

# **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

**Rodrigues Pascoal Castro**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2<sup>o</sup> ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires

**Covilhã, Setembro de 2022**


# **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

# Declaração de Integridade

Eu, Rodrigues Pascoal Castro, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M10109 do curso de Mestrado em Engenharia Eletromecânica da Faculdade Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 22 / 09 / 2022

  
\_\_\_\_\_

## **Dedicatória**

Dedico a minha Família e aos meus amigos no geral e em especial a minha falecida irmã  
Ruth Domingos Augusto

## **Agradecimentos**

A Deus, pela saúde e vida. A minha família, em especial à minha Querida Mãe Emília Paulino Pascoal e aos Meus Irmãos pela força e apoio.

Ao Senhor Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires minha gratidão, por ter sido meu orientador ao longo deste trabalho, com acompanhamento e auxílio académico e ao Professor Doutor José Manuel Santos Cruz e ao Tenente General Jaime Manuel Pombo Vilinga pela confiança e o apoio sempre.

Aos meus Amigos, pelo incentivo e apoio.

# **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

## **Prefácio**

Se algum de vocês tem falta de sabedoria, peça-a a Deus, que a todos dá livremente, de boa vontade; e lhe será concedida.

Tiago 1:5

# **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

## **Resumo**

Nos últimos anos tem-se assistido ao aumento da produção de lamas residuais, resultado de maiores exigências em termos de tratamento de águas residuais urbanas bem como do acréscimo da população servida por Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), o que representa um problema atual de extrema importância. Descartando a possibilidade de redução das quantidades produzidas, as estratégias corretas de gestão destes resíduos recomendam a valorização agrícola, ou energética, mas dão também a possibilidade de deposição em aterro. A valorização agrícola é apoiada numa legislação sustentada e pela posição da Comissão Europeia que incentiva a utilização na agricultura, fazendo com que esta se assuma como uma solução privilegiada nos solos europeus, deficitários em matéria orgânica. Esta estratégia define uma sequência de tratamento de modo a tornar possível a posterior valorização ou o descarte em aterros, apresentando no final, uma humidade acima de 80%. Esta elevada humidade dificulta e encarece a gestão por parte dos operadores deste tipo de resíduo. Contudo, a secagem térmica permite baixar esta humidade para valores da ordem de 20% ou menos, reduzir consideravelmente o volume, eliminar os agentes patogénicos e reduzir os maus odores.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar as características específicas do composto, Fertagri IIA, relevantes para o processo de secagem. A avaliação proposta traz consigo o estudo de cinco grandezas em quatro ensaios diferentes, o que se traduz numa diversidade de informações para melhor representatividade do processo de secagem. O estudo foi desenvolvido com base em resultados experimentais de secagem realizados em estufa. O composto utilizado para o estudo é proveniente do Centro de Valorização de Resíduos de Castelo Branco. Com base nos resultados experimentais foram feitas comparações da massa evaporada em função do tempo de ensaio para cada tipo de ensaio realizado. Os valores obtidos foram comparados com alguns ensaios semelhantes e provou-se que estão dentro dos valores que são típicos para este tipo de compostos e gama de temperaturas ensaiadas. São analisadas, também, as influências dos parâmetros estudados no processo de secagem do composto. Conclui-se que as grandezas estudadas, com exceção da distância entre as bandejas, são parâmetros importantes no processo de secagem de compostos orgânicos e que a utilização de uma superfície perfurada para dispor o composto apresenta melhor desempenho em comparação com a utilização de uma superfície lisa.

## **Palavras-chave**

Compostos orgânicos; Lamas residuais; tecnologia de secagem.

# **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

## **Abstract**

In recent years, there has been an increase in the production of waste sludge, as a result of greater demands in terms of urban waste water treatment as well as the increase in the population served by ETAR, which represents a current problem of extreme importance. Discarding the possibility of reducing the quantities produced, the correct strategies for managing these wastes recommend agricultural or energy recovery, but also provide the possibility of landfilling. Agricultural valorisation is supported by sustained legislation and by the position of the European Commission that encourages its use in agriculture, making it assume itself as a privileged solution in European soils, which are deficient in organic matter. This strategy defines a treatment sequence in order to make possible the subsequent recovery or disposal in landfills, presenting in the end, a humidity above 80%. This high humidity makes it difficult and expensive for operators to manage this type of waste. However, thermal drying makes it possible to lower this humidity to values of the order of 20% or less, considerably reducing the volume, eliminating pathogens and reducing bad odors.

The present work aims to evaluate the specific characteristics of the compound, Fertagri IIA, relevant to the drying process. The proposed evaluation brings with it the study of five magnitudes in four different tests, which translates into a diversity of information for better representation of the drying process. The study was developed based on experimental results of drying carried out in an oven. The compost used for the study comes from the Castelo Branco Waste Recovery Center. Based on the experimental results, comparisons of the evaporated mass as a function of test time were made for each type of test performed. The values obtained were compared with some similar tests and proved to be within the values that are typical for this type of compounds and temperature range tested. The influences of the parameters studied in the drying process of the compost are also analyzed. It is concluded that the quantities studied, with the exception of the distance between the trays, are important parameters in the drying process of organic compounds and that the use of a perforated surface to arrange the compound presents better performance compared to the use of a smooth surface.

**Keywords** Organic compounds; residual sludge; drying technology.

# **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Relevância e enquadramento do tema . . . . .	1
1.2	Objetivos e contribuições da dissertação . . . . .	2
1.3	Estrutura da dissertação . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Estado da Arte - Secagem de composto orgânico</b>	<b>5</b>
2.1	Conceito de composto orgânico . . . . .	5
2.1.1	Tipos de lamas . . . . .	5
2.1.2	Processo de tratamento de lamas residuais . . . . .	7
2.1.3	Legislação sobre a gestão das lamas residuais . . . . .	8
2.2	Secagem de composto . . . . .	9
2.2.1	Fundamentos teóricos . . . . .	9
2.3	Tecnologias/equipamentos de secagem . . . . .	11
2.3.1	Secadores de tambor rotativos . . . . .	11
2.3.2	Secador flash ou pneumático . . . . .	12
2.3.3	Secadores de disco . . . . .	13
2.3.4	Secadores em cascata . . . . .	13
2.3.5	Secadores a vapor superaquecido . . . . .	13
2.3.6	Secador de radiofrequência e micro-ondas . . . . .	16
2.3.7	Secagem por indução . . . . .	16
2.3.8	Secagem por combustão de pulso . . . . .	17
2.4	Consumo de energias . . . . .	18
2.4.1	Energia de biomassa . . . . .	18
2.4.2	Fonte de energia solar . . . . .	18
2.5	Escolha do secador . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Materiais e métodos</b>	<b>21</b>
3.1	Materiais utilizados . . . . .	21
3.1.1	Metodologia de ensaio . . . . .	22
3.1.2	Tipos de ensaios realizados . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Resultados e discussão</b>	<b>27</b>
4.1	Resultados experimentais dos ensaios do tipo A . . . . .	27
4.2	Resultados experimentais dos ensaios do tipo B . . . . .	28
4.3	Resultados experimentais dos ensaios do tipo C . . . . .	29
4.4	Resultados experimentais do ensaio do tipo D . . . . .	30
4.5	Análise dos parâmetros variados . . . . .	31
4.5.1	Influência da massa no processo de secagem do Fertagri IIA . . . . .	31
4.5.2	Influência da temperatura no processo de secagem do Fertagri IIA . . . . .	32
4.5.3	Influência do número de andares da plataforma de secagem no processo de secagem do Fertagri IIA . . . . .	33
4.5.4	Influência das distâncias entre as bandejas no processo de secagem do Fertagri IIA . . . . .	34
4.5.5	Influência das características das bandejas de secagem no processo de secagem do Fertagri IIA . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Conclusão e Trabalho Futuro</b>	<b>37</b>
5.1	Trabalho Futuro . . . . .	37

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

<b>Bibliografia</b>	<b>39</b>
5.2 Anexo A . . . . .	43
5.3 Anexo B . . . . .	44
5.4 Anexo C . . . . .	45
5.5 Anexo D . . . . .	46

# Lista de Figuras

1.1	Tanque de retenção de águas residuais, Fonte: baseado em [1] . . . . .	1
2.1	Esquema de tratamento da fase líquida e sólida de uma ETAR (adaptado de João V. Lis, 2017) [2] . . . . .	6
2.2	Secadores de tambor rotativo de passagem única [3] . . . . .	12
2.3	Esquema de secador de flash simples: 1- Ventilador; 2- aquecedor; 3- orifício; 4- parafuso sem-fim; 5- reservatório; 6- conduta de secagem; 7-ciclone; 8-ventilador de exaustão; 9-saída do produto seco [4] . . . . .	14
2.4	Secador de discos rotativos [5] . . . . .	14
2.5	Vista lateral de um secador em cascata [6] . . . . .	14
2.6	Design básico de secador a vapor superaquecido [6] . . . . .	15
2.7	Secador ROTEK: princípio do aquecimento por indução:a. Tambor rotativo; b. Carga terciária; c. Barra de barramento secundária; e d. núcleo do transformador de ferro-silício [6] . . . . .	17
3.1	Composto estudado Fertagri IIA . . . . .	23
3.2	Bandejas de secagem: a superfície lisa tem a designação de Bandeja A; a superfície perfurada tem a designação de Bandeja B . . . . .	23
3.3	Plataforma de secagem com 3 andares usado na experiência . . . . .	23
3.4	Estufa CARBOLITE usada na experiência; b. Balança de precisão da A&D COMPANY, LIMITED modelo FZ-3000i . . . . .	24
3.5	Datalogger com duas entradas para termopar, Fluke 54 II B . . . . .	24
4.1	Variação da massa para os ensaios do tipo A . . . . .	28
4.2	Análise dos resultados para os ensaios do tipo B . . . . .	28
4.3	Análise dos resultados para os ensaios do tipo C, com a plataforma de secagem A. . . . .	29
4.4	Análise dos resultados para os ensaios do tipo C, com a plataforma de secagem B . . . . .	29
4.5	Análise dos resultados para os ensaios do tipo D, com a plataforma de secagem A . . . . .	30
4.6	Análise dos resultados para os ensaios do tipo D, com a plataforma de secagem B . . . . .	31
5.1	Dados do ensaio do tipo A . . . . .	43
5.2	Dados do ensaio do tipo B . . . . .	44
5.3	Dados do ensaio do tipo C . . . . .	45
5.4	Dados do ensaio do tipo D . . . . .	46

# **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

# Lista de Tabelas

3.1	Matérias constituintes do composto Fertagri IIA . . . . .	23
3.2	Parâmetros definidos para os ensaios realizados (* nestes ensaios foi usado apenas a bandeja B) . . . . .	25
4.1	Comparação entre o ensaio do tipo A e C, para a plataforma A . . . . .	30
4.2	Comparação entre o ensaio do tipo A e C, para a plataforma B . . . . .	30
4.3	Comparação entre o ensaio do tipo A e C, para a plataforma A . . . . .	32
4.4	Percentagens de massa evaporadas para os ensaios do tipo B . . . . .	32
4.5	Comparação das percentagens de massa evaporadas para o ensaio do tipo A vs C, para a plataforma A . . . . .	33
4.6	Comparação das percentagens de massa evaporadas para o ensaio do tipo A vs C, para a plataforma B . . . . .	34
4.7	Percentagens de massa evaporadas para o ensaio do tipo D . . . . .	34
4.8	Comparação entre as plataformas de secagens, para o ensaio do tipo A . .	35
4.9	Comparação entre as plataformas de secagens, para o ensaio do tipo B . .	35
4.10	Comparação entre as plataformas de secagens, para o ensaio do tipo C . .	36
4.11	Comparação entre as plataformas de secagens, para o ensaio do tipo D . .	36

# **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

## **Lista de Acrónimos**

<b>UBI</b>	Universidade da Beira Interior
<b>AR</b>	Águas Residuais
<b>ARD</b>	Água Residuais Domésticas
<b>ART</b>	Águas Residual Tratada
<b>ARI</b>	Águas Residuais Industriais
<b>ARU</b>	Água Residual Urbana
<b>CE</b>	Comité Europeu
<b>CEN</b>	Comité Europeu de Normalização
<b>CVR</b>	Centro de Valorização de Resíduos
<b>DEM</b>	Departamento de Engenharia Eletromecânica
<b>ETAR</b>	Estação de Tratamento de Águas Residuais
<b>LR</b>	Lamas Residuais
<b>OMS</b>	Organização Mundial da Saúde
<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>OIT</b>	Organização Internacional do Trabalho
<b>UE</b>	União Europeia
<b>RF</b>	Radiofrequência

# **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo é enquadrado o tema do estudo dos parâmetros de secagem de compostos orgânicos tendo em conta o atual contexto socioeconómico, ambiental e político em vigor em Portugal. É também realizada uma revisão bibliográfica, através da consulta de relatórios, artigos e estudos recentes do sector de secagem, com o intuito de dar a conhecer a situação atual do setor. São ainda apresentados os objetivos e contribuições deste trabalho. Por fim, é abordada a estrutura da presente dissertação.

### 1.1 Relevância e enquadramento do tema

Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2017, atualmente, cerca de 2.2 bilhões de pessoas não têm acesso a água potável e 4.2 bilhões vivem sem saneamento adequado e é esperado que os efeitos das alterações climáticas aumentem estes números, se nada for feito. Estima-se que, até 2050, entre 3.5 e 4.4 bilhões de pessoas terão acesso limitado à água [7]. A solução para esta problemática passa por aumentar os investimentos em bacias hidrográficas, melhorias na eficiência do uso da água e nas infraestruturas de tratamento de Águas Residuais (AR). O mesmo relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) destaca que, atualmente, 80 % dos efluentes do mundo são despejados sem o devido tratamento no meio ambiente. AR é essencialmente a água utilizada e eliminada na comunidade após o seu uso e contaminação durante os diferentes usos para os quais foram submetidas. A essa água residual, normalmente acrescem as águas residuais industriais e as águas pluviais igualmente contaminadas, formando o que se designa por Água Residual Urbana (ARU). Na figura 1.1, podemos ver uma estrutura artificial utilizada para conter águas residuais durante um período de tempo limitado.



Fig. 1.1: Tanque de retenção de águas residuais, Fonte: baseado em [1]

Neste relatório da ONU argumenta-se que, uma vez tratadas, as águas residuais AR poderiam se tornar fontes importantes para satisfazer a crescente procura por água doce e outras matérias-primas. "As águas residuais são um recurso valioso em um mundo no qual a água é finita e a procura é crescente", afirma Guy Ryder, presidente da interagência da ONU Água e diretor-geral da Organização Internacional do Trabalho (OIT).

Paradoxalmente, o tratamento das AR nas ETAR faz surgir um outro grande problema que são as Lamas Residuais (LR). As LR ou lamas de ETAR, são resíduos de natureza orgânica que resultam do tratamento de AR, domésticas ou da atividade agropecuária, em estações

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

de tratamento próprias, designadas por ETAR [8]. De acordo com os dados reportados pela Eurostat, em 2019, a Alemanha, Espanha, Reino Unido, e França são os países com maiores produções de lamas. Sendo a Alemanha o país que gerava maior quantidade de lamas com um valor superior a um milhão e meio de toneladas. O último dado reportado pela Eurostat sobre a mesma produção em Portugal foi de 119,17 toneladas em 2016 [9]. O descarte inapropriado destas grandes quantidades de LR pode tornar o processo de tratamento das AR prejudiciais, visto que elas apresentam matérias orgânicas e inorgânicas que, quando não tratadas, podem ser uma grande fonte de poluição ambiental. Mas por outro lado, quando bem tratadas, podem ser uma mais valia ambiental, social e económica [10].

De entre os possíveis tratamentos das LR, destacam-se a incineração, deposição em aterro e a valorização na agricultura. A deposição em aterro, à semelhança da incineração, não permite tirar partido do valor fertilizante das LR e goza de má imagem pública, além de que a incineração é comparativamente cara e só deve ser-lhe dada preferência quando for possível o aproveitamento energético ou quando estamos em presença de lamas fortemente contaminadas por substâncias tóxicas prejudiciais que inviabilizam a sua aplicação na agricultura [11]. Portanto, a aplicação das lamas na agricultura é a opção privilegiada na União Europeia (UE), permite tirar partido do seu valor fertilizante na melhoria da fertilidade física e química dos solos e do estado nutritivo das culturas.

Portanto, o correto processo de gestão e tratamento das LR, envolve o tratamento das lamas, armazenamento das lamas, transporte das lamas e o destino final para as lamas. Destas, o transporte e armazenamento das lamas surgem como operações inevitáveis dentro das ETAR, podendo representar uma parcela significativa no custo total da gestão de lamas. O conteúdo de água das LR pode chegar aos 99 % da massa total. Isto apresenta-se como um impedimento no correto processo de gestão das LR, devido aos elevados custos de operação dos tratamentos posteriores neste estado [12]. Além de possuírem baixa densidade e heterogeneidade de tamanho e forma que dificultam a manipulação, transporte, armazenamento e utilização destas LR no seu estado natural [13] [4] [14]. De modo a possibilitar um armazenamento mais fácil, transporte com custos reduzidos e a possibilidade de valorização deste resíduo, é importante reduzir o elevado conteúdo de água das LR através de um processo de secagem, diminuindo assim a sua massa e volume.

Assim, para a transformação de LR em um recurso de fácil utilização é recorrido geralmente as tecnologias de secagem, que permitem a remoção de substâncias voláteis (humidade) para obter um produto sólido, aumentar o poder calorífico e melhorar a eficiência na combustão de alguns materiais, melhor conservação e armazenamento permitindo a facilidade de manusear, reduz o custo de transporte, alcançando a qualidade desejada, facilitam o uso final, etc. A secagem é também aplicada nas indústrias química, agrícola, biotecnológica, alimentar, de polímeros, cerâmica, farmacêutica, da polpa e pasta de papel, mineral e de processamento de madeira.

Assim, o presente trabalho pretende estudar o processo de secagem de um composto que inclui na sua composição LR de ETAR, utilizando uma instalação de secagem que permita secar estas lamas em regime de convecção forçada.

### **1.2 Objetivos e contribuições da dissertação**

O objetivo principal da presente dissertação é avaliar as características específicas deste composto relevantes para o processo de secagem e que possa ser aplicada a um sistema de secagem industrial.

Os objetivos específicos programados para alcançar o objetivo principal são os seguintes:

- Analisar a legislação aplicável ao tratamento das águas residuais e gestão de lamas

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

residuais de ETAR;

- Analisar as tecnologias de secagem existentes;
- Realizar estudos experimentais de secagem de compostos e analisar a influência das grandezas estudadas nos ensaios;

Após alcançar estes objetivos, acredita-se que será possível disponibilizar dados referentes ao composto orgânico com as características estudadas.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação é composta por cinco capítulos, cuja descrição é apresentada de forma sucinta de seguida.

- Capítulo 1 – **Introdução** – é enquadrado o tema da produção das LR de ETAR, tendo em conta o atual contexto socioeconómico, ambiental em vigor em Portugal. É ainda realizada uma breve revisão bibliográfica, através da consulta de literatura sobre o setor das lamas residuais, com o intuito de dar a conhecer a situação atual do tema e a sua relevância;
- Capítulo 2 – **Estado da Arte - Secagem de composto orgânico** – é abordado a secagem de compostos orgânicos, onde é apresentando o conceito de compostos orgânicos e, mais concretamente, as LR. Nessa análise, é dado particular foco ao processo de secagem de lamas residuais, a legislação aplicada na UE, com maior foco na legislação portuguesa. São também abordados os fundamentos do processo de secagem das lamas e as tecnologias de secagem existentes;
- Capítulo 3 – **Materiais e métodos** – serão descritas, de uma forma geral, a instalação experimental e as técnicas utilizadas na realização do presente ensaio. Serão descritas também as matérias e métodos usados para a obtenção dos resultados;
- Capítulo 4 – **Resultados e discussão** – é então efetuada a análise e discussão de resultados. Inicialmente é feita a apresentação dos aspetos práticos dos ensaios experimentais. De seguida é feita a apresentação dos resultados dos quatro tipos de ensaios realizados através de gráficos construídos com os dados obtidos ao longo dos ensaios. Posteriormente são analisados os parâmetros variados ao longo dos ensaios e comparados os dados obtidos através de tabelas elaboradas com a massa evaporada em cada sessão. Por último será avaliada a influência das variáveis destes parâmetros de secagem;
- Capítulo 5 – **Conclusão e Trabalho Futuro** – são anunciadas as conclusões referentes à elaboração do presente trabalho e são propostos alguns caminhos para trabalhos a desenvolver no futuro sobre o processo de secagem dos compostos orgânicos.

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

# Capítulo 2

## Estado da Arte - Secagem de composto orgânico

Neste capítulo é enquadrada a temática de secagem de compostos orgânicos para diferentes aplicações tendo em consideração o atual contexto legislativo em vigor em Portugal. Antes foi feita uma apresentação concetual do composto orgânico, através de leitura de artigos e estudos recentes do sector de fertilizantes, com o intuito de dar a conhecer o setor de estudo.

No decorrer deste capítulo serão apresentados conceitos sobre composto, a legislação, os tipos de composto e a sua produção, a secagem dos diferentes tipos de composto, e tecnologias de secagem convencionais, bem como a incorporação de fontes de energias renováveis.

### 2.1 Conceito de composto orgânico

Composto orgânico é o nome dado ao produto sólido gerado ao fim do processo de compostagem e que, de maneira geral, possui propriedades fertilizantes [15]. O processo da compostagem é um processo onde microrganismos diversificados são responsáveis pela degradação da matéria orgânica.

Dependendo do tipo da água encaminhada para a ETAR e dos tratamentos a que as AR submetidas, as LR podem apresentar variações na sua composição, mas são na sua maioria resíduos de natureza orgânica. As AR são constituídas basicamente por uma mistura de água, sólidos orgânicos e minerais, sendo 99,9 % de água e 0,1 % de sólidos [11]. Do total de sólidos, aproximadamente 70 % são materiais orgânicos, os restantes 30 % são constituídos por materiais inorgânicos [15].

#### 2.1.1 Tipos de lamas

Como já dito no capítulo 1, as LR são resultado do tratamento das AR, portanto os tipos de LR que resultam dependem do processo de tratamento em que foi obtido as AR. De um modo geral, existem dois tratamentos distintos nas ETAR. Um desses tratamentos corresponde ao tratamento da fase líquida (AR) e que se subdivide em quatro fases de tratamento, designadas por tratamento preliminar, primário, secundário e terciário. O outro tratamento que corresponde ao tratamento da fase sólida (LR) e pode ser mecânico, como o espessamento e desidratação, pode ser químico, biológico ou térmico, tal como a estabilização, o condicionamento e a secagem térmica.

Na Figura 2.1 apresenta-se um diagrama esquemático de uma linha de tratamento de águas residuais urbanas numa ETAR, com as diferentes as etapas do tratamento da fase líquida (água residual) e da fase sólida (lama residual).

O tratamento preliminar corresponde as operações físicas e mecânicas que separam os elementos que possam prejudicar as etapas posteriores de tratamento (sólidos, areias, gorduras, etc.).

O tratamento primário, também designado por sedimentação primária, pode ser constituído por processos físicos e químicos. Consiste na eliminação da maior parte possível dos

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

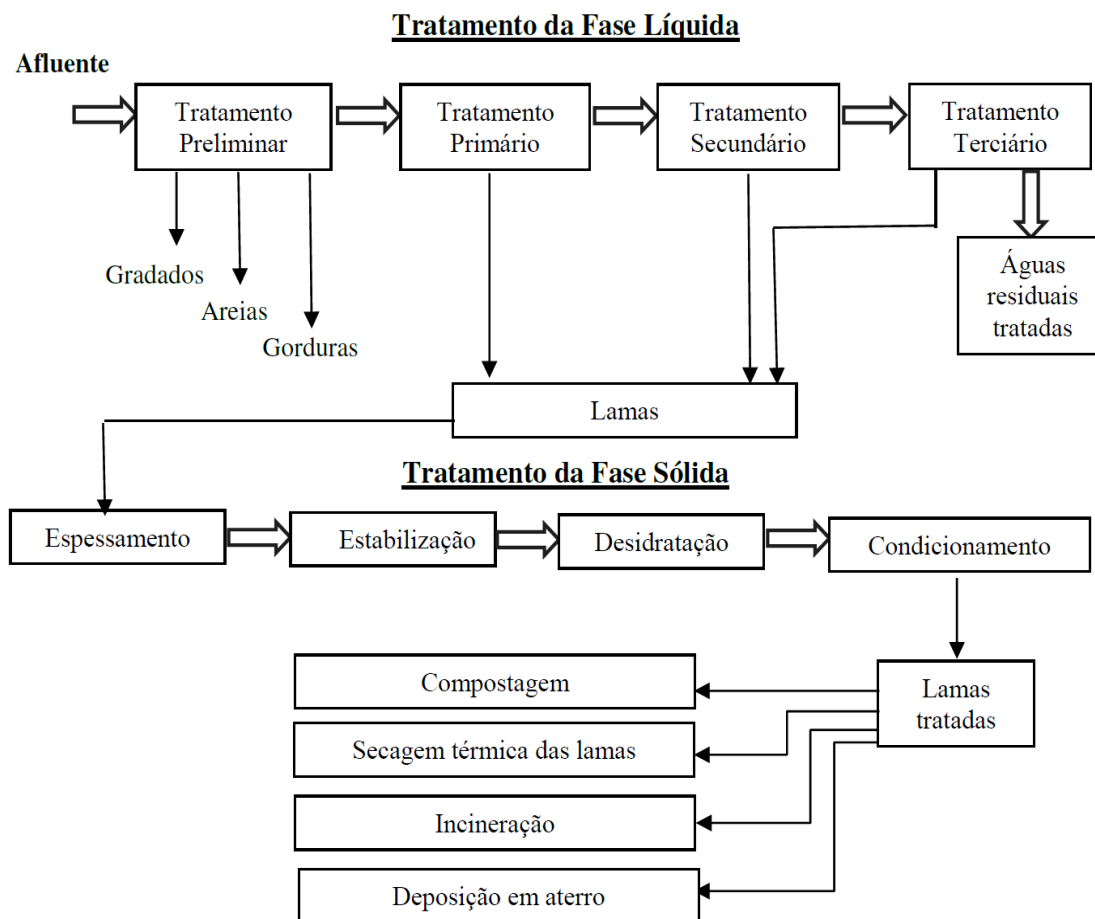


Fig. 2.1: Esquema de tratamento da fase líquida e sólida de uma ETAR (adaptado de João V. Lis, 2017) [2]

sólidos sedimentares e flutuantes, bem como de parte da matéria orgânica. Estas matérias eliminadas são designadas de lamas primárias.

O tratamento secundário é constituído geralmente por processos biológicos, mediante o qual se visa eliminar a matéria orgânica biodegradável em forma coloidal, dissolvida ou suspensa, existente na AR, bem como o resto dos sólidos e componentes presentes que não foram retirados através de tratamento primário. O processo ocorre colocando a AR em contacto com um meio “rico” em microrganismos que vão metabolizar essa matéria orgânica, retirando-a da fase líquida e incorporando-a na fase sólida, resultando assim a água tratada limpa. A esta matéria retirada dá-se a designação de lamas residuais secundárias e os processos biológicos descritos podem ser aeróbios, anaeróbios, anóxicos e processos mistos.

O tratamento terciário é um processo complementar das etapas anteriores de tratamento, quer pela exigência de qualidade do meio recetor da água quer pelos usos previstos para o mesmo. Durante o processo higieniza-se e adequa-se a AR para que possa ser lançada em zonas com requisitos mais exigentes, ou para ser regenerada para um uso concreto. De forma geral, esta etapa procura a eliminação de poluentes e agentes patogénicos que se mantêm na água após terem passado pelos tratamentos anteriores. Durante este processo de tratamento podem ainda ser obtidas pequenas quantidades de lamas que seriam designadas por lamas residuais terciárias.

Como descrito, durante a sequência de tratamento das AR formam-se três tipos de AR designadas por lamas primárias, lamas secundárias e lamas terciárias. Estas lamas são matérias semissólidas e heterogéneas, cuja composição é muito variável e está determi-

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

nada pelas características da água residual tratada Águas Residual Tratada (ART), pelos processos de tratamentos empregados e pelo tratamento a que é submetida a lama [16]. Portanto, fase sólida (lamas residuais) são subprodutos indesejáveis das AR que necessitam de tratamento de modo a reduzir o seu volume e serem espessadas, estabilizadas, condicionadas e desidratadas para posterior utilização como adubo para conseguir recuperar a produtividade natural do solo, tanto com fins agrícolas ou reflorestação, para deposição em aterro sanitário e emprego de tecnologias térmicas.

### **2.1.2 Processo de tratamento de lamas residuais**

Em função das características das lamas, estas poderão ser submetidas a diferentes tipos de tratamentos, como pode ser visto na figura 2.1. Nomeadamente os tratamentos podem ser:

- Operações preliminares;
- Espessamento;
- Estabilização;
- Condicionamento;
- Desidratação e, em algumas ETAR, a desinfecção.

Estas operações influenciam nas características físicas e químicas da lama final. Serão essas características finais que irão aferir qual o destino final mais adequado.

O tratamento das LR em algumas ETAR começa nas operações preliminares, que, tal como o nome indica, são as operações a que as lamas são sujeitas previamente ao processo de tratamento propriamente dito. Estas operações visam sobretudo facilitar os tratamentos posteriores, garantir um caudal constante e homogêneo e diminuir os custos no tratamento das lamas [17]. São consideradas operações preliminares: a trituração, a gradagem, a mistura e o armazenamento.

O espessamento é a operação responsável pelo aumento da concentração de sólidos e consequente diminuição de volume das lamas provenientes dos decantadores, que são os equipamentos responsáveis por garantir a separação de substâncias líquidas ou sólidas que não devem ser misturadas, removendo uma porção da fração líquida das mesmas [17]. O espessamento é um processo físico e pode ser feito por espessamento gravítico, flotação por ar dissolvido, mesas de espessamento, tambor rotativo ou, também, por meio de equipamento de processamento da matéria orgânica designados digestores anaeróbios e bacias de armazenamento de lamas. O objetivo do espessamento das lamas é a diminuição do volume de lamas e a concentração dos sólidos, de modo a reduzir os custos de transporte e eventuais operações subsequentes.

A estabilização é um processo de alteração das lamas, visando principalmente a degradação biológica da matéria orgânica, através da conversação dos sólidos biodegradáveis em produtos finais não celulares, a redução dos odores, tornando as lamas menos agressivas para o ambiente, além de conduzir, geralmente, a uma diminuição do número de organismos patogénicos, bem como, a um declínio da quantidade de lamas, reduzindo as despesas dos processos posteriores. A estabilização visa reduzir a quantidade de organismos patogénicos presentes; eliminar odores ofensivos e inibir, reduzir ou eliminar o potencial para a putrefação de lamas. Entre os métodos empregues para a estabilização das lamas, destacam-se como os mais usados: a estabilização química e a compostagem, ambas para lamas já desidratadas, a digestão anaeróbia e digestão aeróbia para lamas espessadas.

Se o destino das lamas passa pela utilização na agricultura, a redução de patogénicos, por qualquer método de estabilização, deve ser um dos principais aspetos a considerar. Por

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

outro lado, quando o destino das lamas é a desidratação e posterior incineração, opta-se frequentemente por não proceder à sua estabilização [11]. Depois destes processos, as lamas apresentam ainda um elevado conteúdo de água.

O condicionamento de lamas é um processo integrado em muitas instalações de tratamento que visa sobretudo melhorar as características de desidratação das lamas otimizando as suas etapas. Além desta função principal, o condicionamento permite também a desinfeção dos sólidos das águas residuais, o controlo dos odores, a alteração física dos sólidos e promove a recuperação destas lamas. Os métodos mais comuns envolvem a adição de químicos, tratamento físico e o tratamento térmico [11].

A desidratação das lamas tem como objetivo reduzir a humidade e o volume para facilitar o transporte. Pode ser concretizada usando dois tipos de processos: natural ou mecânico. Os processos naturais incluem: evaporação e percolação em leitos de secagem. Nos processos mecânicos são usados equipamentos como centrifugadoras, filtros de prensa ou filtros de banda, entre outros. Esta última etapa de tratamento da fase sólida pode reduzir o volume final das lamas em 90 % [11].

Em algumas ETAR aplica-se também o processo de desinfeção, visando sobretudo destruir ou inativar os organismos patogénicos que a lama possa conter, de modo a minimizar os problemas de saúde pública que possam surgir durante o seu manuseio ou utilização.

### 2.1.3 Legislação sobre a gestão das lamas residuais

Com o objetivo de assegurar a proteção do meio ambiente e da saúde pública existe legislação europeia e nacional aplicável à gestão das lamas das ETAR, e que define claramente as competências e responsabilidades das entidades licenciadoras, fiscalizadoras, produtoras e dos operadores na gestão deste material [18]. Grande parte da legislação existente em Portugal é transposta das Diretivas da União Europeia. Em seguida, são apresentados alguns dos diplomas legislativos existentes a nível europeu e nacional sobre esta temática:

- Decreto-Lei n.º 103/2015 de 15 de junho

Clarifica e concentra todas as regras, entre outras, de matérias não harmonizadas e, concretamente, a utilização dos compostos. O objetivo foi o de disponibilizar um quadro legislativo com maior clareza jurídica, que permita uma mais correta colocação no mercado das matérias fertilizantes assegurando a execução na ordem jurídica interna das obrigações decorrentes do Regulamento (Comité Europeu (CE)) n.º 2003/2003, de 13 de outubro de 2003, relativo aos adubos. Foram revogadas as anteriores normas, a saber: Decreto-Lei n.º 190/2004, de 17 de agosto, alterado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, e a Portaria n.º 1322/2006, de 24 de novembro [19][20].

- Diretiva n.º 91/692/CEE do Conselho, de 23 de Dezembro;

A diretiva n.º 91/692/CEE regula a utilização das lamas de ETAR na agricultura, de forma a evitar efeitos nocivos no homem, na água, nos solos, na vegetação e nos animais, promovendo a sua correta utilização.[21].

- Diretiva n.º 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de junho de 1986
- Decreto-Lei n.º 118/2006, de 21 de junho

A Diretiva n.º 86/278/CEE estabelece o regime jurídico da utilização agrícola das lamas de ETAR e demais legislação regulamentar, e foi transposta para a ordem jurídica interna no Decreto-Lei n.º 118/2006, revogando o Decreto-Lei n.º 446/91, de 22 de Novembro [22][23].

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

- Decreto-Lei n.º 276/2009, de 02 de outubro

Adequa e torna mais simples o procedimento de licenciamento da utilização agrícola das lamas de depuração nele previsto e harmoniza esse procedimento com os outros regimes jurídicos entretanto aprovados[24].

Comparativamente com os restantes países da União Europeia, a legislação portuguesa é uma das mais restritivas em matéria de valorização agrícola, nomeadamente estabelecendo os critérios microbiológicos mais restritivos [25]. Estes diplomas dispõem sobre requisitos de qualidade para as lamas e para os solos, verificáveis através da conformidade das análises requeridas com os valores limite estabelecidos, definem um conjunto de restrições à utilização das lamas no solo assim como à sua inceneração. As alterações feitas constantemente visam tornar a legislação mais simplificada e agilizar o procedimento de licenciamento da atividade de gestão, facilitando o respetivo exercício, sem, no entanto, descuidar as exigências crescentes do ponto de vista da salvaguarda dos valores ambientais e da saúde humana.

### **2.2 Secagem de composto**

A humidade na lama pode atingir um valor aproximado de 99 % [12]. A secagem de compostos, que incluem na sua composição as lamas residuais de ETAR é um processo complexo e têm merecido bastante atenção dentro das áreas de investigação e desenvolvimento por terem características consideradas únicas e que o tornam uma área fascinante e desafiante.

#### **2.2.1 Fundamentos teóricos**

A secagem de compostos consiste em reduzir o seu conteúdo de água, o volume e em estabilizar a matéria orgânica de modo a controlar possíveis efeitos adversos [26]. Existem dois métodos de secagem de compostos:

- Secagem mecânica;
- Secagem térmica.

Considera-se método de secagem mecânica quando são utilizados equipamentos de trituração, moagem, prensagem, filtragem, centrifugação, extrusão, sedimentação ou uma combinação desses processos. Frequentemente, é aplicado para remover o nível de humidade em torno de 50 % do peso e é considerado se o conteúdo de água do material estiver acima de 50 % do peso [27].

Quanto ao método de secagem térmica é a operação de secagem que converte uma matéria-prima sólida, semissólida, ou líquida, num produto sólido por evaporação do líquido através da aplicação do calor. Mudança de fase e obtenção de uma fase sólida como produto final são características essenciais do processo de secagem. A secagem térmica é frequentemente usada após a secagem mecânica para reduzir ainda mais o conteúdo de água a um nível mais baixo. Durante a secagem térmica a água é evaporada e removida do composto. A secagem das lamas por meios mecânicos realizados nas ETAR reduz ligeiramente o conteúdo de água para valores da ordem de 80 %. Para se baixar desse valor, as lamas terão de ser submetidas a um processo de secagem térmica [28], porque permite reduções significativas dos volumes de lamas produzidas e conseqüentemente a redução do custo associado as linhas de tratamento situadas a jusante, ao armazenamento e ao seu transporte para destino final. Outro objetivo muito importante da secagem térmica é a destruição dos organismos patogénicos presentes nas lamas a secar [29].

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

Portanto, quando um sólido húmido é submetido a secagem térmica, dois processos ocorrem simultaneamente:

1. Transferência de energia (principalmente como calor) do ambiente circundante para evaporar a humidade da superfície;
2. Transferência de água do interior para a superfície do sólido e sua evaporação subsequente devido a processo anteriormente descrito.

A taxa a que a secagem é realizada rege-se pela taxa a que os dois processos prosseguem. A transferência de energia como calor do ambiente circundante para o sólido molhado pode ocorrer como resultado de convecção, condução, radiação ou dielétrico e em alguns casos como resultado de uma combinação destes efeitos.

1. A remoção da água como vapor da superfície do material depende das condições externas de temperatura, humidade do ar e fluxo, área de superfície exposta e pressão;
2. O movimento da humidade internamente dentro do sólido, é uma função da natureza física do sólido, da temperatura e do seu conteúdo de água.

Numa operação de secagem qualquer um destes processos pode ser o fator limitativo que rege a taxa de secagem, embora ambos procedam simultaneamente durante todo o ciclo de secagem. Podemos representar o processo de secagem na seguinte equação:

$$\text{Compostohúmido} + \text{calor} = \text{Compostoseco} + \text{Água} \quad (2.1)$$

A secagem pode ser dividida amplamente em duas categorias baseadas na forma como o calor é fornecido para secar, que pode ser de:

- Secagem direta;
- Secagem indireta.

Há ainda sistemas que funcionam de forma combinada (direta com indireta). Na secagem direta, o composto orgânico recebe o calor por contacto direto com um fluido que fornece calor (ar quente ou vapor quente) e é, geralmente, mais eficiente. A secagem de aquecimento direto pode ser dividida em duas categorias:

- Secagem a ar sobreaquecido;
- Secagem a vapor sobreaquecido.

Na secagem de ar sobreaquecido, o ar quente contacta com o composto orgânico a secar, o ar perde calor sensível e fornece o calor latente da evaporação para secar o material. Com a perda do calor sensível o ar absorve e remove o vapor de água que é evaporado.

Em secadores de vapor sobreaquecido, o fluido de aquecimento é vapor em vez de ar, mas o conceito é o mesmo. O vapor sobreaquecido contacta com o composto orgânico e perde parte do seu calor sensível para fornecer o calor latente da evaporação para secar o composto. O vapor, no entanto, permanece acima da sua temperatura de saturação, de modo que não condensa. O vapor de água que sai do composto orgânico é aquecido pelo vapor sobreaquecido de modo que o resultado do sistema seja uma maior quantidade de vapor a uma temperatura mais baixa do que quando o vapor entrou no secador. O excesso de vapor é removido e o restante é reaquecido e reciclado de volta para o secador [6].

Na secagem indireta o composto orgânico é separado da fonte de calor por uma superfície de troca de calor. Geralmente é vapor ou água quente, que passam através de tubos ou

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

outros permutadores de calor no interior do secador, aquecendo o composto orgânico indiretamente.

Os secadores podem ser concebidos também para funcionar em dois modos diferentes, que são:

- Pressão atmosférica;
- Pressão de vácuo.

A secagem de composto orgânico sob vácuo reduz o ponto de ebulição da água e assim reduz a temperatura necessária para secar, aumentando as oportunidades para aproveitar o calor residual nas instalações. Os secadores de vácuo normalmente têm um alto custo de capital.

### **2.3 Tecnologias/equipamentos de secagem**

No mercado já existem diversos equipamentos para a secagem compostos, inclusive alguns que utilizam como fontes de energias as energias renováveis, como a biomassa, energia solar, etc.

A seleção do secador apropriado depende de muitos fatores, incluindo o tamanho e características do composto, custos de capital, requisitos de operação e manutenção, emissões ambientais, eficiência energética, fontes de calor de resíduos disponíveis, espaço disponível e potencial risco de incêndio [27]. Os principais tipos de secadores são: secador de tambor rotativo, secador flash, secador de disco, secador em cascata, secador a vapor sobreaquecido, secador de esteira e secador de micro-ondas [27] [6].

#### **2.3.1 Secadores de tambor rotativos**

O secador de tambor rotativo consiste num tambor cilíndrico em aço que roda sobre um eixo, com ou sem inclinação. Este secador é o tipo mais comum de secador de composto e existem vários tipos do mesmo, mas o mais amplamente utilizado é o secador de tambor rotativo de passagem única, aquecido diretamente. Nesse tipo de secador os gases quentes são colocados em contacto com o composto dentro de um tambor rotativo. A rotação do tambor, com o auxílio de pás, levanta os sólidos do secador para que passem pelo gás quente, promovendo melhor transferência de calor e massa. O composto e o ar quente normalmente fluem simultaneamente através do secador de modo que os gases mais quentes entrem em contacto com o material mais húmido, mas para materiais onde a temperatura não é uma preocupação, o gás de combustão e os sólidos fluem em direções opostas, então os sólidos mais secos são expostos aos gases mais quentes com a humidade mais baixa [29] [30]. Um secador de tambor rotativo pode ser visto na figura 2.2.

A temperatura do gás de entrada para os secadores rotativos pode variar de 232° - 1.093 °C. As temperaturas de saída dos secadores rotativos variam de 71° - 110 °C, como a maioria dos secadores tem as temperaturas de saída superiores a 104 °C para evitar a condensação de ácidos e resinas. Os tempos de retenção no secador podem ser menos de um minuto para partículas pequenas e 10-30 minutos para materiais maiores [6] [3]. De entre as vantagens dos secadores rotativos destacam-se:

- Menos sensíveis ao tamanho das partículas;
- Podem aceitar os gases de combustão mais quentes do que qualquer outro tipo de secador;

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

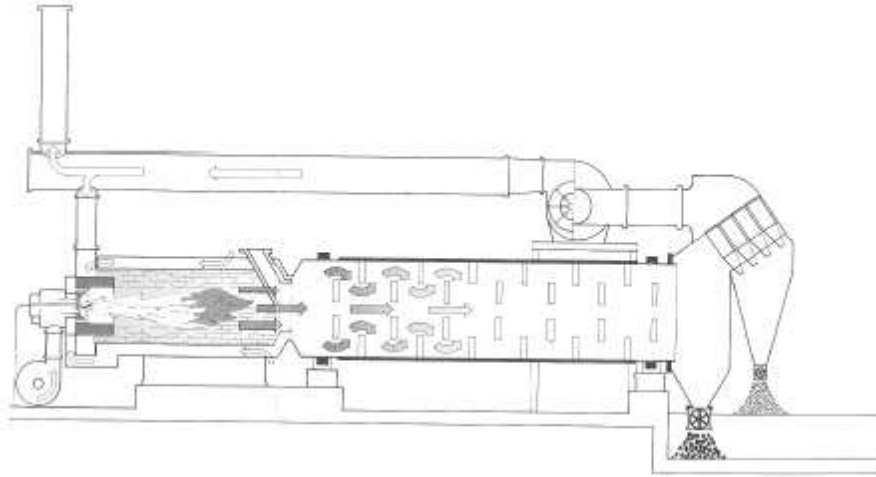


Fig. 2.2: Secadores de tambor rotativo de passagem única [3]

- Têm baixos custos de manutenção e maior capacidade do que qualquer tipo de secador [6].

Como desvantagens destacam-se:

- É difícil controlar a humidade do material por causa do longo tempo de atraso do material no secador [31];
- Apresentam o maior risco de incêndio e requerem mais espaço [6].

### 2.3.2 Secador flash ou pneumático

No secador flash ou pneumático, os sólidos são misturados com uma corrente de ar quente de alta velocidade, o contacto íntimo dos sólidos com o ar resulta em uma secagem muito rápida. Os sólidos e o ar são separados usando um ciclone, e os gases continuam através de um purificador para remover qualquer partícula arrastada. As temperaturas do ar são ligeiramente mais baixas para secador flash do que para secadores de tambor rotativo, mas, ainda assim, operam em temperaturas acima do ponto de combustão. O tempo de retenção de sólidos em um secador flash é normalmente inferior a 30 segundos, minimizando o risco de incêndio. Um esquema de secador de flash simples pode ser visto na figura 2.3.

Dentro das vantagens dos secadores flash destacam-se:

- Os secadores flash são muito mais compactos do que os secadores rotativos, mas têm custos de instalação mais altos [31];
- Podem ser usados na maioria dos tipos de composto, mas têm altos custos de energia do ventilador, além dos requisitos de calor para secagem [32];
- Com o curto tempo de retenção no secador, as emissões de hidrocarbonetos podem ser ligeiramente menores do que para um secador rotativo [3];
- Devido ao seu menor tempo de retenção e menor temperatura de operação, apresentam menor risco de incêndio do que os secadores rotativos;
- Para materiais húmidos ou pegajosos, como lama, parte do material seco pode ser reciclado de volta e misturado com o material húmido de entrada para melhorar o manuseio do material.

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

Como desvantagens destacam-se:

- As partículas a serem secas devem ser pequenas para estar suspenso no fluxo de ar;
- Como o secador rotativo, a recuperação do calor pode ser difícil por causa do ar misturado ao vapor de água;
- Maior consumo de eletricidade por causa do fluxo de ar por unidade ser mais rápido e porque o composto deve passar por um triturador ou moedor para reduzir seu tamanho e ficar suspenso no fluxo de ar.

### **2.3.3 Secadores de disco**

Secadores de disco são uma opção para menores fluxos de material. Nestes secadores, os sólidos são aquecidos pela condensação de vapor dentro de um eixo central com muitos discos ocos que aumentam a área de transferência de calor. Os secadores de disco podem ser operados sob vácuo ou sob pressão, e o condensado de dentro do poço de aquecimento pode ser recuperado e devolvido à caldeira [6].

As vantagens principais dos secadores de disco são:

- Por usar o sistema de aquecimento indireto, com a condensação do vapor do secador é possível recuperar parte do calor latente de vaporização;
- A operação é bastante direta e os custos de manutenção são razoáveis.

Como principal desvantagem é a capacidade limitada devido à temperatura operacional relativamente baixa em comparação com outros secadores.

### **2.3.4 Secadores em cascata**

Secadores em cascata são comumente usados para secar grãos, mas podem ser usados para outros tipos de compostos. O composto é introduzido em um fluxo de ar quente ao entrar em uma câmara fechada. O composto é lançado ao ar e depois cai, ou desce em cascata, de volta ao fundo para ser levantado novamente. Parte do composto é retirado por aberturas na lateral da câmara que controlam o tempo de residência e a quantidade de secagem. O tempo de residência típico para um secador em cascata é de alguns minutos [3].

Vantagens e desvantagens dos secadores em cascata:

- Os secadores em cascata são semelhantes aos secadores flash, excetuando que podem lidar com partículas ligeiramente maiores. No entanto, para um bom efeito em cascata no secador, o tamanho das partículas deve ser bastante uniforme.

A principal desvantagem é:

- Como outros secadores aquecidos a ar, a recuperação de calor é difícil e dispendiosa.

### **2.3.5 Secadores a vapor superaquecido**

Secadores a vapor superaquecido são na maioria semelhantes aos secadores flash, exceto que o fluido que suspende os sólidos e fornece calor é vapor em vez de ar. Em operação normal, o composto húmido é misturado com vapor superaquecido suficiente para secar o composto e ainda terminar como vapor superaquecido. Normalmente 90 % do vapor que sai do secador é recirculado enquanto 10 % do vapor, representando a quantidade de

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

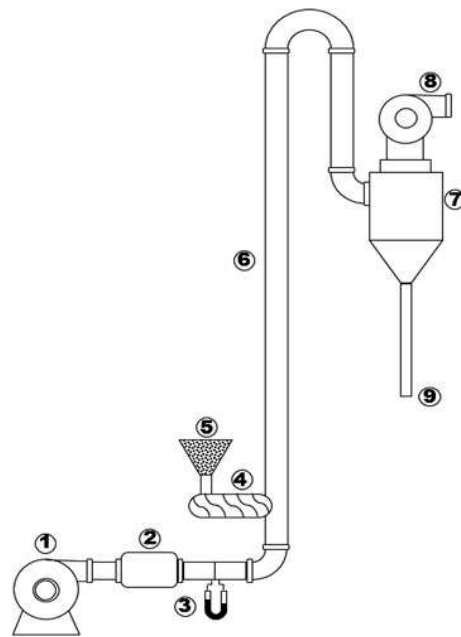


Fig. 2.3: Esquema de secador de flash simples: 1- Ventilador; 2- aquecedor; 3- orifício; 4- parafuso sem-fim; 5- reservatório; 6- conduta de secagem; 7- ciclone; 8- ventilador de exaustão; 9- saída do produto seco [4]

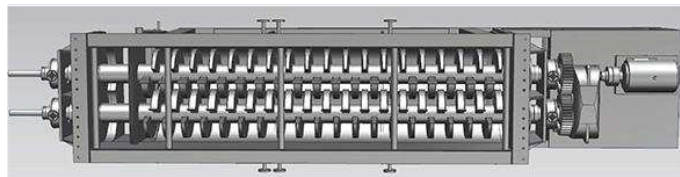


Fig. 2.4: Secador de discos rotativos [5]

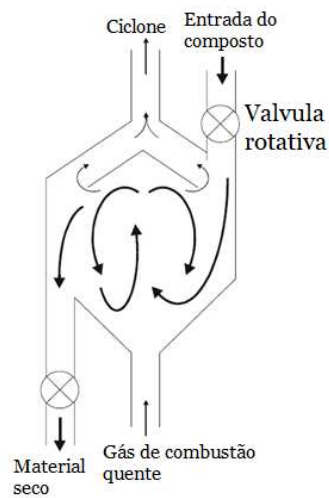


Fig. 2.5: Vista lateral de um secador em cascata [6]

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

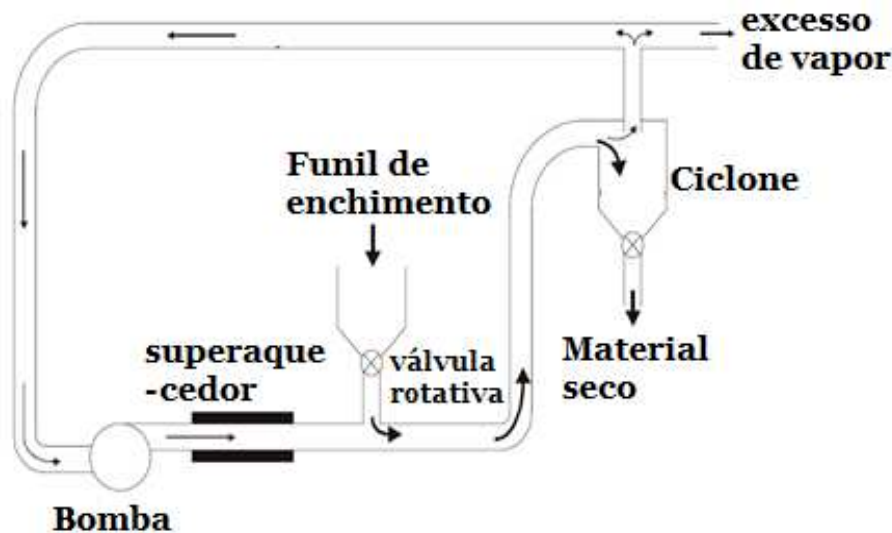


Fig. 2.6: Design básico de secador a vapor superaquecido [6]

água evaporada do composto, é removido e condensado, ou usado diretamente em outras partes da planta [33] [34]. As principais vantagens dos secadores a vapor superaquecido são:

- É possível eliminar a oxidação e as reações de combustão no secador;
- A possibilidade de recuperação de calor quase completa do vapor de saída pela sua recompressão e melhor controlo do processo;
- O calor latente de vaporização da secagem pode ser recuperado e nenhuma perda de calor ocorre do ar de aquecimento para o secador [6] [35];
- Normalmente não há emissões atmosféricas de um secador a vapor superaquecido, todo o vapor, incluindo os orgânicos, é condensado. Isso, entretanto, significa que o condensado do processo exigirá tratamento de águas residuais [35];
- Têm maior transferência de calor e secagem mais rápida e por causa da atmosfera de gás inerte, não apresenta risco de incêndio [6][35];
- Têm taxas de secagem mais altas do que os secadores de ar e gás [36].

No geral, considera-se que as vantagens da secagem a vapor superaquecido são tais que, durante a próxima década, o método será amplamente adotado [37]. Algumas desvantagens dos secadores a vapor superaquecido são:

- A necessidade de tamanho de partícula pequeno para permitir a mistura do vapor e das partículas;
- Altos custos de capital para um vaso de pressão de aço inoxidável;
- Nem todos os materiais podem suportar as temperaturas elevadas e, em alguns casos, não é possível atingir baixo conteúdo de água;
- As portas de alimentação e descarga do produto são mais difíceis de construir devido à necessidade de conter o vapor e evitar a entrada de ar;
- Os sistemas são mais complexos e até mesmo um pequeno vazamento de vapor é devastador para a eficiência energética do secador de vapor [38].

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

### 2.3.6 Secador de radiofrequência e micro-ondas

As secagem de radiofrequência e micro-ondas são usadas em muitas indústrias, principalmente em aplicações onde é exigida elevada qualidade do composto, alta velocidade de secagem e a remoção eficiente dos vestígios finais de humidade. As técnicas de radiofrequência e micro-ondas oferecem a característica única de gerar calor na água mantida num substrato molhado. Devido a isto e ao facto de nenhuma parte do composto ser submetida a temperaturas superiores à temperatura do bolbo húmido, as eficiências podem ser muito elevadas. No entanto, devido ao custo relativamente elevado do equipamento, não é prático considerar estas técnicas para grandes materiais de produção. O elevado custo económico é muitas vezes reforçado pelo facto de serem obtidas distribuições de humidade muito uniformes dentro de um composto.

Um avanço mais recente tem sido a introdução do secador combinado convectivo e radiofrequência no qual a radiofrequência aquece o volume do composto e, reduzindo a viscosidade e a tensão superficial da água, provoca o fluxo de fase líquida para a superfície, em que uma maior parte da energia necessária é fornecida pelo calor convectivo, normalmente a gás. Este equipamento é usado numa gama de aplicações industriais em partículas, sólidos tridimensionais, e operações para as quais a secagem por radiofrequência pura não seria rentável. A eficiência energética global é muito elevada [39]. Dentre as vantagens desta secagem destacam-se:

- Secagem mais rápida;
- Aquecimento mais uniforme;
- Eficiência energética;
- Melhor controlo de processos;
- Muitas vezes tem uma pegada ecológica menor porque se dá a partir da oscilação do campo elétrico, que leva à movimentação de íons, átomos e moléculas, aumentando então a energia cinética desses componentes, a qual, por sua vez, é convertida em calor.

A principal desvantagem é o maior custo de capital.

### 2.3.7 Secagem por indução

O princípio do aquecimento por indução é baseado no calor gerado na massa de um material condutor devido à corrente parasita (também denominada corrente de Foucault). Consiste num tambor horizontal em rotação lenta, que é aquecido por grandes correntes elétricas induzidas. O consumo de energia do secador depende do tipo de material e seu teor de humidade, mas em geral varia de 1,25 a 1,60 kWh/kg de água evaporada com eficiência elétrica superior a 90 %. O material de secagem ocupa cerca de 20 % do volume do tambor, assim, no tempo de retenção de cerca de 400 s, a capacidade de saída varia de 0,55 a 3,64 m<sup>3</sup>/h [37].

A principal diferença entre o aquecimento por indução dos outros métodos de secagem está no aquecimento volumétrico. O calor penetra no composto e não na superfície; é formado em todo o volume de uma só vez, este processo permite secar o composto de forma eficaz com baixo consumo de energia. A distribuição uniforme da humidade ocorre em um material seco durante o processo de indução de aquecimento. A indução não assume a transferência de calor do aquecedor para um material. Enquanto o uso de outros métodos de secagem requer o aquecimento do ar, então transfira o calor do ar quente para o material. As vantagens do aquecimento por indução incluem o seguinte:

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

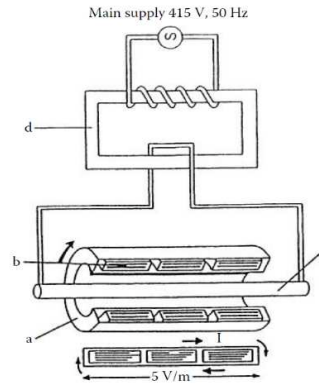


Fig. 2.7: Secador ROTTEK: princípio do aquecimento por indução: a. Tambor rotativo; b. Carga terciária; c. Barra de barramento secundária; e d. núcleo do transformador de ferro-silício [6]

- A transmissão de energia elétrica diretamente no composto permite implementar o aquecimento direto dos materiais, aumentando assim a taxa de aquecimento;
- A transmissão de energia elétrica diretamente no composto não requer dispositivos de contacto. Isso é útil para produção em linha automatizada;
- Quando o composto é um dielétrico, então a energia é distribuída uniformemente por todo o volume do composto. Consequentemente, este método de indução proporciona um aquecimento rápido do grão;
- O aquecimento por indução na maioria dos casos pode aumentar a produtividade e melhorar as condições de trabalho.

A secagem por indução é pouco estudada e raramente utilizada na prática devido a consideráveis imperfeições nas tecnologias de fabricação de conversores de frequência.

### 2.3.8 Secagem por combustão de pulso

A combustão por pulso é um processo de secagem em que a combustão e liberação de calor variam periodicamente no tempo. Essa combustão periódica de um combustível líquido ou gasoso cria ondas de pressão, velocidade e, até certo ponto, de temperatura propagadas da câmara de combustão através de um tubo de escape para o volume do processo. Além disso, essas ondas afetam o momento e as taxas de transferência de calor e massa, que finalmente resultam em taxas aprimoradas de processos como dispersão de líquido ou evaporação de humidade. Combina a alta economia do sistema de aquecimento direto do fogo com alta intensidade de secagem de composto. As principais vantagens da secagem da combustão do pulso são as seguintes:

- Transferência de calor melhorada, alta diferença entre a temperatura do material e do gás de chaminé e a elevada taxa de secagem;
- Combustão eficiente com baixas emissões de substâncias tóxicas e baixa quantidade de ar descarregado para atmosfera;
- Grande variedade de matérias-primas manuseadas, incluindo materiais pegajosos e produtos sensíveis ao calor;

A principal desvantagem é o ruído produzido pelo pulso combustor e controlo difícil do combustor [37].

### 2.4 Consumo de energias

Independentemente do tipo de secagem utilizada, o consumo de energia está sempre envolvido, a dependência contínua de eletricidade principalmente, é um custo significativo e inevitável. O processo de secagem utiliza alta energia em comparação com outros processos de produção devido à eficiência energética relativamente baixa dos secadores e ao alto calor latente da evaporação da água [40].

A secagem consome 10-15 % da demanda total de energia industrial nacional no Canadá, França e EUA, bem como 20-25 % na Alemanha e Dinamarca [41]. Portanto, o desafio mais importante para a indústria de secagem é realizar análises de energia para alcançar condições ideais de processo e redução do tempo de secagem que consequentemente redução da utilização de energia. Tendo em conta a elevada procura de recursos energéticos e a não sustentabilidade das fontes de energia convencionais, como os combustíveis fósseis, é imperativo continuar a explorar métodos alternativos de secagem de forma sustentável e mais eficaz e eficiente, recorrendo a fontes de energia renováveis.

A utilização de fontes de energias não-convencionais para a secagem de diversos compostos tornou-se atrativa para os pesquisadores porque em certo caso permite melhorar a eficiência económica e ambiental. Podemos descrever algumas fontes de energias não-convencionais usados para a secagem de compostos orgânicos com maior realce as fontes de energia solar.

#### 2.4.1 Energia de biomassa

A biomassa, como subprodutos em sistemas normais de produção agrícola, estão entre as mais baratas e mais disponíveis formas de produzir eletricidade ou ar quente para secagem de compostos em zonas agrícolas. Nos países em vias de desenvolvimento, a biomassa é uma importante fonte de energia e a combustão direta de biomassa é talvez a melhor forma de utilizar a sua energia armazenada; isto poderia aquecer o ar para a secagem de compostos. Atualmente, a maioria dos sistemas que estão sendo utilizados para a produção de calor a partir de biomassa, tem baixa eficiência, como consequência das características do combustível, bem como da pequena dimensão das centrais de produção [37].

A biomassa é considerada um combustível com emissão neutra de CO<sub>2</sub> e quando utilizada como substituta de combustíveis fósseis traz benefícios ambientais, no que se refere a redução das emissões de gases do efeito estufa.

#### 2.4.2 Fonte de energia solar

A energia solar pode ser tratada como uma energia livre, mas a sua aplicação para a secagem é limitada geograficamente e em geral para produtos como sementes, frutas, carne, peixe, madeira e outros produtos agrícolas ou florestais como meio de preservação. Entre as principais vantagens da secagem solar destacam-se:

- Fonte de energia livre e não poluente, renovável e abundante que não pode ser monopolizada;
- Atendendo a irregularidade solar, há possibilidade de fazer-se o uso da radiação solar para secagem planejada permite superar várias dificuldades.

A principal desvantagem no uso da secagem solar é o carácter periódico da radiação solar. Para contrapor este obstáculo é necessário a utilização dos seguintes elementos:

- Sistema de armazenamento térmico para armazenar parte da energia adquirida durante os períodos de alta radiação solar;

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

- Fonte de energia auxiliar para colmatar os possíveis défices solar;
- Sistemas de controlo e coletores solares de grande superfície.

Mas isto resulta em custos de investimentos consideráveis fazendo com que a economia e a necessidade de alcançar uma taxa aceitável de retorno sejam um dos requisitos principais.

### **2.5 Escolha do secador**

A escolha do secador dependerá das características do material a ser seco, da fonte de calor do secador e das opções de integração disponíveis. Uma consideração importante é o tamanho do material a ser seco.

Para secador flash e para a maioria dos secadores de vapor superaquecidos, um pequeno tamanho de partícula é necessário para suspender o material em um fluxo de ar ou vapor em movimento. Os secadores em cascata precisam de um tamanho de partícula muito uniforme. Para materiais grandes ou variáveis, um secador rotativo de passagem única pode ser o melhor. Para alguns materiais, reduzir o tamanho do material pode ser uma opção, mas geralmente esta é uma operação que consome muita energia.

A fonte de calor e a temperatura de secagem são considerações importantes. O gás de combustão é uma fonte eficiente de calor, mas a temperatura pode ser muito baixa para fornecer calor suficiente para a secagem completa. Usar uma corrente de processo para aquecimento pode ser eficiente em termos de energia, mas exigirá o investimento de capital em um trocador de calor e as interações entre o secador e o processo devem ser consideradas.

Secador de vapor superaquecido normalmente requer uma fonte de calor de alta temperatura. Se houver vapor saturado disponível, o secador de disco seria uma opção. O objetivo deve ser determinar que excesso de calor está disponível no sistema e, em seguida, projetar o sistema de secagem para aproveitá-lo.

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

# Capítulo 3

## Materiais e métodos

Neste capítulo descreve-se a instalação experimental e as técnicas utilizadas na realização do presente estudo. De um modo global, neste capítulo enceta-se uma caracterização da instalação experimental empregue no âmbito de dezoito ensaios que se subdividiram em quatro partes que diferem no parâmetro de secagem analisado.

O objetivo do estudo experimental é entender os parâmetros de secagem do composto Fertagri IIA, a partir dos quatro tipos de ensaios definidos, estudando as influências da variação da temperatura de secagem, da massa da amostra inicial de secagem, da área de secagem, da variação das distâncias entre as bandejas e da superfície de secagem do composto.

### 3.1 Materiais utilizados

Deste modo, para a realização dos 18 ensaios definidos, foi montado uma instalação experimental composta por duas plataformas de secagem com superfícies diferentes, adaptáveis as condições impostas pelo tipo de ensaio a estudar, uma estufa elétrica, uma balança digital e um termómetro de registo Fluke IIA.

O composto designado por Fertagri IIA e foi obtido do Centro de Valorização de Resíduos de Castelo Branco e preparado para experimentos. O Fertagri IIA é resultado de um processo de compostagem em túnel aberto e apresenta uma heterogeneidade na sua composição que é resultado dos elementos utilizados durante o seu processo de obtenção que é a partir de resíduos de lamas, cinzas de biomassa vegetal e materiais estruturantes, como podemos ver na figura 3.1 e na tabela 3.1.

Foi utilizado dois tipos de superfície de secagem, uma lisa e outra perfurada designadas por bandejas de secagem A e B respetivamente. Para tal, foram utilizadas as placas metálicas apresentadas na figura 3.2, com 29,5x20 cm<sup>2</sup> de área total, onde foi definida uma área de secagem de 27,5x18 cm<sup>2</sup>. Foi escolhido o metal por possuir uma grande resistência a elevadas temperaturas, importante de modo a suportar o efeito do aquecimento impostos nas placas e que será discutido na secção 3.1.2. Cada uma das bandejas foi montada num conjunto de seis varões roscados, porcas e anilhas, obtendo-se assim um conjunto com a estabilidade necessária à sua integração na estufa designada por plataforma de secagem, como podemos ver na figura 3.3. É importante referir que, foi escolhido varão roscado, porcas e juntas de modo a permitir alterar a plataforma de acordo com o ensaio em questão, que será esclarecido com mais detalhes na secção 3.1.2.

As experiências foram realizadas em uma estufa elétrica Carbolite, serial nº 23548, tipo NR-200F, com uma tensão elétrica de 240 V e potência de 2,4 kW, a temperatura máxima da estufa é de 300 °C, figura 3.4. A perda de massa das amostras foi constantemente monitorizada a cada intervalo de 20 minutos após a colocação na estufa usando uma balança de precisão da A&D Company, Limited modelo FZ-3000i, 3200 g x 0,01 g, com uma panela de 15 cm como podemos ver na figura 3.4. Junto da balança foi utilizado uma placa de poliestireno extrudido XPS de 32x32 cm<sup>2</sup>, com 114,67 g que é colocada sobre a balança para permitir realizar a medição usando a plataforma de secagem utilizada que tem 29,5x20 cm<sup>2</sup>. Por último foi utilizado um datalogger com duas entradas para fichas de termopares, Fluxe 54 II B (figura 4.1), empregue para, conjuntamente com dois termopares do tipo T, para registar a temperatura em cada uma das plataformas de secagem.

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

### **3.1.1 Metodologia de ensaio**

Para a realização do ensaio experimental foi adotado o seguinte procedimento:

1. O composto foi misturado de modo a tornar a humidade das duas plataformas de secagem mais uniforme possível;
2. Pesaram-se as plataformas de secagem antes de ser acrescentado o composto;
3. Colocou-se a amostra do composto, nas plataformas de secagem e pesaram-se os conjuntos;
4. Os conjuntos (plataformas + composto) permaneceram na estufa à temperatura a que decorreu cada ensaio;
5. Cada um dos conjuntos foi pesado em intervalos de 20 minutos;
6. Após três pesagens consecutivas idênticas, ou com variação da massa abaixo de 1g, considera-se que o composto está seco;
7. Para os 18 ensaios realizados, foi definido o intervalo de 10 horas como intervalo máximo de permanência do composto.

A massa inicial do composto, assim como de todas as massas medidas durante o ensaio, são determinadas pela diferença entre a massa do conjunto no referido instante e a massa da plataforma, antecipadamente registada.

### **3.1.2 Tipos de ensaios realizados**

O presente estudo experimental foi precedido da realização de 10 ensaios preliminares, onde foi possível verificar diversos parâmetros que influenciam no processo de secagem do composto em estudo, como a composição elementar do composto, a temperatura imposta, o tempo de secagem, a característica da plataforma de secagem, etc. Como resultado destes ensaios preliminares, o presente trabalho foi dividido em quatro tipos de ensaios, A, B, C e D, onde se fez variar grandezas como a temperatura, a massa do composto a secar, o número de andares de secagem e as distâncias entre esses andares, como podemos ver na tabela 3.2. Os ensaios realizados para a secagem do composto, são descritas nos parágrafos abaixo, segundo os tipos de ensaios realizados:

No primeiro grupo de ensaios, descrito como Ensaios do tipo A, manteve-se constante a temperatura, o número de andares e, conseqüentemente, a distância entre os andares. Variou-se a massa de composto durante cinco ensaios.

Na sequência, no segundo grupo de ensaios realizaram-se mais 5 ensaios, designados por ensaios do tipo B, onde se manteve constante a massa, o número de andares e, conseqüentemente, a distância entre os andares. Fez-se variar a temperatura de secagem.

O terceiro grupo de ensaios teve a designação de ensaios do tipo C. Manteve-se constante a temperatura e a distância entre os andares. Fez-se variar a massa e o número de andares, em 4 ensaios.

Por fim, realizou-se o grupo de ensaios designado por ensaios do tipo D, onde se manteve constante a temperatura, a massa e o número de andares. Fez-se variar a distância entre andares, durante 4 ensaios.

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico



Fig. 3.1: Composto estudado Fertagri IIA

Table 3.1: Matérias constituintes do composto Fertagri IIA

Componente	Resíduos		Material estruturante
	Lamas	Cinzas	
Percentagem	90 %	6 %	4 %

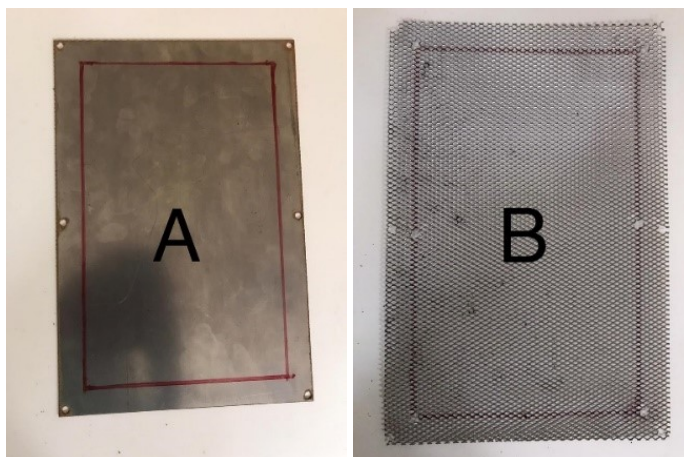


Fig. 3.2: Bandejas de secagem: a superfície lisa tem a designação de Bandeja A; a superfície perfurada tem a designação de Bandeja B



Fig. 3.3: Plataforma de secagem com 3 andares usado na experiência

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico



Fig. 3.4: Estufa CARBOLITE usada na experiência; b. Balança de precisão da A&D COMPANY, LIMITED modelo FZ-3000i



Fig. 3.5: Datalogger com duas entradas para termopar, Fluke 54 II B

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

Table 3.2: Parâmetros definidos para os ensaios realizados (\* nestes ensaios foi usado apenas a bandeja B)

Ensaio		Grandezas			
		Temperatura (°C)	Massa (g)	N.º Andares	Distância (cm)
Tipo A	E1 – A	80	200	1	...
	E1 – B				
	E2 – A		400		
	E2 – B				
	E3 – A		600		
	E3 – B				
	E4 – A		800		
	E4 – B				
	E5 – A		1000		
	E5 – B				
Tipo B	E6 – A	40	600	1	...
	E6 – B				
	E7 – A	60			
	E7 – B				
	E8 – A	80			
	E8 – B				
	E9 – A	100			
	E9 – B				
	E10 – A	120			
	E10 – B				
Tipo C	E11 – A	80	400	2	3
	E11 – B				
	E12 – A		600	3	
	E12 – B				
	E13 – B		800	4	
	E14 – B		1000	5	
Tipo D	E15 – A	80	600	3	4
	E15 – B				
	E16 – A				5
	E16 – B				
	E17 – A				6
	E17 – B				
	E18 – A				7
	E18 – B				

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

# Capítulo 4

## Resultados e discussão

Os ensaios de secagem, apresentados no capítulo anterior, possibilitam, numa primeira fase, a obtenção de resultados experimentais para a situação de secagem do composto Fertagri IIA, produzido pela Valamb. A análise comparativa destes resultados com outros provenientes da literatura, permite tirar conclusões acerca da qualidade da técnica desenvolvida, de modo que, esta, possa ser utilizada em situações com condições experimentais distintas daquelas para as quais se efetuou o estudo. Assim, neste capítulo apresentam-se os aspetos práticos dos ensaios realizados, prossegue com os resultados experimentais obtidos, e comparam-se esses resultados com outros existentes na literatura, tendo-se verificado existir boa concordância entre eles. O capítulo termina com a apresentação e discussão dos resultados obtidos.

Antes de passar para à apresentação de resultados, importa referir certos pormenores relacionados com a realização dos ensaios experimentais. Assim após dar início ao processo de secagem do composto, foi sempre necessário aguardar que se atinjam as condições de secagem na estufa definidas para o ensaio, em geral, ocorre passadas alguns minutos após o início do ensaio. Terminada esta fase, efetuam-se registos, intervaladas de vinte minutos, e durante um período de 10 horas, da massa e da temperatura do composto, em cada uma das bandejas. Deste modo, em cada ensaio, realizam-se um número variado de leituras para cada uma das grandezas em questão. O valor do intervalo de tempo usado entre registos, 20 minutos, foi determinado em função dos resultados obtidos nos ensaios preliminares. Antes de cada ensaio, é também, executado um procedimento que permite calibrar os materiais usados. Além disso, optou-se por realizar todos os ensaios durante o dia, e logo nas primeiras horas de modo a ter melhor acompanhamento. O sistema de ventilação existente no laboratório é ligado durante os ensaios, com o propósito de proteger o ambiente no laboratório.

### 4.1 Resultados experimentais dos ensaios do tipo A

Como foi referido anteriormente, o trabalho experimental iniciou-se com o estudo da secagem para os ensaios do tipo A. Os ensaios foram realizados segundo os dados apresentados na tabela 3.3. Com este ensaio, pretende-se conhecer o comportamento do composto Fertagri IIA quando submetido a secagem a temperatura constante. Optou-se, então, por realizar 5 ensaios de valores de massas diferentes, com variação de 200 g a cada, correspondendo a 200, 400, 600, 800 e 1000 g respetivamente, que representam os valores de amostras inicial de secagem a ser utilizada para uma secagem a 80° C.

A Figura 4.1, mostra as variações da massa em função do tempo, para os ensaios do tipo A. Em cada um dos ensaios são exibidos os valores obtidos com bandeja lisa (A) e com bandeja perfurada (B). Verifica-se que, conforme o esperado, o aumento da massa inicial de secagem traduz-se num aumento do tempo de secagem e num maior fluxo de água a sair do material num dado intervalo de tempo em comparação aos Ensaio 1. Observações de magnitude semelhantes foram feitas por outro estudioso [2].

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

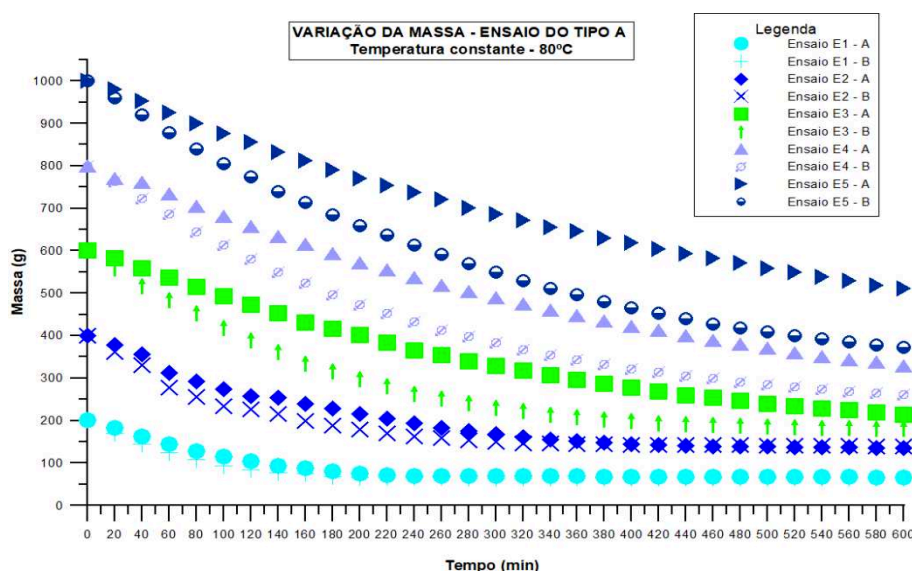


Fig. 4.1: Variação da massa para os ensaios do tipo A

### 4.2 Resultados experimentais dos ensaios do tipo B

Os ensaios do segundo grupo deste trabalho foram designados por ensaios do tipo B, segundo os dados apresentados na tabela 3.2. Com estes ensaios, pretende-se conhecer o comportamento do Fertagri IIA, quando submetido a secagem com temperaturas diferentes. Optou-se, então, por realizar 5 ensaios com valores de amostra de secagem constante de 600 g, que corresponde ao valor médio das temperaturas de secagem empregues, que correspondem a 40, 60, 80, 100 e 120<sup>o</sup> C.

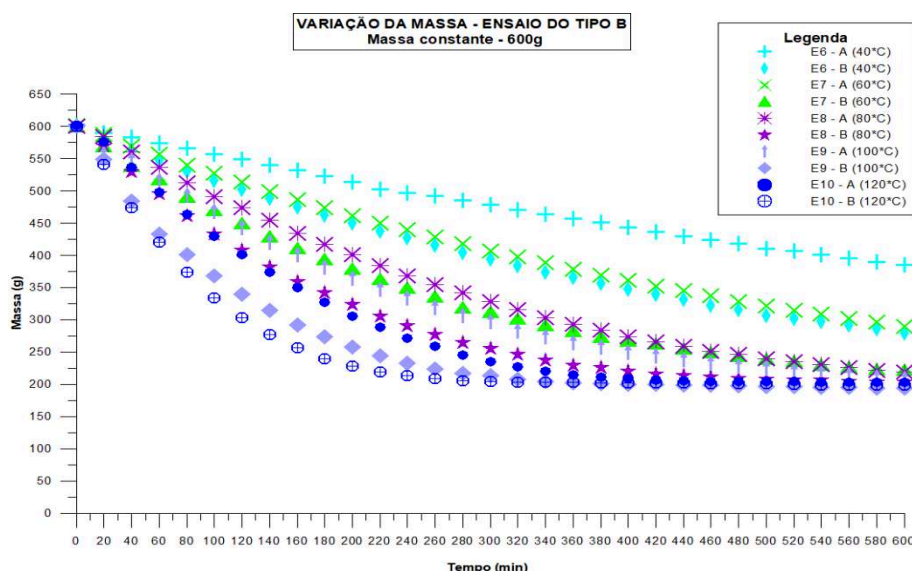


Fig. 4.2: Análise dos resultados para os ensaios do tipo B

A figura 4.2 mostra as variações da massa em função do tempo, para os ensaios do tipo B. Verifica-se que, conforme o esperado, o aumento da temperatura do ar de secagem traduz-se numa diminuição do tempo de secagem, ou seja, num maior fluxo de água a sair do material num dado intervalo de tempo. Outro trabalho, também apresentou resultados semelhantes [28].

### 4.3 Resultados experimentais dos ensaios do tipo C

O ensaio do tipo C, teve como propósito estudar o efeito da variação da área do composto no processo de secagem quando submetido a secagem com temperaturas constantes e a amostra de secagem variável e distribuída em vários andares. Os dados do ensaio encontram-se apresentados na tabela 3.2.

Para este ensaio, fomos limitados a realizar apenas duas seqüências de ensaios de 400 e 600 g para a plataforma de secagem A, devido às suas bandejas de secagem que tem os seus pesos a rondar 698 – 706 g, portanto uma plataforma de mais de 3 bandejas, adicionando nela o composto, dariam um peso acima do limite de leitura da balança utilizada, que são 3200 g. Para a plataforma B, foram realizados 4 ensaios de 400, 600, 800 e 1000 g, porque o peso de suas bandejas rondava entre 88 – 90 g.

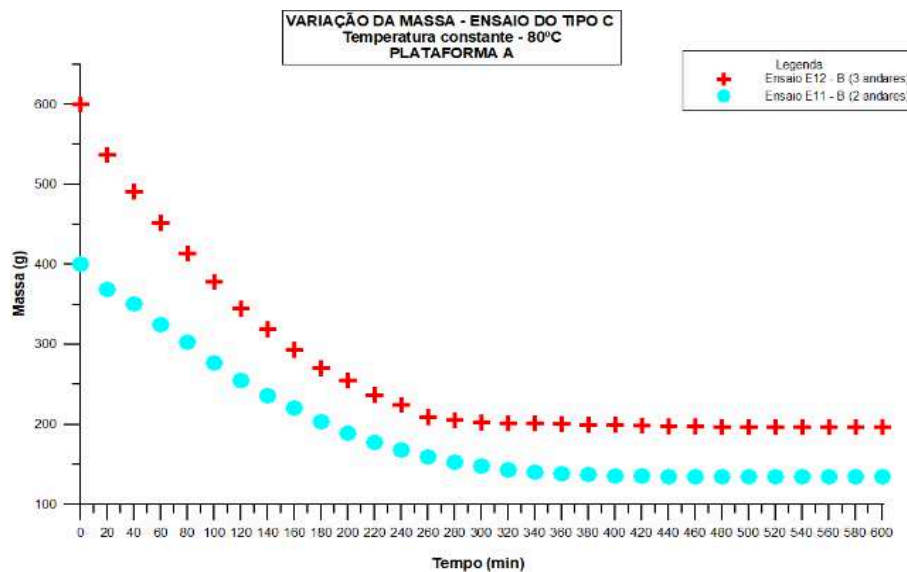


Fig. 4.3: Análise dos resultados para os ensaios do tipo C, com a plataforma de secagem A.

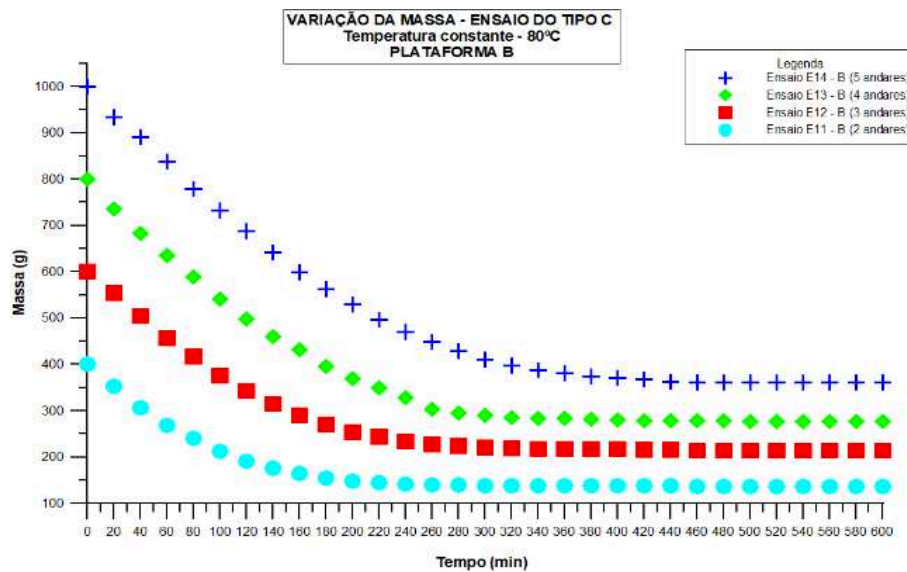


Fig. 4.4: Análise dos resultados para os ensaios do tipo C, com a plataforma de secagem B

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram os resultados da variação da massa em função do tempo para os ensaios do tipo C. Verifica-se que, semelhante ao ensaio do tipo A, o aumento da massa

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

inicial de secagem traduz-se num aumento do tempo de secagem e num maior fluxo de água a sair do material num dado intervalo de tempo. Nota-se também que, como previsto, sobre estas condições, o aumento da área de secagem traduz-se numa diminuição do tempo de secagem, ou seja, aumento do fluxo de água a sair do material com relação ao ensaio do tipo A, como podemos ver nas tabelas 4.1 e 4.2.

Table 4.1: Comparação entre o ensaio do tipo A e C, para a plataforma A

Ensaio	E2A	E11A	E3A	E12A	E4A
Massa inicial (g)	400,44	400,34	600,75	600,13	800,5
Tempo de secagem (h)	8	6,7	+10	5,3	+10

Table 4.2: Comparação entre o ensaio do tipo A e C, para a plataforma B

Ensaio	E2B	E11B	E3B	E12B	E4B	E13B	E5B	E14B
Massa inicial (g)	400,28	400,17	600,14	600,87	800,11	800,21	1000,19	1000,04
Tempo de secagem (h)	5,3	4	8,7	5,3	+10	6,7	+10	7,7

### 4.4 Resultados experimentais do ensaio do tipo D

A quarta e última parte do trabalho experimental correspondeu aos ensaios do tipo D e encontra-se representado nas figuras 4.5 e 4.6, onde se apresenta graficamente a variação da massa em função do tempo ao longo do ensaio. Quatro ensaios, a 80<sup>o</sup> C, 600 g distribuídas em partes iguais por três andares separados 4, 5, 6 e 7 cm respetivamente para cada ensaio. A quantidade de ar que passa entre as bandejas foram reguladas, variando as distâncias entre elas de modo a notar de que forma isto afetaria a secagem do Fertagri IIA.

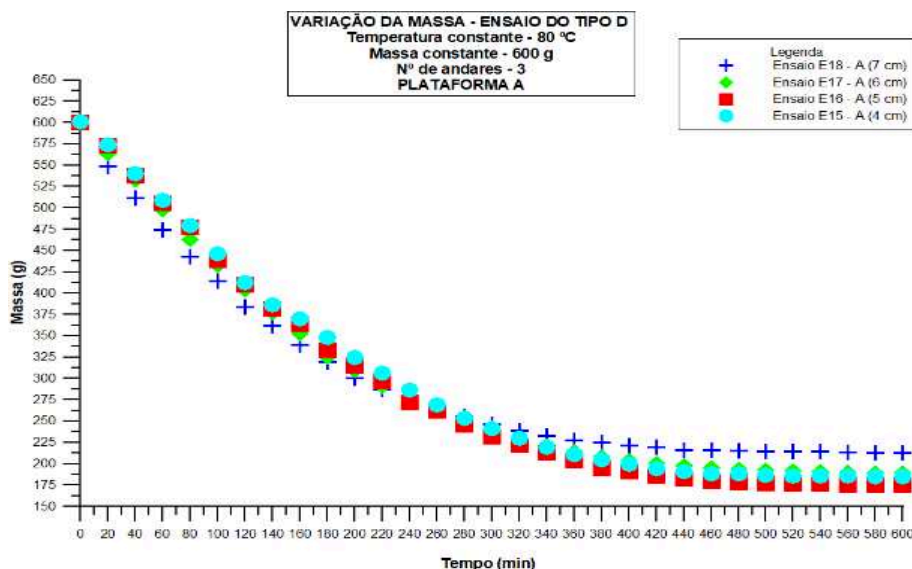


Fig. 4.5: Análise dos resultados para os ensaios do tipo D, com a plataforma de secagem A

Nas figuras 4.5 e 4.6, verifica-se que, o aumento das distâncias entre as bandejas de secagem não se traduz em mudanças significativas dos tempos de secagem, ou seja, a variação do fluxo de água a sair do composto num dado intervalo de tempo não depende das distâncias entre as bandejas.

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

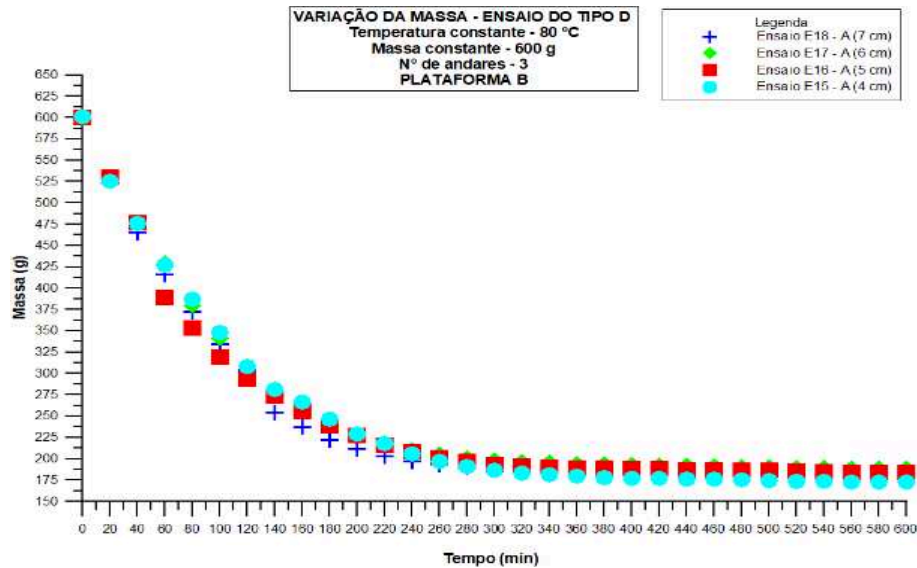


Fig. 4.6: Análise dos resultados para os ensaios do tipo D, com a plataforma de secagem B

Os ensaios com a plataforma A tiveram os tempos de secagem de 7,6; 8; 8 e 7,3 h, estes dados demonstram que para a secagem absoluta, os ensaios E16A e E17A necessitaram mais 20 e 40 minutos de secagem que os ensaios E15A e E18A respectivamente.

### 4.5 Análise dos parâmetros variados

A secagem de lamas residuais é um processo complicado pois depende de vários parâmetros, como o método de secagem aplicado e as condições de operação aplicadas. O Fertagri IIA é um composto constituído maioritariamente por lamas residuais como visto na tabela 3.1, portanto, subentende-se que possui um processo de secagem complexo que depende de vários parâmetros. A escolha de um secador que seja considerado de grande eficiência vai depender das propriedades da lama, do teor de humidade destas e da capacidade funcional dos equipamentos de secagem.

#### 4.5.1 Influência da massa no processo de secagem do Fertagri IIA

Como já descrito anteriormente, a secagem térmica retrata a remoção da água através da evaporação e a taxa de evaporação depende do teor de humidade do composto que consequentemente depende da amostra inicial de secagem. Por isso, nos ensaios do tipo A, fazemos variar a massa da amostra de secagem, mantendo a temperatura constante, para conhecermos a influência da massa inicial de secagem no processo de secagem do Fertagri IIA. Da leitura dos dados obtidos nos ensaios do tipo A, podemos perceber que a massa inicial de secagem é um parâmetro importante no alcance da eficiência no processo de secagem, como podemos ver na tabela 4.3.

Como podemos ver na tabela 4.3, no primeiro ensaio usamos o menor valor da amostra inicial de secagem, 200 g e passadas 2 h do tempo de ensaio já tinha evaporado 65 % desta massa na plataforma A. Com o aumento para 400, 600, 800 e 1000 g, respetivamente, nos 4 ensaios seguintes e passadas 2 h do tempo de ensaio, o fluxo de água evaporada comportou-se de forma inversa, diminuindo para 51, 39, 33, e 26 %, respetivamente. O resultado final do ensaio continuou espelhando que o aumento da amostra inicial resultou na diminuição da água evaporada em 67, 66, 64, 59 e 49 % respetivamente.

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

Table 4.3: Comparação entre o ensaio do tipo A e C, para a plataforma A

Ensaio do tipo A - % de água evaporada (80 °C)										
Ensaio	E1-A	E2-A	E3-A	E4-A	E5-A	E1-B	E2-B	E3-B	E4-B	E5-B
Massa inicial (g)	200	400	600	800	1000	200	400	600	800	1000
Tempo (h)	0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	2	48 %	36 %	21 %	18 %	14 %	58 %	43 %	35 %	27 %
	4	65 %	51 %	39 %	33 %	26 %	67 %	59 %	56 %	46 %
	6	66 %	62 %	51 %	44 %	35 %	68 %	64 %	65 %	57 %
	8	66 %	65 %	59 %	53 %	43 %	68 %	65 %	69 %	64 %
	10	67 %	66 %	64 %	59 %	49 %	68 %	65 %	70 %	67 %

Comportamento semelhante assistiu-se na plataforma B, que para o primeiro ensaio, passadas 2 h do tempo de ensaio, evaporou-se 67 %. Ao mesmo instante nos ensaios seguintes com maior amostra inicial, evaporou-se 59, 56, 46 e 39 % respetivamente, mantendo a tendência de decréscimo. No entanto, após 3 h do tempo de ensaio, deixou-se de assistir a tendência de decréscimo para os 5 ensaios, apresentando os seguintes resultados, 68, 64, 65, 57 e 50 %. Esta alteração pode ser justificada por três fatores; o primeiro fator é que o aumento da massa inicial resultou no aumento do teor de água por evaporar, o segundo fator é que ao atingir-se a secagem absoluta, deixa de existir variação da massa ao longo do ensaio e consequentemente a percentagem de massa evaporada mantém-se constante como podemos ver nos períodos, o terceiro fator é que a heterogeneidade do Fertragri IIA, faz com que o aumento do teor de água não seja linear. Portanto, o aumento da amostra inicial de secagem nos respetivos ensaios resultou em diminuição da percentagem da massa evaporada, como vê-se na mesma tabela.

### 4.5.2 Influência da temperatura no processo de secagem do Fertagri IIA

De uma maneira geral, em processo de secagem, quanto maior a temperatura maior a velocidade de secagem, pois o calor é a fonte da qual as moléculas de água adquirem a energia cinética necessária para provocar a evaporação, a qual depende tanto da quantidade de energia fornecida por unidade de tempo, como da capacidade do ar de absorver humidade [48]. Observando os resultados dos ensaios do tipo B, nota-se que a temperatura de secagem foi um dos principais influenciadores para se alcançar a secagem absoluta, como podemos ver na tabela 4.4.

Table 4.4: Percentagens de massa evaporadas para os ensaios do tipo B

Ensaio do tipo B - % água evaporada (600 g)										
Ensaio	E6-A	E7-A	E8-A	E9-A	E10-A	E6-B	E7-B	E8-B	E9-B	E10-B
Temperatura (°C)	40	60	80	100	120	40	60	80	100	120
Tempo (h)	0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	2	9 %	14 %	21 %	26 %	33 %	16 %	25 %	32 %	43 %
	4	17 %	27 %	39 %	44 %	55 %	29 %	42 %	52 %	61 %
	6	24 %	37 %	51 %	56 %	64 %	39 %	53 %	62 %	66 %
	8	30 %	45 %	59 %	62 %	66 %	47 %	59 %	65 %	67 %
	10	36 %	52 %	63 %	65 %	66 %	54 %	63 %	66 %	68 %

Dos resultados obtidos nos ensaios do tipo B, representados de forma simplificada na tabela 4.4. Observa-se que o aumento da temperatura de secagem resultou sempre no aumento da água evaporada ao longo do ensaio. Para uma secagem de 40 °C como foi feita no ensaio 6, obteve-se a menor quantidade de água evaporada ao longo do ensaio.

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

Passadas 2 h do tempo de ensaio, obteve-se as seguintes percentagens de água evaporada para a plataforma de secagem A, 17, 27, 39, 44 e 55 % e passadas 10 h do tempo de ensaio tivemos como resultados, 36, 52, 63, 65 e 66 % de água evaporada. Portanto o aumento da temperatura representou um aumento da água evaporada.

A plataforma de secagem B, apresentou comportamentos semelhantes aos da plataforma A, passada 2 h do tempo de ensaio conseguiu-se evaporar 29, 42, 52, 61 e 64 % de água nos respectivos ensaios. Entretanto, passadas as 10 h do tempo de ensaio, o cálculo das percentagens de água evaporada apresentou os seguintes resultados, 54, 63, 66, 68 e 67 % respetivamente.

O ensaio 9 apresenta maior água evaporada contrariando a tendência do ensaio, mas isso se deve à heterogeneidade apresentada pelo Fertagri IIA, que, no caso deste ensaio, teve uma grande concentração de matérias estruturantes, que juntos a elas agregam partículas de lamas que, ao secar, se desagregam e vão-se perdendo no interior da estufa no caso da plataforma B que tem a superfície perfurada, e isto faz com que, apesar de ser alcançada a secagem absoluta, ainda assistimos à diminuição da massa. Portanto o controlo da temperatura foi um fator importante para a secagem do composto.

### 4.5.3 Influência do número de andares da plataforma de secagem no processo de secagem do Fertagri IIA

A quantidade de água evaporada de um produto depende, não só das características elementares do composto utilizado, como também da plataforma de secagem usada. A variação do número de bandejas na plataforma de secagem representa variação da área de secagem na plataforma de secagem, com relação ao ensaio do tipo A, como já dita anteriormente. Uma vez que a transferência de calor é proporcional à área, tentamos analisar a influência da variação da área no processo de secagem do Fertagri IIA, analisando os resultados apresentados na tabela 4.5 e 4.6.

Table 4.5: Comparação das percentagens de massa evaporadas para o ensaio do tipo A vs C, para a plataforma A

Comparação do ensaio do tipo A vs C				
Tempo (h)	E2A (1 bandeja) vs E11A (2 bandejas)		E3A (1 bandeja) vs E12A (3 bandejas)	
	Massa inicial (g)			
	400		600	
0	0 %	0 %	0 %	0 %
2	36 %	36 %	21 %	42 %
4	51 %	58 %	39 %	63 %
6	62 %	65 %	51 %	67 %
8	65 %	66 %	59 %	67 %
10	66 %	66 %	64 %	67 %

A tabela 4.5 representa as percentagens das águas evaporadas ao longo dos ensaios do tipo A e C, em seis (6) instantes diferentes, para a plataforma A. Comparando os dois ensaios nota-se a grande influência da variação da área de secagem. Ao utilizar-se duas bandejas de secagem no ensaio de 400 g a água evaporada aumentou de 51 para 58 % passados 4 h do tempo de ensaio e a amostra de secagem precisou apenas de 6 h do tempo de ensaio para alcançar a secagem absoluta. Ao utilizarmos três bandejas de secagem no ensaio de 600 g a água evaporada aumentou de 39 para 63 % passados 4 h do tempo de ensaio e

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

foram necessários apenas 6 h do tempo de ensaio para alcançar-se a secagem absoluta. Portanto o aumento da área de secagem resultou em um aumento da água evaporada.

Table 4.6: Comparação das percentagens de massa evaporadas para o ensaio do tipo A vs C, para a plataforma B

Comparação do ensaio do tipo A vs C								
Tempo (h)	E2B (1 bandeja) vs E11B (2 bandeja)		E3B (1 bandeja) vs E12B (3 bandeja)		E4B (1 bandeja) vs E13B (4 bandeja)		E5B (1 bandeja) vs E14B (5 bandeja)	
	Massa inicial (g)							
	400		600		800		1000	
0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
2	43 %	52 %	35 %	43 %	27 %	38 %	23 %	31 %
4	59 %	65 %	56 %	61 %	46 %	59 %	39 %	53 %
6	64 %	66 %	65 %	64 %	57 %	65 %	50 %	62 %
8	65 %	66 %	69 %	64 %	64 %	65 %	58 %	64 %
10	65 %	66 %	70 %	64 %	67 %	65 %	63 %	64 %

A tabela 4.6, representa novamente as percentagens das águas evaporadas ao longo dos ensaios do tipo A e C, em seis (6) instantes diferentes, neste caso para a plataforma B. Comparando os dois ensaios nota-se também a grande influência da variação da área de secagem, semelhante ao ensaio com a plataforma A. Para esta plataforma, aumentamos até 5 bandejas e conseqüentemente a água evaporada aumentou e atingiu-se a secagem absoluta em 6h de ensaio ao contrário do ensaio E5B que precisa de mais de 10 h de ensaio. Portanto o aumento da área de secagem foi um fator importante para a eficiência da secagem.

### 4.5.4 Influência das distâncias entre as bandejas no processo de secagem do Fertagri IIA

Como descrito no epígrafe 3.1.2, usamos uma estufa elétrica Carbolite, serial nº 23548, tipo NR-200F, a troca de calor no interior desta estufa ocorre por meio de convecção forçada, através da troca de calor entre um fluido e um sólido quando estão em presença de um gradiente de temperatura. O ar quente circula no interior da estufa e em função do gradiente de temperatura dá-se a transferência de calor para o sólido. O gradiente de temperatura entre a superfície do sólido em contato com o ar e o interior do lido provoca a transferência de massa líquida para a superfície. Em função deste fenômeno aumentamos as distâncias entre as bandejas de modo a aumentar a quantidade de fluido em contato com o Fertagri IIA e percebermos de que modo afetaria o processo de secagem.

Table 4.7: Percentagens de massa evaporadas para o ensaio do tipo D

Tempo (h)	Ensaio do tipo D							
	E15 – A	E16 – A	E17 – A	E18 – A	E15 – B	E16 – B	E17 – B	E18 – B
0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
2	31 %	32 %	33 %	36 %	49 %	51 %	48 %	49 %
4	52 %	55 %	54 %	54 %	66 %	65 %	65 %	67 %
6	65 %	66 %	64 %	62 %	70 %	68 %	68 %	69 %
8	69 %	70 %	68 %	64 %	71 %	69 %	68 %	69 %
10	69 %	71 %	69 %	65 %	71 %	69 %	69 %	70 %

Na tabela 4.7, apresenta-se os resultados das percentagens de massa evaporadas para os

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

ensaios do tipo D em 6 instantes diferentes. Da leitura dos valores, notamos que as distantes entre as bandejas não foi um fator relevante para o processo de secagem. Os resultados obtidos tanto na plataforma A como na B, são todos muito próximos, apresentando algumas diferenças de até 4 % no máximo. Mas esta diferença é novamente causada devido a heterogeneidade do Fertagri IIA. Portanto, a variação das distâncias entre as bandejas não foi um fator relevante no processo de secagem do Fertagri IIA.

### 4.5.5 Influência das características das bandejas de secagem no processo de secagem do Fertagri IIA

Como já dito anteriormente, o processo de secagem depende também da plataforma de secagem usada e uma das formas de alterar as características desta, é modificando a sua superfície de secagem, como foi feito durante o ensaio utilizando duas plataformas diferentes. Ao utilizamos uma superfície perfurada, pretendemos com isto aumentar a área de contato entre o fluido quente e o Fertagri IIA e como consequência aumentar a massa evaporada como podemos ver nas tabelas abaixo.

Table 4.8: Comparação entre as plataformas de secagens, para o ensaio do tipo A

Ensaio do tipo A – Temperatura constante											
Nº do ensaio	1		2		3		4		5		
Massa (g)	200		400		600		800		1000		
Plataforma	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
Tempo (h)	0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	2	48 %	58 %	36 %	43 %	21 %	35 %	18 %	27 %	14 %	23 %
	4	65 %	67 %	51 %	59 %	39 %	56 %	33 %	46 %	26 %	39 %
	6	66 %	68 %	62 %	64 %	51 %	65 %	44 %	57 %	35 %	50 %
	8	66 %	68 %	65 %	65 %	59 %	69 %	53 %	64 %	43 %	58 %
	10	67 %	68 %	66 %	65 %	64 %	70 %	59 %	67 %	49 %	63 %

Table 4.9: Comparação entre as plataformas de secagens, para o ensaio do tipo B

Ensaio do tipo B – Massa constante (600 g)											
Nº do ensaio	6		7		8		9		10		
Massa (g)	40		60		80		100		120		
Plataforma	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
Tempo (h)	0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	2	9 %	16 %	14 %	25 %	21 %	32 %	26 %	43 %	33 %	50 %
	4	17 %	29 %	27 %	42 %	39 %	52 %	44 %	61 %	55 %	64 %
	6	24 %	39 %	37 %	53 %	51 %	62 %	56 %	66 %	64 %	66 %
	8	30 %	47 %	45 %	59 %	59 %	65 %	62 %	67 %	66 %	67 %
	10	36 %	54 %	52 %	63 %	63 %	66 %	65 %	68 %	66 %	67 %

Dados das tabelas 4.9;4.10;4.11 representam as percentagens da água evaporada, em seis períodos para todo os ensaios realizados neste trabalho experimental. Nelas compare os comportamentos das plataformas A face B. Pode-se observar que a percentagem de água evaporada face a massa inicial da plataforma B, foi sempre maior que a percentagem da plataforma A e consequentemente o tempo de secagem da plataforma B foi menor. Como exemplo, podemos ver na tabela 4.9, no ensaio 1 e 2, para a secagem absoluta a plataforma B, necessitou apenas de 6 h de ensaio, ao passo que a plataforma A, precisou de mais de 6 h de ensaio. Os orifícios presentes nas bandejas da plataforma B proporcionam

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

Table 4.10: Comparação entre as plataformas de secagens, para o ensaio do tipo C

Ensaio do tipo C								
Nº do ensaio	11		12		13		14	
Nº de bandejas	2		3		4		5	
Plataforma	A	B	A	B	A	B	A	B
0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
2	36 %	52 %	42 %	43 %		38 %		31 %
4	58 %	65 %	63 %	61 %		59 %		53 %
6	65 %	66 %	67 %	64 %		65 %		62 %
8	66 %	66 %	67 %	64 %		65 %		64 %
10	66 %	66 %	67 %	64 %		65 %		64 %

Table 4.11: Comparação entre as plataformas de secagens, para o ensaio do tipo D

Ensaio do tipo D								
Nº do ensaio	15		16		17		18	
Distâncias (cm)	4		5		6		7	
Plataforma	A	B	A	B	A	B	A	B
0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
2	31 %	49 %	32 %	51 %	33 %	48 %	36 %	49 %
4	52 %	66 %	55 %	65 %	54 %	65 %	54 %	67 %
6	65 %	70 %	66 %	68 %	64 %	68 %	62 %	69 %
8	69 %	71 %	70 %	69 %	68 %	68 %	64 %	69 %
10	69 %	71 %	71 %	69 %	69 %	69 %	65 %	70 %

uma superfície de transferência de calor maior do que as bandejas da plataforma A que tem uma superfície plana e as tabelas referidas comprovam isto.

# Capítulo 5

## Conclusão e Trabalho Futuro

O objetivo principal da presente dissertação era estudar os parâmetros de secagem de compostos orgânicos, analisando algumas das grandezas que lhe estão associadas. Desta forma, face as suas características e ao processo de tratamento a que são sujeitos os compostos orgânicos, conclui-se que:

Em relação à massa inicial, segundo as leituras realizados nos ensaios, conclui-se que com temperatura de secagem constante, o aumento da massa inicial causa a diminuição da percentagem do fluxo de água evaporada face à massa inicial e consequentemente o aumento do tempo de secagem para os dois tipos de superfície estudada.

Relativamente aos resultados da temperatura de secagem no nosso estudo, verificou-se que com massa inicial constante, o aumento da temperatura de secagem causa o aumento da percentagem do fluxo de água face à massa inicial e consequentemente causa a diminuição do tempo de secagem para os dois tipos de superfície estudada.

Quanto ao número de andares da plataforma de secagem, constatou-se que houve alterações no fluxo de água quando se comparou os resultados da utilização de uma única bandeja de secagem com a utilização de várias bandejas de secagem. De um modo geral, a resposta ao aumento do número de andares foi maior fluxo de água a sair do material e consequentemente menor tempo de secagem com relação ao ensaio do tipo A.

Em relação à avaliação das distâncias entre as bandejas no processo de secagem dos compostos orgânico, no presente estudo, verificou-se que da variação destas distâncias não resultaram mudanças significativas no fluxo de água a sair do material nem nos tempos de secagem, tanto para a superfície do tipo A quanto para a do tipo B.

Com relação aos resultados das características das bandejas de secagem, verificou-se que o fluxo de água a sair do material e consequentemente os tempos de secagem em todos os ensaios tiveram influência das superfícies de secagem utilizadas. A superfície de secagem B apresentou maior fluxo de água e menores tempos de secagem em comparação com a superfície A, em todos os ensaios.

Por fim, os resultados deste estudo parecem indicar que a heterogeneidade do composto orgânico em estudo também teve influência no fluxo de água e consequentemente no tempo de secagem. O fluxo de água foi superior nos ensaios com as amostras mais homogêneas possíveis. Adicionalmente, a massa final foi melhor controlada, visto que os orifícios presentes na superfície B, permitem fugas de pequenas partículas para o interior da estufa.

Espera-se, assim, que este projeto possa contribuir para mais um passo no conhecimento e compreensão do tema em estudo, e ainda incentivar a continuação de trabalhos nesta área.

### 5.1 Trabalho Futuro

Após a realização deste trabalho de dissertação verificou-se que alguns aspetos relacionados com a temática em estudo ficaram ainda por explorar com maior profundidade e que podem vir a ser úteis em investigações futuras. Assim sendo, dada a relevância do tema, são agora propostos alguns temas de trabalhos a desenvolver no futuro e que dão continuidade a este trabalho:

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

- Avaliação energética e eficiência de unidades de secagem de compostos orgânicos. É necessário obter indicadores de referência de energia térmica e energia elétrica específica por unidade de massa de lamas seca ou por unidade de massa evaporada.
- Avaliação económica do funcionamento de uma unidade de secagem de compostos orgânicos para diferentes fontes energéticas. É importante conhecer quais as potenciais fontes de energia residual ou renovável e a disponibilidade e potencial energético de cada uma.
- Desenvolvimento e construção de um túnel de secagem experimental e à escala laboratorial, que permita estudar o processo de secagem do composto, em condições mais próximas da realidade.

## Bibliografia

- [1] G. Opersan. 5 vantagens da modalidade de tratamento de águas e efluentes o&m. [Online]. Available: <https://info.opersan.com.br/vantagens-tratamento-de-aguas-e-efluentes-om> xv, 1
- [2] J. V. Liz, “Contribuição para o estudo de sistemas de secagem de lamas de etar,” Ph.D. dissertation, Universidade de Coimbra, 2017. xv, 6, 27
- [3] C. MacCallum, B. R. Blackwell, and L. Toresein, “Cost benefit analysis of systems using flue gas or steam for drying of wood waste feedstocks,” 1981. xv, 11, 12, 13
- [4] J. S. Tumuluru, C. T. Wright, J. R. Hess, and K. L. Kenney, “A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application,” *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 5, no. 6, pp. 683–707, 2011. xv, 2, 14
- [5] Dryingmachineschina Secador disco rotativo rotativo. (2018) Secador disco rotativo rotativo. [Online]. Available: <http://dryingmachineschina.com.pt/1-1-hollow-paddle-dryer.html> xv, 14
- [6] W. A. Amos, “Report on biomass drying technology,” National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US), Tech. Rep., 1999. xv, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17
- [7] R. Connor, S. Uhlenbrook, E. Koncagül, A. Renata, and C. Ortigara, “The united nations world water development report 2017. executive summary,” *UN, Rep. SC-2017/WS/1*, 2017. 1
- [8] J. C. Gonçalves, “Análise das tecnologias correntes para o tratamento e secagem de lamas de etar,” Ph.D. dissertation, Universidade de Coimbra, 2017. 2
- [9] Statistics | eurostat. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env\\_ww\\_spd/settings\\_1/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ww_spd/settings_1/table?lang=en) 2
- [10] M. Danish, H. Jing, Z. Pin, L. Ziyang, and Q. Pansheng, “A new drying kinetic model for sewage sludge drying in presence of cao and naclO,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 106, pp. 141–152, 2016. 2
- [11] R. J. V. d. Sousa *et al.*, “Estratégias de gestão de lamas das estações de tratamento de águas residuais (etar): estrusão de lamas para aplicação na agricultura,” 2005. 2, 5, 8
- [12] G. Chen, P. Lock Yue, and A. S. Mujumdar, “Sludge dewatering and drying,” *Drying technology*, vol. 20, no. 4-5, pp. 883–916, 2002. 2, 9
- [13] N. Kaliyan and R. V. Morey, “Factors affecting strength and durability of densified biomass products,” *Biomass and bioenergy*, vol. 33, no. 3, pp. 337–359, 2009. 2
- [14] M. Zamorano, V. Popov, M. Rodríguez, and A. García-Maraver, “A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 3133–3140, 2011. 2
- [15] L. I. Fusinato *et al.*, “Caracterização do composto orgânico gerado na compostagem de resíduos da malacocultura,” 2021. 5

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

- [16] M. Perez-Murcia, R. Moral, J. Moreno-Caselles, A. Perez-Espinosa, and C. Paredes, “Use of composted sewage sludge in growth media for broccoli,” *Bioresource technology*, vol. 97, no. 1, pp. 123–130, 2006. 7
- [17] L. Metcalf, “Wastewater engineering: treatment and reuse. metcalf & eddy inc,” 2003. 7
- [18] A. Christodoulou and K. Stamatelidou, “Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide,” *Water Science and Technology*, vol. 73, no. 3, pp. 453–462, 2016. 8
- [19] Ministério da Economia. (2015) Decreto-lei n.º 103/2015 de 15 de junho. Diário da República n.º 114/2015, Série I de 2015-06-15, páginas 3756 - 3788. [Online]. Available: <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/103/2015/06/15/p/dre/pt/html> 8
- [20] Ministérios da Economia e da Inovação e da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas. (2006) Portaria n.º 1322/2006 de 24 de novembro. [Online]. Available: [http://www.oern.pt/documentos/legislacao/portarias/P1322\\_2006.pdf](http://www.oern.pt/documentos/legislacao/portarias/P1322_2006.pdf) 8
- [21] Conselho da União Europeia. (1991) Directiva 91/692/cee do conselho, de 23 de dezembro de 1991. Diário da República n.º 114/2015, Série I de 2015-06-15, páginas 3756 - 3788. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/1991/692/oj> 8
- [22] Conselho das Comunidades Europeias. (1986) Directiva 86/278/cee do conselho de 12 de junho de 1986. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:31986L0278> 8
- [23] Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. (2006) Diário da república n.º 118/2006, série i-a de 2006-06-21, páginas 4380 - 4388. [Online]. Available: <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/118/2006/06/21/p/dre/pt/html> 8
- [24] Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. (2009) Diário da república, 1.ª série — n.º 192 — 2 de outubro de 2009. [Online]. Available: <https://files.dre.pt/1s/2009/10/19200/0715407165.pdf> 9
- [25] N. M. R. d. Silva, “Potencialidade da valorização das lamas de depuração produzidas nas etar do algarve,” Ph.D. dissertation, 2017. 9
- [26] B. L. C. Pereira, “Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico,” 2014. 9
- [27] C. J. Roos, *Biomass drying and dewatering for clean heat & power*. Northwest CHP Application Center Olympia, WA, USA, 2008. 9, 11
- [28] S. T. Costa, “Modelação do processo de secagem de lamas de etar por convecção natural,” Ph.D. dissertation, Universidade de Coimbra, 2018. 9, 28
- [29] V. Berco, “Análise qualitativa de lamas de etar e competitividade económica dos processos de tratamento e escoamento: caso da etar da guia,” Ph.D. dissertation, Universidade de Lisboa (Portugal), 2013. 9, 11
- [30] C. A. G. Godinho, “Impacte da revisão da directiva valorização de lamas nos custos de tratamento de águas residuais,” Ph.D. dissertation, FCT-UNL, 2009. 11

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

- [31] B. Ernt, "Utilization of wood waste as fuel for rotary and flash tube wood dryer operations," 1982. 12
- [32] C. Wang, C. Chang, J. Lee *et al.*, "Bagasse drying system by stack gases." *Taiwan Sugar*, vol. 37, no. 5, pp. 15–19, 1990. 12
- [33] S. Hulkkonen, O. Heinonen, J. Tiihonen, and R. Impola, "Drying of wood biomass at high pressure steam atmosphere; experimental research and application," *Drying Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 869–887, 1994. 15
- [34] S. Hulkkonen, M. Raiko, and M. Aijala, "High efficiency power plant processes for moist fuels," *IGTI6. Cited by Amos [374]*, 1991. 15
- [35] C. Svensson, "Industrial applications for new steam drying process in forest and agricultural industry," in *Drying'85*. Springer, 1985, pp. 415–419. 15
- [36] A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*. CRC press, 2006. 15
- [37] P. Kumar and A. Mujumdar, "Superheated steam drying—a state of the art survey," *Drying of Solids; Mujumdar, AS, Ed.; Sarita Prakashan: Meerut, India*, 1990. 15, 16, 17, 18
- [38] J. Berghel and R. Renström, "Usefulness and significance of energy and mass balances of a fluidized superheated steam dryer," *Drying Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 1083–1098, 2001. 15
- [39] P. Jones, "High frequency dielectric heating in paper making," *Drying Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 217–244, 1986. 16
- [40] S. Syahrul, F. Hamdullahpur, and I. Dincer, "Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles," *Exergy, an International Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 87–98, 2002. 18
- [41] A. Motevali, S. Minaei, A. Banakar, B. Ghobadian, and M. H. Khoshtaghaza, "Comparison of energy parameters in various dryers," *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 711–725, 2014. 18

## **Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico**

# Anexos

## 5.2 Anexo A

Ensaio do tipo A										
tempo (min)	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
	E1A	E1B	E2A	E2B	E3A	E3B	E4A	E4B	E5A	E5B
0	200,58	200,23	400,44	400,28	600,75	600,14	800,5	800,11	1000,21	1000,19
20	182,33	170,41	378,82	362,32	583,31	558,66	770,6	762,44	979,99	960,68
40	163,51	144,33	355,91	330,18	559,62	517,68	760,85	723,08	953,47	919,84
60	144,4	123,9	311,9	278,03	536,92	484,83	733,62	685,69	926,05	877,52
80	128,64	107,46	291,62	254,97	514,87	452,61	705,58	645,33	900,68	840,19
100	115,73	93,28	274,18	233,87	492,31	418,53	681,67	613,03	876,95	806,06
120	104,68	84,28	257,92	226,33	472,37	389,08	657,81	580,54	855,51	774,23
140	92,78	76,28	253,43	215,63	452,92	361,46	634,26	549,75	831,77	739,95
160	88,33	75,03	238,93	198,61	431,58	333,72	614,74	524,21	812,69	713,83
180	79,83	67,14	228,8	189,07	416,32	315,42	593,1	496,65	791,43	685,47
200	75,34	65,98	216,16	178,53	401,22	298,11	571,42	472,33	771,27	658,83
220	71,81	65,48	205,12	170,32	384,04	280,68	555,16	453,1	754,53	637,69
240	70,09	65,23	194,41	163,68	365,57	263,92	537,36	433,58	737,32	613,87
260	69,72	65,16	183,48	158,59	354,35	252,58	519,17	413,14	720,22	590,93
280	69,43	64,99	175,65	154,39	340	241,46	503,47	398,14	701,04	568,99
300	69,36	64,88	167,69	150,41	329,15	230,51	488,63	382,69	686,42	550,05
320	69,08	64,86	161,29	145,96	317,7	222,14	474,91	368,08	672,18	530,11
340	68,97	64,86	155,91	145,51	306,75	214,01	460,25	355,19	655,87	510,71
360	68,89	64,83	151,62	144,78	295,24	208,58	447,65	343,39	645,58	495,98
380	68,61	64,77	147,44	144,28	285,95	203,06	435,08	331,78	630,68	480,27
400	68,5	64,7	144,35	143,39	276,94	199,66	422,18	321,63	618,35	465,36
420	68,01	64,7	141,92	143,35	268	194,3	412,32	313,5	605,01	452,38
440	67,99	64,3	140,72	142,68	259,92	192,43	400,79	304,49	594,17	440,48
460	67,99	64,3	139,71	141,83	253,27	190	389,59	298,67	582,15	427,59
480	67,96	64	138,58	141,7	246,04	188,27	379,9	290,5	571,12	418,39
500	67,9	63,97	138,29	141,36	239,08	185,98	370,64	284,21	559,37	409,02
520	67,2	63,93	137,43	140,85	233,77	184,12	359,56	279,27	549,13	400,22
540	66,94	63,92	137,04	140,57	228,53	183,29	351,09	273,33	539,1	391,86
560	66,94	63,92	136,41	139,93	224,21	182,12	342,89	268,66	529,42	384,47
580	66,9	63,9	135,46	139,81	218,62	181,58	337,04	265,73	519,42	378,23
600	66,84	63,9	134,87	139,07	214,79	181,07	328,78	260,9	510,58	372,33

Fig. 5.1: Dados do ensaio do tipo A

## Estudo experimental do processo de secagem de um composto orgânico

### 5.3 Anexo B

Ensaio do tipo B										
tempo (min)	Ensaio 6		Ensaio 7		Ensaio 8		Ensaio 9		Ensaio 10	
	E6A	E6B	E7A	E7B	E8A	E8B	E9A	E9B	E10A	E10B
0	600,87	600,51	600,72	600,26	600,62	600,28	600,11	600,21	600,9	600,38
20	590,47	579,41	587,37	569,58	583,72	569,75	558,02	548,55	576,17	540,93
40	583,11	563,55	569,74	538,63	559,92	529,45	548,01	484,25	536,62	474,17
60	573,7	547,42	556,82	517,83	536,92	495,14	515,77	432,94	498,22	420,14
80	565,8	530,86	539,65	491,03	512,32	461,57	493,45	401,33	463,22	373,62
100	556,38	515,99	526,89	470,53	491,37	432,96	467,68	368,09	428,99	333,52
120	548,43	501,97	513,8	450,33	473,32	407,7	442,76	339,7	400,67	303,12
140	539,77	488,85	499,32	429,55	454,11	381,26	420,87	314,57	374,25	277,04
160	531,36	475,13	486,77	411,84	433,85	358,99	400,62	292,38	349,73	256,63
180	522,72	462,57	474,32	394,39	417,52	341,9	381,72	274,01	327,14	240,11
200	514	449,99	461,63	379,3	401,42	323,76	364,81	257,44	305,74	228,58
220	502,62	437,61	449,78	363,58	384,57	306,08	347,84	244,49	288,14	218,8
240	497,2	427,42	439,21	349,52	368,38	291	333,8	233,21	271,42	213,65
260	491,57	415,47	428,42	336,43	354,52	276,99	318,73	223,49	258,45	208,84
280	485,18	404,92	417,73	318,79	342,09	264,13	306,9	217,06	245,46	205,79
300	477,99	394,59	407,23	312,52	328,65	255,01	297,84	213,59	235,58	204,09
320	470,92	383,76	397,93	302,56	315,67	245,91	283,2	208,18	226,76	202,85
340	463,25	373,88	388,1	291,77	302,77	236,98	273,36	203,83	220,22	202,8
360	456,96	366,18	378,57	282,75	293,25	229,39	265,12	202,34	214,39	202,78
380	450,67	357,09	369,03	274,11	283,8	225,34	257,46	200,55	211,35	202,63
400	443,4	347,38	361,76	268,18	273,79	219,89	250,11	199,77	208,82	201,96
420	436,07	339,14	352,48	263,01	266,09	216,05	244,52	199,57	206,44	201,79
440	429,69	331,43	345,55	255,27	258,99	213,27	238,26	199,08	205,38	201,62
460	424,27	323,04	336,96	249,55	251,32	210,9	233,01	198,5	204,92	201,02
480	418,09	316,1	328,85	243,58	246,13	209,37	228,45	197,66	204,37	200,87
500	410,59	306,75	321,65	239,44	239,27	208,28	224,44	196,74	204,24	200,6
520	406,33	302,58	314,89	236,28	234,51	207,14	220,42	195,84	204,07	199,38
540	401,34	297,21	308,59	230,86	230,15	206,41	217,11	195,32	203,7	199,07
560	395,55	291,45	302,19	227,32	225,96	204,17	214,12	194,85	203,65	198,95
580	390,23	285,73	296,11	223,84	221,88	203,64	211,53	194,68	203,02	198,7
600	384,83	279,2	289,47	222,01	219,56	203,18	209,14	194,25	202,83	198,52

Fig. 5.2: Dados do ensaio do tipo B

## 5.4 Anexo C

Ensaio do tipo C								
tempo (min)	Ensaio 1		Ensaio 11		Ensaio 12		Ensaio 13	Ensaio 14
	E1A	E1B	E11A	E11B	E12A	E12B	E13B	E14B
0	200,58	200,23	400,34	400,17	600,13	600,87	800,21	1000,04
20	182,33	170,41	368,64	353,51	537,46	554,69	735,25	934,59
40	163,51	144,33	350,31	305,80	490,76	504,86	682,60	890,56
60	144,40	123,90	324,30	268,13	452,24	456,77	635,73	838,75
80	128,64	107,46	302,56	239,76	413,90	417,03	588,28	779,05
100	115,73	93,28	276,63	212,57	377,94	376,71	541,56	732,87
120	104,68	84,28	255,07	191,62	345,18	343,55	498,31	687,77
140	92,78	76,28	235,81	175,78	319,21	315,20	460,38	641,88
160	88,33	75,03	220,39	164,31	292,75	289,89	431,88	599,45
180	79,83	67,14	203,12	154,89	270,72	270,82	396,37	562,86
200	75,34	65,98	188,60	148,30	254,85	254,44	369,60	529,10
220	71,81	65,48	177,69	144,59	237,23	243,32	348,87	496,72
240	70,09	65,23	167,88	141,70	224,23	234,72	327,82	470,23
260	69,72	65,16	159,35	140,75	209,43	227,17	303,88	448,36
280	69,43	64,99	153,21	139,77	205,43	223,75	294,72	428,51
300	69,36	64,88	147,85	138,43	202,86	221,00	290,37	410,45
320	69,08	64,86	143,16	138,27	201,48	219,00	285,04	398,13
340	68,97	64,86	140,10	138,20	201,24	218,06	283,69	387,34
360	68,89	64,83	138,28	138,04	200,38	217,15	282,67	380,66
380	68,61	64,77	137,16	138,00	199,73	216,92	281,59	374,45
400	68,50	64,70	135,91	137,94	199,46	216,81	280,12	371,09
420	68,01	64,70	135,37	137,91	198,75	216,15	279,33	367,97
440	67,99	64,30	134,94	137,77	198,01	215,57	278,61	363,27
460	67,99	64,30	134,77	137,02	197,42	214,70	278,04	361,87
480	67,96	64,00	134,70	136,86	196,96	214,68	277,84	361,65
500	67,90	63,97	134,67	136,81	196,90	214,60	277,12	361,54
520	67,20	63,93	134,62	136,52	196,87	214,56	276,91	361,36
540	67,20	63,93	134,62	136,52	196,87	214,56	276,91	361,36
560	67,20	63,93	134,62	136,52	196,87	214,56	276,91	361,36
580	67,20	63,93	134,62	136,52	196,87	214,56	276,91	361,36
600	67,20	63,93	134,62	136,52	196,87	214,56	276,91	361,36

Fig. 5.3: Dados do ensaio do tipo C

## 5.5 Anexo D

Ensaio do tipo D								
tempo (min)	Ensaio 15		Ensaio 16		Ensaio 17		Ensaio 18	
	E15A	E15B	E16A	E16B	E17A	E17B	E18A	E18B
0	600,66	600,86	600,03	600,36	600,67	600,32	600,32	600,25
20	574,17	525,8	573,28	530,83	563,93	527,09	548,7	528,1
40	540,09	475,8	537,61	476,52	532,34	476,78	511,76	465,67
60	509,13	427,59	505,01	388,83	497,26	430,06	473,73	415,88
80	479,75	386,98	477,56	353,08	462,56	379,43	442,87	372,12
100	446,5	347,95	438,74	319,54	432,45	341,07	414,47	334,58
120	412,45	308,52	410,09	293,63	403,79	309,39	383,51	303,9
140	386,04	281,65	381,23	273,16	376,4	282,04	361,77	254,58
160	370,14	266,5	363,97	255,13	352,88	256,49	339,05	237,37
180	348,2	246,7	333,66	238,88	325,06	239,39	319,1	222,53
200	324,94	229,08	314,2	227,67	309,05	229,46	300,53	211,84
220	306,27	217,58	296,98	215,97	291,23	219,04	287,73	203,17
240	286,37	205,85	272	208,32	275,16	210,66	274,89	197,1
260	269,26	197,37	261,9	201,38	262,07	205,35	265,01	193,13
280	253,94	191,33	245,67	196,98	248,87	201,3	255,48	190,36
300	241,52	187,04	232,1	193,81	238,4	199,1	246,29	188,38
320	229,72	183,1	222,61	191,64	228,13	196,97	238,77	187,52
340	219,41	181,53	212,9	189,85	221,06	195,8	233	187,25
360	210,97	179,64	203,64	189,39	214,12	194,78	227,41	187,08
380	204,5	178,22	194,64	189,07	208,58	194,24	224,94	186,9
400	199,28	177,1	191,1	188,49	204,12	193,51	221,37	186,01
420	194,5	176,71	185,8	188,35	200,38	192,91	219,45	185,57
440	190,77	176,46	182,44	187,57	197,62	192,39	216,53	185,02
460	188,07	175,86	179,72	187,17	195,33	191,48	216,08	184,87
480	187,95	175,43	177,94	186,53	193,47	191,05	215,54	184,09
500	186,59	174,5	176,89	186,16	192,4	190,78	214,51	183,67
520	185,92	173,92	176,13	185,48	191,6	190,07	214,28	183
540	185,87	173,32	175,9	184,87	190,59	189,67	214,23	183
560	185,62	173,05	175,5	184,03	189,94	189	213,79	182,87
580	185,21	173	175,1	184,03	189,15	188,92	213	182,3
600	185,21	173	175,1	184,03	189,15	188,92	213	182,3

Fig. 5.4: Dados do ensaio do tipo D