
540	161,2	175,4	140	133	105	138	65
570	160,9	169,9	141	130	105	140	79
600	160,9	166,6	141	139	106	141	80

Tabela E9: Dados relativos ao ensaio 9 (T = 80 °C; Q = 0,4 kg.min-1).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	80	-----	-----	-----	-----
5	544,7	547,5	80	57	45	18	16
10	537,9	543,6	81	63	47	20	19
15	530,1	539,2	82	63	50	23	22
20	522,5	534,6	80	64	48	26	24
25	514,6	529,5	81	64	49	28	26
30	506,8	524,2	79	64	49	30	28
40	491,4	513,7	80	65	51	33	31
50	476,9	502,9	81	65	51	36	33
60	462,7	491,8	80	66	53	37	35
75	441,9	475,8	80	66	54	39	36
90	422,6	460,6	81	66	54	39	37
120	388,7	431	80	68	57	40	38
150	360,5	403,6	80	71	62	40	38
180	336,6	379,3	80	70	62	40	39
210	315,8	357,5	82	73	64	40	40
240	298	338,2	80	74	65	41	40
270	282,4	320,8	80	75	68	42	40
300	268,3	304,7	83	74	68	43	41
330	255,3	289,9	80	75	68	44	41
360	243,8	276,3	80	75	71	45	42
390	234,4	264,9	81	75	70	46	43
420	225,6	254,4	86	76	71	48	46
455	215,3	241,9	80	78	72	50	49
480	209	235,1	78	79	73	51	52
510	202,3	227,2	84	80	74	52	54
540	196,3	220,1	80	76	71	53	54
570	184,6	210,9	80	78	68	82	68
600	177	201,5	81	79	68	81	73
630	172,7	193,6	80	77	67	79	74
660	169,9	187,6	80	79	70	78	76
690	168	182,9	78	80	71	77	74
720	166,8	178,8	78	80	73	80	76
750	166	175,4	80	79	74	79	75
780	165,9	172,6	80	79	74	81	76

Tabela E10: Dados relativos ao ensaio 10 - duplicata (T = 80 °C; Q = 0,4 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	80	-----	-----	-----	-----
5	544,6	547,2	80	60	43	19	19
10	537,6	543	81	64	46	22	21
15	530,6	538	82	61	47	25	24
20	524,2	533,3	80	62	47	27	27
25	517,2	528,1	81	63	51	29	29
30	510,5	523	79	63	51	32	30
40	497,4	512,4	80	63	51	34	33
50	484,5	501,9	81	63	52	35	35
60	471,9	491,7	80	63	53	37	36
75	453,5	476,5	80	62	53	38	37
90	435,7	461,5	81	65	54	38	38
120	403,5	432,8	80	66	56	39	38
150	375,7	406,5	80	69	59	40	39
180	350,2	382,6	80	71	62	41	40
210	328,1	361	82	70	62	43	41
240	308,9	342,2	80	73	66	43	41
270	291,3	324,8	80	74	67	43	41
300	276,2	309,5	83	72	66	44	41
330	262,9	296,1	80	74	67	44	42
360	251,4	284	80	73	66	44	41
390	240,8	272,8	81	74	67	45	42
420	231,4	263,1	86	74	67	46	43
455	222,4	253,9	80	74	68	46	43
480	213,1	245,2	78	74	69	54	44
510	204,9	224,9	84	76	65	70	47
540	192,9	206,6	80	79	74	73	79
570	187	198,9	80	79	74	73	79
600	180,4	190,3	81	77	73	78	79
630	176,6	184,3	80	76	71	80	79
660	173,8	179,8	80	76	72	79	77
690	171	175,3	78	77	76	78	79
720	169,1	172,1	78	77	73	78	79
750	167,7	169,6	80	78	73	79	79
780	166,7	167,6	80	78	74	80	79

Tabela E11: Dados relativos ao ensaio 11 (T = 140 °C; Q = 0,3 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	140	-----	-----	-----	-----
5	539,7	545,1	140	90	62	24	19
10	528,1	538,7	136	92	62	29	24
15	516,4	532,1	141	95	62	35	27
20	504,3	524,7	142	95	63	37	30
25	492,1	517,2	139	96	65	40	33
30	479,6	509,3	138	98	68	41	35
40	455,4	493,1	135	97	71	49	39
50	432,1	477,1	141	98	71	46	42
60	409,4	461,1	140	99	74	54	43
75	376,3	436,9	129	100	76	54	44
90	346,6	413,5	145	99	79	62	46
120	296,9	368,5	139	104	81	52	47
150	255,3	325,7	138	112	88	75	48
180	223,2	287,6	139	117	96	78	49
210	199,7	255,2	139	118	103	87	51
240	179,8	226,1	139	118	104	98	52
270	167,1	205,3	138	135	105	107	54
300	158,9	187,2	138	141	108	137	56
330	156,6	173,4	138	141	112	139	66
360	156,6	163,5	140	141	118	141	111

Tabela E12: Dados relativos ao ensaio 12 - duplicata (T = 140 °C; Q = 0,3 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	140	-----	-----	-----	-----
5	535,7	543,1	140	88	59	22	21
10	522,5	536,7	136	89	62	26	23
15	509,8	529,7	141	94	63	31	27
20	497,1	523	142	95	66	33	29
25	483,9	515,2	139	95	67	36	32
30	472,3	507,9	138	93	68	38	34
40	448	491,3	135	95	71	42	38
50	425,3	473,8	141	97	74	45	41
60	405	457,2	140	104	78	47	42
75	375,7	432,2	129	109	84	49	43
90	352,8	410	145	111	89	50	45
120	311,3	365,6	139	122	97	53	46
150	278,6	328,7	138	119	101	54	49
180	252,5	298,7	139	122	106	53	50
210	230,6	273,3	139	122	108	54	52
240	211,3	252,5	139	122	106	59	53
270	186,9	227,5	138	120	90	75	50
300	172,1	196	138	128	116	132	82
330	164,9	177,2	138	137	124	126	125
360	163,2	168,6	140	135	122	141	133

Tabela E13: Dados relativos ao ensaio 13 (T = 80 °C; Q = 0,3 kg.min-1).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	80	-----	-----	-----	-----
5	546,2	548,4	80	57	40	16	15
10	541,1	545,8	81	57	42	18	17
15	535,6	543,1	82	57	42	23	19
20	530	539,9	80	57	43	24	22
25	524,3	536,6	81	59	44	28	24
30	518,7	533,2	79	59	45	29	26
40	506,9	525,7	80	60	47	33	29
50	495,2	517,9	81	60	48	35	32
60	483,7	509,7	80	60	49	36	33
75	466,4	497,7	80	61	50	37	35
90	449,6	485,5	81	62	53	38	36
120	419,1	461,4	80	62	54	39	36
150	392,2	438,2	80	66	56	39	37
180	368,8	416,6	80	67	60	40	37
210	346,9	396,5	82	71	59	41	37
240	327,7	378,6	80	72	61	41	37
270	310,1	361,4	80	73	59	41	38
300	295,3	346,2	83	70	62	42	38
330	280,4	330,5	80	71	63	42	39
360	268,7	317,9	80	76	58	44	38
390	259,1	306,7	81	64	65	43	38
420	250,5	296,1	86	72	68	42	38
450	241,3	285,4	80	73	69	43	41
480	233	275,1	78	74	69	46	41
510	225,1	265,9	84	77	72	46	43
540	217,9	257,2	80	76	70	48	43
570	211,6	249,6	80	75	70	48	45
600	205,5	241,9	81	77	70	48	46
630	197,3	229,1	80	72	62	51	42
660	189,9	218,3	80	76	65	62	46
690	184,9	210,1	78	76	66	56	49
720	180,4	202,6	78	74	67	65	52
750	176,8	195,4	80	76	64	62	73
780	173,8	189	80	75	69	63	63
810	171,6	183,7	79	71	70	73	70
840	170,4	179,8	78	73	65	72	64
870	169,7	177	79	77	68	74	68
900	168,7	173,8	80	77	71	75	70
930	168	171	80	77	71	76	73

Tabela E14: Dados relativos ao ensaio 14 - duplicata (T = 80 °C; Q = 0,3 kg.min-1).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	80	-----	-----	-----	-----
5	546,1	548,5	80	56	41	20	16
10	540,9	545,7	81	57	42	21	19
15	535,4	542,6	82	60	44	24	21
20	529,6	539,1	80	60	45	26	22
25	523,8	535,5	81	60	45	29	24
30	517,9	531,4	79	60	46	30	27
40	506,1	523,5	80	60	48	33	30
50	494,6	515	81	61	48	35	32
60	482,9	506,6	80	62	50	36	33
75	466	493,8	80	63	51	37	35
90	449,8	481,3	81	63	51	37	36
120	420,3	456,9	80	61	52	38	36
150	391,9	432,5	82	71	57	40	37
180	368,4	410,7	80	66	57	38	37
210	347,3	390,6	82	67	57	40	38
240	329,2	371,7	80	66	56	40	38
270	311,4	354,3	83	71	59	41	38
300	296,4	337,5	85	74	62	42	38
330	280,5	320,1	85	78	65	43	39
360	266,9	304,7	80	71	63	43	38
390	255,7	291,7	79	70	63	43	38
420	245,4	280	86	71	64	44	40
450	236,1	268,8	80	71	64	44	40
480	227,7	257,7	78	71	65	48	39
510	220,2	247,7	84	74	66	48	45
540	213,2	238,2	80	71	65	48	44
570	206,8	229,5	80	74	66	65	60
600	200,1	220,6	81	78	69	61	66
630	194,3	212,9	80	77	70	62	71
660	188,9	206,1	80	75	67	56	57
690	180,4	200,3	78	78	67	80	62
720	174,6	195,1	78	74	65	73	65
750	170,3	190,2	82	82	69	80	67
780	166,9	185,7	80	76	65	76	57
810	164,7	181,6	79	77	69	79	68
840	162,8	177,9	78	76	70	80	65
870	161,4	174,7	79	78	71	80	67
900	160,1	172	80	79	73	78	70
930	159,2	169,6	80	79	74	80	73

Tabela E15: Dados relativos ao ensaio 15 (T = 80 °C; Q = 0,2 kg.min-1).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	80	-----	-----	-----	-----
5	547,5	549,4	80	53	37	15	14
10	544,1	548	81	55	37	18	16
15	540,2	546,2	82	55	39	21	17
20	536,4	544,2	80	53	39	24	19
25	532,1	542	81	56	40	26	22
30	527,6	539,8	79	56	41	29	24
40	518,2	534,6	80	57	42	32	27
50	508,9	529,2	81	57	42	33	30
60	499,9	523,6	80	57	43	35	31
75	485,8	515,2	80	57	43	37	33
90	472,1	506,6	81	58	45	37	34
120	447,6	489,9	80	55	44	37	35
150	422,7	472,5	80	61	48	37	36
180	400,3	455,5	80	59	48	38	36
210	379,6	439,6	82	62	51	39	36
240	360,5	424	80	63	52	39	37
270	342,6	409,2	80	62	53	40	38
300	326,4	395,2	83	63	54	40	38
330	311,1	382	80	64	55	40	38
360	296,8	369,6	80	63	56	43	38
390	283,3	357,6	81	66	58	42	38
420	272,1	347	86	60	54	40	38
450	260,6	333,8	80	66	59	43	38
480	249	326	78	68	65	46	39
510	238,4	316,2	79	70	63	54	40
540	228,3	305,4	82	73	63	76	41
570	219,1	296,7	81	73	65	79	41
600	211,1	287,4	81	72	64	78	41
630	204,3	279,3	80	71	64	78	41
660	198,4	269,2	80	71	62	70	39
690	192,8	259	78	71	62	78	39
720	184,6	242,4	83	77	65	78	74
750	178,8	230,6	84	79	68	78	71
780	174,2	220,7	84	80	68	80	63
810	170,3	212,7	78	77	69	79	76
840	167,8	205,2	80	77	68	78	76
870	166,1	199,9	79	77	68	80	77
900	164,9	193,5	80	78	70	80	72
930	164,3	190,4	82	80	72	78	77
960	164,3	184,1	80	77	74	78	77
990	164,3	180,9	79	77	74	80	76
1020	163,7	177,6	80	75	76	80	75
1050	163,7	175	80	79	76	80	78
1080	163,6	172,9	80	79	77	79	79

Tabela E16: Dados relativos ao ensaio 16 – duplicata (T = 80 °C; Q = 0,2 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	80	-----	-----	-----	-----
5	547,7	549,3	80	53	39	16	15
10	544,5	548	81	54	39	19	16
15	540,5	546,3	82	55	39	21	19
20	536,5	544,5	80	55	40	24	20
25	532,2	542,3	81	56	40	26	22
30	528	540,1	79	55	41	27	24
40	518,9	535,1	80	57	42	31	27
50	509,5	529,9	81	56	42	33	30
60	500,3	524,6	80	57	42	35	32
75	486,5	516,1	80	57	43	36	33
90	473	507,6	81	57	42	37	35
120	446,9	490,2	80	58	44	37	35
150	423,5	473,5	80	60	47	38	36
180	400,4	456,3	80	60	48	39	37
210	380,8	440,1	82	62	50	40	37
240	361,5	423,8	80	65	51	40	38
270	344,2	407,8	80	68	53	40	38
300	327,9	392,5	83	67	54	41	38
330	313,7	377,7	80	67	54	42	39
360	301	364,6	80	69	56	42	38
390	288	351	81	77	62	43	40
420	276,5	338,5	86	72	60	43	40
450	267,3	327,6	80	65	57	43	39
480	257,5	315,9	78	74	63	45	41
510	248,9	305,1	79	71	63	46	41
540	241,3	295,2	82	71	63	46	41
570	234	285,1	81	71	64	48	39
600	227,3	275,2	81	74	66	47	44
630	220,5	265,1	80	73	65	51	47
660	215,8	258,3	80	71	66	52	49
690	204,9	251	78	71	65	51	45
720	195,4	243,9	83	74	66	78	49
750	188,2	230,7	83	71	69	81	54
780	182,5	220,8	82	72	65	81	70
810	178,6	213,4	78	74	67	80	71
840	175,2	206,4	81	73	68	81	69
870	172,5	200	82	72	69	82	72
900	170,4	194,3	80	76	70	80	76
930	168,4	189,6	82	74	72	80	75
960	164,3	184,1	81	76	69	81	80
990	164,3	180,9	82	75	73	81	79
1020	163,7	177,6	80	75	73	80	79
1050	163,7	175	80	76	73	80	80
1080	163,6	172,9	80	79	74	80	80

Tabela E17: Dados relativos ao ensaio 17 (T = 110 °C; Q = 0,2 kg.min-1).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	110	-----	-----	-----	-----
5	546	548,6	110	64	46	18	16
10	540,6	546,2	111	66	45	21	19
15	534,7	543,3	109	68	47	25	21
20	528,4	540,2	111	69	47	28	23
25	521,6	536,7	110	71	48	30	25
30	515,1	533	111	70	49	32	27
40	499,9	524,5	110	76	51	36	31
50	485,3	515,9	111	76	54	39	35
60	471,1	506,6	109	76	56	40	36
75	450,1	492,7	110	77	57	42	38
90	430,2	479,1	112	78	57	43	40
120	391,9	451,4	109	81	61	44	41
150	358,6	425,8	111	82	63	45	42
180	329,8	401,4	111	82	68	46	42
210	304,1	377,4	113	85	68	48	42
240	281,5	353,9	111	90	73	49	43
270	262,5	332,4	111	91	76	49	43
300	245,2	312,6	111	93	79	49	45
330	229,8	295,1	109	94	83	51	45
360	215,2	278,2	111	92	81	73	46
390	203,1	263,1	109	90	83	104	46
420	192,2	249,9	111	95	85	108	48
450	182,7	237,6	109	98	88	109	49
480	175,5	226,9	109	98	89	101	50
510	170,1	217,2	109	100	89	105	52
540	166,3	208,2	111	106	93	110	52
570	164,5	196,3	110	109	91	111	54
600	163,7	186,8	110	109	95	108	62
630	163,5	180,3	110	110	96	109	69
660	163,2	174,8	110	110	98	110	74
690	163,2	170,9	110	110	98	110	80

Tabela E18: Dados relativos ao ensaio 18 - duplicata (T = 110 °C; Q = 0,2 kg.min⁻¹).

tempo (min)	Massa b 1 (g)	Massa b 2 (g)	Termopar 1 (°C)	Termopar 2 (°C)	Termopar 3 (°C)	Termopar 4 (°C)	Termopar 5 (°C)
0	550	550	110	-----	-----	-----	-----
5	546,2	548,6	110	66	47	18	16
10	540,6	546,2	111	70	51	21	21
15	534,2	543,5	109	73	51	24	24
20	527	540	111	75	54	27	26
25	521	536,8	110	75	54	30	28
30	514,2	533,1	111	75	54	32	30
40	500,7	525,3	110	77	57	37	33
50	487	517,1	111	78	58	40	36
60	473,1	508,7	109	76	59	41	38
75	453,1	495,4	110	77	62	43	40
90	433,5	481,5	112	75	63	43	41
120	403,5	453,7	109	84	68	46	42
150	364,5	426,5	111	87	67	47	42
180	336,4	401,3	111	89	74	48	43
210	312,3	378,9	113	93	77	49	43
240	290,9	358,3	111	95	76	51	43
270	272,6	338,8	111	93	79	51	44
300	256,1	321	111	96	80	53	45
330	241,7	304,1	109	98	82	56	46
360	228,5	287,3	111	98	84	56	47
390	216,8	271,2	109	94	83	69	46
420	197,9	249,6	111	93	77	65	43
450	183,9	230,6	109	95	82	69	41
480	173,4	213,6	109	102	81	77	49
510	167	200,1	109	99	82	88	73
540	162,7	188,5	111	101	91	105	76
570	160,7	179,7	111	104	95	111	77
600	160,2	173,1	110	109	95	109	87