



João Vicente Liz

# Contribuição para o estudo de sistemas de secagem de lamas de ETAR

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente  
na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

julho/2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Contribuição para o estudo de sistemas de secagem de lamas de ETAR**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

## **Contribution to the study of drying systems of sewage sludge from WWTP**

**Autor**

**João Vicente Liz**

**Orientador**

**Professor José Carlos Miranda Góis**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professora Doutora Margarida Maria João de Quina  
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra  
Professor Doutor José Carlos Miranda Góis  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, julho, 2017**







## **Agradecimentos**

A realização desta dissertação marca o fim de uma etapa muito importante da minha vida. Gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram de forma decisiva para a sua concretização e que me acompanharam no decurso deste trabalho, com especial atenção:

Ao orientador José Carlos Miranda Góis, pela competência científica e acompanhamento do trabalho, pela disponibilidade revelada ao longo deste tempo de trabalho, assim como pelas críticas, correções e sugestões relevantes feitas durante a orientação.

Tendo consciência que sem eles não teria sido de todo possível, dirijo um agradecimento especial aos meus pais e ao meu irmão, por serem modelos de coragem, pelo seu apoio, amizade e paciência demonstrados.



## Resumo

O principal objetivo deste trabalho é uma análise de sistemas/tecnologias de secagem de lamas, visando identificar o modelo mais eficiente do ponto de vista energético e tempo de secagem.

Inicialmente apresenta-se uma descrição resumida dos diversos processos de tratamento de águas residuais urbanas e industriais, nomeadamente o tratamento da fase líquida, constituído pelos tratamentos preliminar, primário, secundário e terciário, e o tratamento da fase sólida, constituído por processos mecânicos, químicos e biológicos. São também referidos os aspetos mais relevantes do enquadramento técnico-legal do processo de gestão de lamas.

De modo a compreender a dimensão do problema da gestão de águas residuais em Portugal, é analisado o número de ETAR, o volume de águas residuais tratadas e de lamas produzidas, bem como as características e composição das lamas.

Na perspetiva de identificar os diferentes sistemas de secagem de lamas e os resultados do seu desempenho, procedeu-se à análise de vários sistemas tecnológicos e estudos experimentais de secagem de lamas de ETAR, na literatura especializada e em informações de divulgação de fabricantes. Os resultados desta pesquisa mostram que o aumento da temperatura tem uma influência significativa no aumento da cinética de secagem das lamas e conseqüente redução do tempo de secagem, e que a cinética de secagem é influenciada também pela área específica exposta e condicionada pela formação de uma crosta superficial, que trava a velocidade de secagem. Entre outros, foram analisados sistemas de secagem direta e indireta, de película fina e de atomização, e em termos de fontes de energia foi analisado o uso de energia solar e produzido por bomba de calor.

Da análise realizada, concluiu-se que um secador de lamas mais eficaz em termos do tempo de secagem das lamas e consumo energético é aquele que promove a movimentação/agitação das lamas durante o processo de secagem. Um secador deste tipo permitirá uma temperatura de funcionamento relativamente baixa, abrindo perspetivas para se poder fazer a recuperação de energia residual de gases de exaustão, permitindo assim baixar os custos de funcionamento do secador. Em alternativa deve ser privilegiado o uso energias renováveis (solar, queima de resíduos ou biogás). Na perspetiva de uma valorização agrícola das lamas, praticadas em vários países com terrenos deficitários em matéria orgânica, a higienização das lamas e a redução dos maus odores é fundamental durante o processo de secagem e pode ser melhorada com a adição de produtos químicos, como o CaO.

**Palavras-chave:** Secagem, lamas de ETAR, tecnologia, secadores, águas residuais.





## Abstract

The main objective of the work presented is an analysis of sludge drying systems/technologies, aiming to identify the most efficient model of the energy point of view and drying time.

Firstly, it is presented a summary description of the various processes of urban and industrial wastewater treatment plants, namely the treatment of the liquid phase, involving the preliminary, primary, secondary and tertiary treatments, and the treatment of the solid phase, consisting of mechanical, chemical and biological processes. The most relevant aspects of the technical-legal framework of the sludge management process are also mentioned.

In order to understand the magnitude of the problem of wastewater management in Portugal, the number of wastewater treatment plants and the volume of wastewater treated and sludge produced are analysed, as well as the characteristics and composition of sludges.

With the goal to identify the different sludge drying systems and their performance, several technological systems and experimental studies of sewage sludge drying, available in papers and information produced by manufacturers. The results of this survey show that the increase of drying temperature has a significant influence on the increase of drying kinetics of sludge and consequently reduction of drying time, and that the drying kinetics is also influenced by the specific area of sludge and is moderated by the formation of a superficial crust, which slow down the drying speed. Among others, direct and indirect drying systems, and thin film and spray methods were analysed. It is also analysed the energy sources used: solar energy and heat pump.

Based in the overview performed, it was concluded that a sludge dryer more efficient in terms of the drying time and energy consumption is one with movement/agitation of the sludge during the drying process. A dryer with this tool will allow a relatively low drying temperature operation, opening a door to recover residual energy form exhaust gases, thereby enabling a reduction of drying cost. Alternatively, the use of renewable energies (solar, incineration or biogas) should be valorised. When agricultural valorisation of sludge is planning, in case of countries with land with organic matter deficit, the hygiene of sludge and the reduction of bad odours are crucial during the drying process and can be improved with the addition of chemicals, such as CaO.

**Keywords** Drying, sewage sludges of WWTP, technology, dryers, wastewater.



---

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Quadro legislativo de gestão de lamas.....	6
1.3. Objetivos.....	9
1.4. Metodologia de investigação .....	9
2. GESTÃO DE ÁGUAS RESIDUAIS EM PORTUGAL: RESUMO ESTATÍSTICO	11
3. COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS LAMAS DE ETAR.....	17
4. SECAGEM TÉRMICA DE LAMAS.....	21
4.1. Tecnologias de secagem de lamas .....	21
4.1.1. Secador de lamas horizontal de película fina .....	21
4.1.2. Secador de lamas por atomização.....	23
4.1.3. Secador de lamas contínuo de baixas temperaturas (sistema Watromat).....	24
4.1.4. Secador de lamas com recuperação de energia .....	24
4.1.5. Secador rotativo (sistema Manfredini & Schianchi) .....	26
4.1.6. Secagem de lamas solar (sistema Héliantis).....	28
4.1.7. Secadores de lamas por tapete .....	29
4.1.8. Comparação entre tecnologias de secagem de lamas .....	32
4.2. Resumo de estudos de secagem térmica de lamas .....	34
4.2.1. Estudo experimental da eficiência de secagem de lamas .....	34
4.2.2. Estudo da cinética de secagem de lamas com adição de CaO e NaClO.....	36
4.2.3. Estudo experimental da secagem de lamas num secador de pás rotativas ....	41
4.2.4. Estudo da modelação matemática da transferência de calor e massa num secador de lamas solar .....	44
4.2.5. Estudo de modelos cinéticos semi-teóricos e empíricos de secagem de lamas em camada fina por lâmpada de infravermelhos .....	46
5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema representativo do tratamento da fase líquida de águas residuais. ....	1
Figura 1.2 – Esquema de tratamento da fase líquida e fase sólida de uma ETAR (Adaptado de Ramos, 2011). ....	3
Figura 2.1 – Localização das ETAR em Portugal (Fonte: INSAAR, 2011). ....	12
Figura 2.2 – Percentagem de tratamento de águas residuais em Portugal por concelho (Fonte: INSAAR, 2011). ....	13
Figura 2.3 – Descarga para o meio recetor após tratamento em Portugal por concelho (Fonte: INSAAR, 2011). ....	14
Figura 2.4 – Tipos de tratamento de águas residuais por Região Hidrográfica (Fonte: INSAAR, 2011). ....	15
Figura 4.1 – Esquema representativo do sistema de secagem com secador horizontal de película fina (Fonte: Buss-SMS-Canzler, 2017). ....	22
Figura 4.2 – Diagrama esquemático de um secador por atomização (Fonte: Rosa, E.D et al, 2017). ....	23
Figura 4.3 - Esquema do sistema de secagem de lamas Watromat (Fonte: Watropur, 2017). ....	24
Figura 4.4 - Concentração de massa seca (DS) presente nas lamas após os processos de espessamento, desidratação e secagem (Fonte: Flaga e Schnotale, 2006). ....	25
Figura 4.5 - Esquema representativo da conceção da bomba de calor num sistema de secagem de lamas. (Fonte: Flaga e Schnotale, 2006). ....	26
Figura 4.6 – Imagem representativa do secador rotativo através da tecnologia Manfredini & Schianchi (Fonte: Manfredini & Schianchi, 2017). ....	27
Figura 4.7 - Imagem representativa do interior do secador rotativo através da tecnologia Manfredini & Schianchi (Fonte: Manfredini & Schianchi, 2017). ....	27
Figura 4.8 – Esquema representativo do princípio de funcionamento do secador solar Héliantis (Fonte: Héliantis, 2017). ....	28
Figura 4.9 – Princípio de funcionamento do secador solar Héliantis (Fonte: Héliantis, 2017). ....	29
Figura 4.10 – (a) Curvas de secagem das lamas em forma de cilindro; (b) Curvas de secagem das lamas em forma de bolo; (c) Curvas de secagem das lamas em forma de esfera (Adaptado de Zhu, F. et al, 2012b). ....	35
Figura 4.11 – Percentagem de humidade em função do tempo para lamas não tratadas (Adaptado de Danish et al, 2016a). ....	39
Figura 4.12 – Percentagem de humidade em função do tempo para lamas tratadas com NaClO (Adaptado de Danish et al, 2016b). ....	39
Figura 4.13 – Percentagem de humidade em função do tempo para lamas tratadas com CaO (Adaptado de Danish et al, 2016c). ....	40

Figura 4.14 – Comparação a temperatura constante de 80 °C com diferentes tratamentos químicos (Adaptado de Danish et al, 2016d).....	40
Figura 4.15 – Esquema do sistema de secagem de pás rotativas (Adaptado de Deng et al, 2009a).....	41
Figura 4.16 – Resultados experimentais, com temperatura do óleo de 80 °C e caudal de ar (Q=1,3 m <sup>3</sup> /h) (Adaptado de Deng et al, 2009b).....	42
Figura 4.17 – Comparação entre as três experiências realizadas a diferentes temperaturas (Adaptado de Deng et al, 2009c). ....	43
Figura 4.18 – Comparação entre as três experiências realizadas para diferentes caudais de ar (Adaptado de Deng et al, 2009d). ....	43
Figura 4.19 – Taxa de secagem das lamas em função da distância entre o eixo do ventilador para diferentes intervalos de tempo (Adaptado de Krawczyk, P., 2016a).....	45
Figura 4.20 – Comparação da variação diária da taxa de secagem para diferentes alturas do ventilador (Adaptado de Krawczyk, P., 2016b).....	45
Figura 4.21 – Fluxo do processo da experiência de secagem da camada fina de lamas de depuração (Adaptado de Zhou e Jin, 2016b). ....	48
Figura 4.22 – Curvas de secagem para uma temperatura de 100 °C e diferentes espessuras de bolo de lamas (a) e curvas de secagem para uma espessura de 2 mm de bolo de lamas a diferentes temperaturas de secagem (b) (Adaptado de Zhou e Jin, 2016f). ....	49
Figura 4.23 – Curva de taxa de secagem para uma temperatura de 100 °C e diferentes espessuras de bolo de lamas (a) e curva de taxa de secagem para uma espessura de 2 mm de bolo de lamas e diferentes temperaturas de secagem (b) (Adaptado de Zhou e Jin, 2016g). ....	50
Figura 4.24 – Influência da temperatura de secagem na difusividade eficaz da humidade (Adaptado de Zhou e Jin, 2016j).....	52

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Síntese das fases, processos e objetivos do tratamento das lamas (Adaptado de Tavares, 2007).....	5
Tabela 1.2 – Valores limite de concentração de metais pesados nas lamas destinadas à aplicação no solo agrícola. ....	7
Tabela 2.1 – População servida por tipo de instalação de tratamento de águas residuais (ETAR ou FSC) (Fonte: INSAAR, 2011).....	11
Tabela 2.2 – Volume de águas residuais tratadas por tipo de instalação (ETAR ou FSC) (Fonte: INSAAR, 2011). ....	15
Tabela 3.1 – Características que as lamas podem apresentar (Adaptado de Myers, 1998). ....	17
Tabela 3.2 – Composição química típica para lamas de depuração tratadas e não tratadas (Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004a). ....	18
Tabela 3.3 – Metais mais comuns presentes nas lamas de depuração (Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004b). ....	18
Tabela 3.4 – Comparação entre os níveis de nutrientes dos fertilizantes comercializados e das lamas de depuração (Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004c). ....	19
Tabela 3.5 – Métodos analíticos para determinação da composição das lamas (Adaptado de Alvarenga, P., et al, 2015).....	19
Tabela 4.1 – Comparação entre os diferentes sistemas de secagem de lamas.....	32
Tabela 4.2 – Parâmetros das lamas nas três formas (Adaptado de Zhu, F. et al, 2012a). ...	34
Tabela 4.3 – Modelos de secagem de camada fina usados neste caso de estudo (Adaptado de Zhou e Jin, 2016a). ....	47
Tabela 4.4 – Resultados da regressão não linear para uma temperatura de 100 °C e diferentes espessuras do bolo das lamas (Adaptado de Zhou e Jin, 2016h).....	51
Tabela 4.5 – Resultados da regressão não linear para uma espessura de 2 mm do bolo das lamas e diferentes temperaturas (Adaptado de Zhou e Jin, 2016i). ....	51



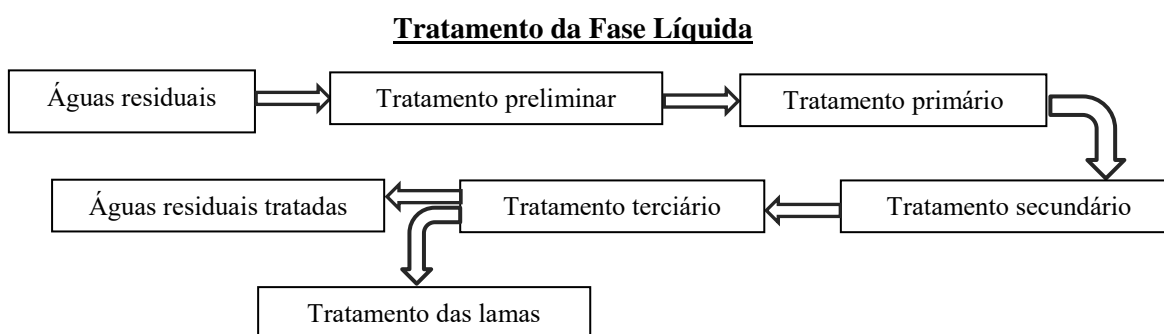


# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

O aumento da produção de lamas nas ETAR urbanas e industriais está a criar um problema ambiental de elevada escala a nível global e uma preocupação para os governos, provocada pelo aumento da população e pelo desenvolvimento industrial e socioeconómico. Para responder a este problema tem-se vindo a trabalhar no sentido de inovar e aumentar a qualidade dos sistemas de tratamento de águas residuais. Em Portugal, de acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente, e com dados produzidos pela ERSAR, no ano de 2011 existiam cerca de 1056 ETAR urbanas, que no total produziam 397.270 toneladas de lamas (base húmida).

As ETAR desempenham um papel importante na prevenção do meio ambiente, recebendo e tratando as águas residuais, por processos físicos, químicos e biológicos, contribuindo para a melhoria dos ecossistemas e a qualidade de vida das populações. No final destes processos são obtidos: água residual tratada e lamas de depuração (segundo regras ambientalmente corretas, definidas por legislação sucessivamente atualizada). Uma ETAR integra numa primeira etapa o tratamento da fase líquida, onde os processos e operações são agrupados de modo a proporcionar vários níveis de tratamento conhecidos como preliminar, primário, secundário e terciário, conforme ilustra o esquema da figura 1.1.



**Figura 1.1 – Esquema representativo do tratamento da fase líquida de águas residuais (2017).**

O tratamento preliminar consiste em operações fundamentalmente físicas de filtração e separação dos materiais mais grosseiros e sólidos facilmente sedimentáveis, provenientes das águas residuais de uso doméstico e industrial, protegendo assim as operações a jusante e reduzindo os custos de manutenção dos processos e equipamentos que constituem a ETAR. Este processo é normalmente constituído por grades, trituradores, desintegradores e câmaras desarenadoras.

O tratamento primário tem o objetivo remover a maior parte dos sólidos em suspensão presentes nas águas residuais por ação gravítica, através de um decantador/sedimentador primário. Os sólidos em suspensão ao serem removidos, vão contribuir para que exista uma redução na carência bioquímica de oxigénio na água residual, contribuindo para uma diminuição do consumo de energia e dos problemas operacionais nos tratamentos biológicos.

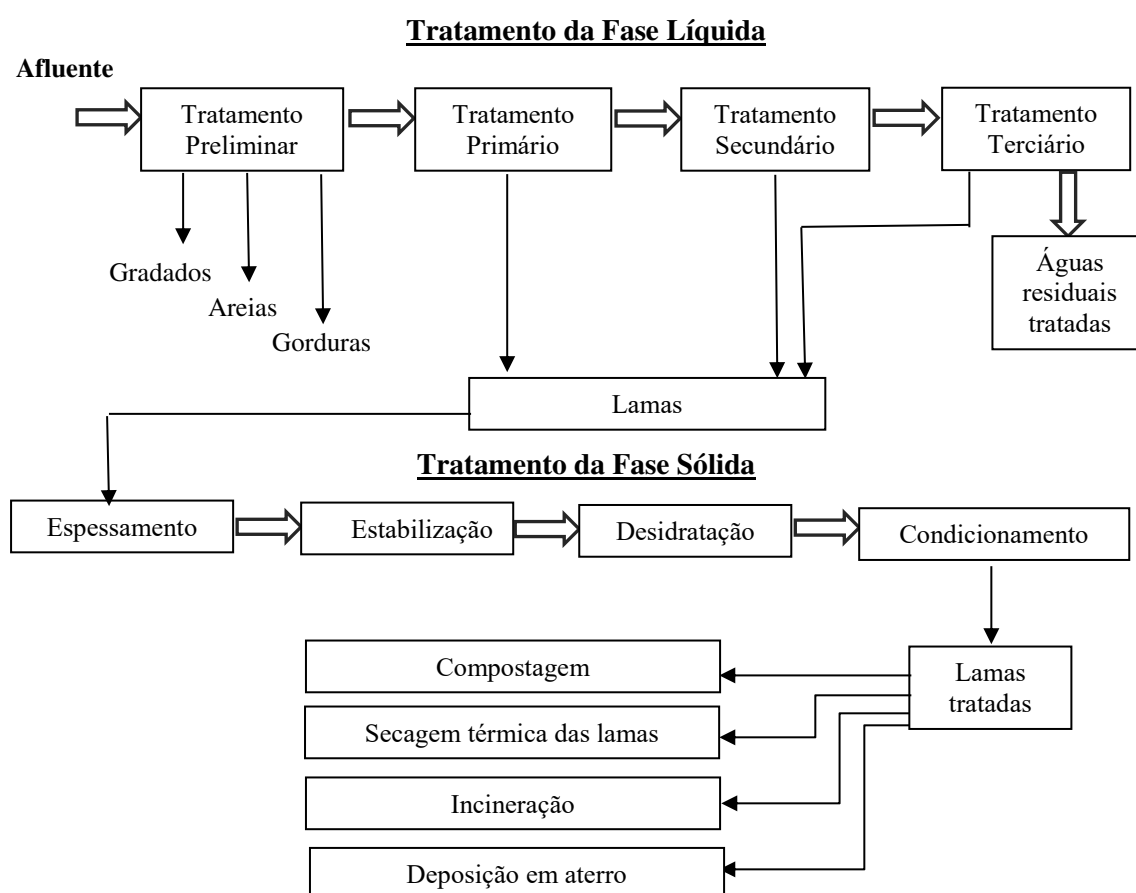
O tratamento secundário, designado também de lamas ativadas, tem como objetivo a remoção da carência bioquímica de oxigénio presente na água residual. Trata-se de um método biológico em que a massa microbiana formada num tanque de arejamento estabiliza a matéria orgânica presente no bioreator. Este processo consiste em provocar a floculação das partículas orgânicas e inorgânicas presentes no bioreator, por meio de agitação mecânica e/ou difusão do ar. É constituído por um tanque de arejamento, em que as águas residuais são misturadas com microrganismos em suspensão. Estes microrganismos, com condições próprias (temperatura, pH, oxigénio, nutrientes e tempo de residência) consomem e assimilam a matéria orgânica presente no bioreator, depurando-o e sobrevivendo à custa do oxigénio introduzido pela agitação provocada pela turbina e/ou difusor do ar. O tanque de arejamento funciona em conjunto com o decantador secundário, permitindo o depósito das lamas resultantes da ação das bactérias.

O sistema de tratamento terciário surge como complemento dos tratamentos anteriormente referidos. O objetivo do tratamento terciário consiste na remoção de poluentes que ainda se encontrem presentes na água residual após os tratamentos anteriores, os quais podem ser partículas dificilmente decantáveis, microrganismos patogénicos ou outros compostos como herbicidas ou pesticidas.

O tratamento terciário é essencialmente constituído por um processo de desinfecção e controlo de nutrientes, onde se efetua uma remoção de sólidos suspensos totais, através de uma filtração, seguida de uma remoção de microrganismos por desinfecção. O processo de desinfecção tem como objetivo remover ou destruir os microrganismos patogénicos através da adição de agentes químicos, como por exemplo, cloro, ozono, dióxido de cloro e esterilização por iões de prata, ou através de agentes físicos, tendo como exemplo a desinfecção por radiação ultravioleta, filtração estéril ou filtração por areia a baixa velocidade. Existem ainda outros tipos de tratamentos para a remoção de poluentes específicos, como por exemplo a coagulação, floculação e decantação, troca iónica e osmose inversa. As águas residuais tratadas após este tratamento podem ser utilizadas para diversos fins, como por exemplo na rega de espaços verdes, na agricultura, na lavagem de pavimentos e ruas, entre outros.

Numa segunda etapa e no seguimento das operações de tratamento da fase líquida, existe a formação de lamas, em que as suas características físicas, químicas e biológicas podem variar de acordo com o tipo de águas residuais tratadas. Estas lamas podem ser lamas primárias provenientes da decantação primária do tratamento primário, lamas secundárias ou biológicas originárias da decantação secundária do tratamento secundário e lamas terciárias provenientes do tratamento terciário, correspondendo a um subproduto do tratamento das águas residuais designado por lamas de depuração. Estas lamas possuem um

elevado teor de humidade, matéria orgânica e nutrientes, o que faz com que a sua gestão se torne um problema para produtores e operadores de lamas. O tratamento das lamas designado também como tratamento da fase sólida consiste em reduzir o seu teor de água, o volume e em estabilizar a matéria orgânica de modo a controlar possíveis efeitos adversos. Os processos do tratamento da fase sólida, podem ser mecânicos, os quais incluem o espessamento, filtração, centrifugação e desidratação, podem ser químicos, biológicos ou térmicos, tais como a estabilização, o condicionamento e a secagem térmica. A figura 1.2 apresenta um esquema no qual se encontram representadas as várias etapas no processo de tratamento da fase líquida e da fase sólida numa ETAR.



**Figura 1.2 – Esquema de tratamento da fase líquida e fase sólida de uma ETAR (Adaptado de Ramos, 2011).**

nas lamas e a redução do seu teor de água, permitindo diminuir substancialmente os custos nas operações posteriores. Os processos de espessamento geralmente mais utilizados são o espessamento gravítico, espessamento por centrifugação, flotação por ar dissolvido, mesa de espessamento e tambor rotativo. Estes processos podem também ocorrer em equipamentos de outra natureza, nomeadamente em digestores anaeróbios e em bacias de armazenamento de lamas.

O processo de estabilização das lamas tem como objetivo reduzir o teor de microrganismos patogénicos presentes nas lamas, reduzindo ou eliminando o potencial de putrefação da matéria orgânica e os odores. Assim, existem vários processos de estabilização das lamas, sendo os principais a estabilização alcalina, compostagem, digestão anaeróbia e digestão aeróbia. Este processo é apropriado se o destino final das lamas for a aplicação na agricultura, uma vez que um dos aspetos a ter em conta para esta finalidade é a redução dos microrganismos patogénicos. Se se optar pela incineração como destino final, não faz sentido utilizar o processo de estabilização.

O processo de desidratação das lamas consiste na redução do seu volume, sendo esta redução superior à que é obtida através do processo de espessamento, uma vez que o fator peso e volume se encontram associados aos custos de operação. As lamas podem ser desidratadas através de processos naturais, tais como a evaporação e a percolação, ou através de processos mecânicos, tendo como exemplo a filtração, compactação ou a separação centrífuga.

O condicionamento das lamas é um processo que tem como objetivo o tratamento das lamas através de tratamentos físicos e químicos, melhorando as suas características de modo a facilitar a separação das frações sólida e líquida. Este processo permite também a desinfeção das águas residuais e o controlo de odores. Os processos de condicionamento mais utilizados são a adição de produtos químicos, orgânicos ou inorgânicos e o tratamento térmico. Na tabela 1.1 é apresentada uma síntese dos diversos processos de tratamento da fase sólida, bem como os seus principais objetivos.

O conteúdo de água presente nas lamas geradas a partir das ETAR é de cerca de 70 a 90%, valor esse que deve ser reduzido a menos de 20% após o processo de secagem térmica, o qual requer grandes quantidades de energia para que esse objetivo seja atingido (Ohm *et al*, 2009a).

As tecnologias de secagem térmica de lamas amplamente usadas hoje em dia, incluem o método de transferência de calor por convecção, no qual o gás é aquecido entre 400 e 600°C para secar as lamas, e o método de transferência de calor por condução - um método de transferência de calor indireto, em que vapor de água a alta temperatura ou gases quentes circulam por uma “camisa” do equipamento, separada das lamas húmidas por uma parede metálica. Este processo é mais demorado, sendo em média necessário mais 40 a 60 minutos para diminuir o teor de água para cerca de 40% (Ohm *et al*, 2009b). Além disso, como a superfície das lamas endurece, a velocidade de difusão da água torna-se extremamente lenta, manifestando esse efeito na diminuição da taxa de secagem. Apesar de existirem várias soluções industriais e estudos laboratoriais de secagem de lamas provenientes de ETAR, os equipamentos usados atualmente para a secagem térmica de lamas são ineficientes no que diz respeito ao tempo de secagem necessário e aos custos da energia requerida para secar parcialmente as lamas (Ohm *et al*, 2009c).

Atualmente, as principais opções de destino final das lamas são a valorização agrícola, a incineração e a deposição em aterro. Estas soluções de destino das lamas são regulamentadas a nível Nacional e Europeu, através da aplicação de decretos-lei e diretivas, que regulam as operações de tratamento e deposição das lamas.

**Tabela 1.1 – Síntese das fases, processos e objetivos do tratamento das lamas (Adaptado de Tavares, 2007).**

<b>Fase</b>	<b>Processos de tratamento</b>	<b>Objetivo</b>
Espessamento	Espessamento gravítico Espessamento por flotação Espessamento por centrifugação Espessamento por banda gravítica Espessamento por tambores rotativos	Redução do conteúdo de água das lamas
Estabilização	Estabilização por processos biológicos Estabilização por processos químicos Estabilização por processos físicos	Redução de odores Redução do conteúdo de organismos patogénicos nas lamas
Desidratação	Filtros de vácuo Filtros prensa Filtros banda Centrifugação Leitos de secagem Lagoas de estabilização	Redução do conteúdo de água das lamas
Condicionamento	Térmico Químico	Modificação da estrutura das lamas Melhoramento das características das lamas para futuro tratamento
Secagem térmica	Direta Indireta	Elevada redução do conteúdo de água das lamas

O fator económico é um dos aspetos a ter em consideração nas soluções propostas, uma vez que quanto maior o volume de lamas, mais elevado se torna o custo de tratamento. Outro elemento a ter em conta nas operações de tratamento das lamas são as necessidades energéticas para a redução da humidade e os impactes ambientais associados aos maus odores. É por isso necessário compreender o desempenho das ETAR, assim como dos sistemas de secagem de lamas, de modo a que se possa determinar qual a melhor solução para baixar os seus impactes ambientais e os custos de operação. A escolha do sistema de secagem de lamas deve ter em conta as características iniciais das lamas, deixando em aberto soluções alternativas que permitam abrir caminho à valorização das lamas.

## **1.2. Quadro legislativo de gestão de lamas**

### **Diretiva 91/271/CEE**

A presente diretiva defende que a poluição devida ao tratamento insuficiente das águas residuais de um Estado-Membro da União Europeia pode afetar frequentemente as águas de outro Estado-Membro. Para evitar que o meio ambiente seja afetado pela eliminação de águas residuais tratadas de forma insuficiente, impõe-se a necessidade de realizar um tratamento mais rigoroso nas zonas mais sensíveis.

Considera-se que a eliminação das águas residuais e lamas das ETAR, devem estar sujeitos a regras gerais ou regulamentações específicas. Deste modo é necessário manter um controlo contínuo das ETAR, para garantir a proteção do meio ambiente contra os efeitos nocivos provocados pela descarga de águas residuais, bem como garantir informação ao público em geral sobre a evacuação de águas residuais urbanas e de lamas.

### **Decreto-lei nº 276/2009, de 2 de outubro**

O presente Decreto-lei estabelece o regime de utilização de lamas de depuração em solos agrícolas, transpondo para a ordem jurídica interna a Diretiva 86/278/CEE, de forma a evitar efeitos nocivos para o homem, água, solos, vegetação e animais, promovendo a sua correta utilização.

Considerando que é necessário controlar a qualidade das lamas e dos solos em que são utilizadas, as principais disposições do Decreto-lei n.º 276/2009 são as seguintes:

- Conceitos: “lamas” (lamas de depuração provenientes de Estações de Tratamento de Águas Residuais, fossas sépticas e outras lamas); “lamas tratadas” (tratamento biológico, químico ou térmico, e armazenagem a longo prazo, ou outro método adequado, para reduzir de forma significativa, o seu poder de fermentação e os inconvenientes sanitários da sua utilização); “utilização” (disseminação das lamas sobre o solo ou qualquer outra aplicação das lamas sobre e no solo);
- As concentrações de metais pesados nas lamas e as quantidades máximas anuais destes metais pesados que podem ser introduzidas nos solos de utilização agrícola;
- Proibição da utilização de lamas, quando a concentração de um ou vários metais pesados nos solos ultrapasse os valores limite;
- Obrigatoriedade do tratamento das lamas antes da sua utilização na agricultura;
- A utilização das lamas deve ter em conta as necessidades nutricionais das plantas sem comprometer a qualidade do solo e das águas superficiais;
- A obrigatoriedade de os Estados Membros manterem registos atualizados, onde são anotadas as qualidades das lamas, a sua composição e características, o tipo de tratamento efetuado, e os nomes e endereços dos destinatários das lamas e locais de utilização;

- A apresentação de relatórios síntese por parte dos Estados Membros sobre a utilização das lamas na agricultura, precisando as quantidades de lamas utilizadas, os critérios seguidos e as dificuldades encontradas;
- Os produtores de lamas devem dispor de uma capacidade mínima de armazenagem de lamas equivalente à produção média de três meses; no caso de várias estações de tratamento de águas residuais que pertencem à mesma unidade, o seu armazenamento pode ser feito numa única estação dessa entidade, em que a capacidade de armazenagem deve ser calculada com base na produção média de três meses de todas as estações produtoras; a capacidade das instalações de armazenagem e/ou de tratamento de lamas deve ser calculada tendo em conta os períodos de não aplicação de lamas; os locais de armazenamento devem ser impermeabilizados e cobertos de forma a evitar infiltrações ou derrames que possam originar a contaminação dos solos e das massas de águas superficiais e subterrâneas (artigo 5º);
- A atividade de valorização agrícola de lamas só pode ser exercida por produtores de lamas ou por operadores que comprovem dispor de um técnico responsável acreditado (artigo 6º);
- Apenas é permitido a utilização, em solos agrícolas, de lamas que cumpram os valores limite constantes dos parâmetros fixados na tabela 1.2 do presente Decreto-lei. Na sua aplicação deve-se ter em conta a concentração de metais pesados nos solos recetores, que quantidade de metais pesados anualmente pode ser introduzida por aplicação de lamas nos solos cultivados não deve ultrapassar os valores limite previstos, e as quantidades totais dos nutrientes azoto (N), fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e potássio (K<sub>2</sub>O) devem ser determinadas em função da análise ao solo, à água e/ou foliar, e tendo em conta a produção esperada para a cultura que se pretende fertilizar (artigo 9º);

**Tabela 1.2 – Valores limite de concentração de metais pesados nas lamas destinadas à aplicação no solo agrícola.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores limite (mg/kg de matéria seca)</b>
Cádmio	20
Cobre	1000
Níquel	300
Chumbo	750
Zinco	2500
Mercúrio	16
Crómio	1000

- Obrigatoriedade da realização de análises às lamas e aos solos (artigo 10º);
- Aquando da mistura de lamas de diferentes origens, é obrigatória a análise às mesmas por origem, bem como de diferentes origens (artigo 11º);
- Proibição: da injeção de lamas no solo sem valorização agrícola; enterrar lamas no solo, sem prejuízo do disposto no regime jurídico da deposição de resíduos em aterro; quando a concentração de um ou vários metais pesados no solo ultrapasse os valores limite; em prados ou culturas forrageiras, dentro das três semanas imediatamente



anteriores à apascentação do gado ou à colheita de culturas forrageiras; em culturas hortícolas e hortofrutícolas durante o período vegetativo; em solos destinados ao modo de produção biológica; aplicar lamas no solo no período de novembro a janeiro, exceto quando a aplicação precede a instalação imediata de uma cultura ou seja realizada sobre uma cultura já instalada e seja agronomicamente justificável (artigo 12º);

- A aplicação de lamas no solo deve ser realizada de dois modos. Se as lamas tiverem teor em matéria seca (MS) inferior a 20% devem ser imediatamente injetadas no solo, espalhadas no terreno e incorporadas no solo no prazo máximo de vinte e quatro horas. Caso as lamas tenham MS superior ou igual a 20% devem ser imediatamente espalhadas no terreno e incorporadas no solo no prazo máximo de quarenta e oito horas (artigo 13º).

## **Lista Europeia de Resíduos**

Nesta lista são definidos códigos de acordo com os resíduos produzidos nas mais diversas atividades económicas.

Os resíduos de estações de tratamento de lamas provenientes de águas residuais são enquadrados pelo código 19.

19 – Resíduos de instalações de gestão de resíduos, de estações ex situ de tratamento de águas residuais e da preparação de água para consumo humano e água para consumo industrial:

- 19 02 05 - Lamas de tratamento físico-químico contendo substâncias perigosas;
- 19 02 06 - Lamas de tratamento físico-químico não abrangidas em 19 02 05;
- 19 06 04 - Lamas e lodos digestores de tratamento anaeróbio de resíduos urbanos e equiparados;
- 19 06 06 - Lamas e lodos digestores de tratamento anaeróbio de resíduos animais e vegetais;
- 19 08 05 - Lamas do tratamento de águas residuais urbanas;
- 19 08 11 - Lamas do tratamento biológico de águas residuais industriais contendo substâncias perigosas;
- 19 08 12 - Lamas do tratamento biológico de águas residuais industriais não abrangidas em 19 08 11;
- 19 08 13 - Lamas de outros tratamentos de águas residuais industriais contendo substâncias perigosas;
- 19 08 14 - Lamas de outros tratamentos de águas residuais industriais não abrangidos em 19 08 13;
- 19 08 99 - Outros resíduos não anteriormente especificados;
- 20 03 04 - Lamas de fossas sépticas.

## **Portaria n.º 335/97, de 16 de maio**

Visando tornar mais eficaz a fiscalização e o controlo da transferência de resíduos dentro do território nacional, para proteger e melhorar a qualidade do meio ambiente e da saúde pública, a portaria n.º 335/97 estabelece, entre outros pontos:

- Sempre que se pretende proceder ao transporte de resíduos, o produtor e o detentor devem garantir que os mesmos sejam transportados de acordo com as prescrições do presente diploma, bem como assegurar que o seu destinatário está autorizado a recebê-los (artigo 1º);
- O transporte de resíduos deve ser efetuado em condições ambientalmente adequadas, de modo a evitar a sua dispersão ou derrame (artigo 3º);
- O produtor, o detentor e o transportador de resíduos respondem solidariamente pelos danos causados pelo transporte de resíduos (artigo 4º).

### **1.3. Objetivos**

O objetivo principal desta dissertação consiste na análise de sistemas de secagem de lamas de depuração provenientes de ETAR.

De modo a atingir este objetivo, ir-se-á:

- Analisar a legislação aplicável ao tratamento dos efluentes e gestão de lamas de ETAR;
- Perceber o processo de tratamento dos efluentes provenientes de ETAR, bem como das diversas etapas que levam à formação de lamas de depuração;
- Caracterizar as lamas e os métodos analíticos aplicáveis;
- Analisar as tecnologias de secagem de lamas;
- Analisar modelos teóricos e estudos experimentais de secagem de lamas;
- Comparar as diversas tecnologias de secagem de lamas.

### **1.4. Metodologia de investigação**

Para a elaboração e desenvolvimento desta dissertação, foram utilizados vários métodos de investigação para a análise de sistemas de secagem de lamas.

Um dos métodos utilizados consistiu na procura de teses de dissertação e de doutoramento sobre o tema, no repositório das universidades portuguesas, tendo como critério de procura a “secagem e gestão de lamas de depuração”.

Outro procedimento adotado, consistiu na procura *online* em motores de busca como o Google e Yahoo, de sistemas e tecnologias de secagem de lamas existentes ou em estudo no mercado internacional.

Para além destes processos, foi também utilizada a plataforma *ScienceDirect* onde usei várias palavras-chave, por exemplo “*drying sludge sewage*”. Essa busca incidu apenas em artigos publicados a partir de 2008. Foram analisados centenas de artigos, tendo o estudo para esta dissertação incidido apenas sobre os temas que respondiam ao critério de secagem de lamas de uma forma mais fundamentada e com mais informação para os objetivos atrás definidos.

Paralelamente a estes métodos de busca e investigação, foi ainda consultado o livro “*Wastewater Engineering Treatment and Reuse (2004)*”. de Metcalf e Eddy.

## 2. GESTÃO DE ÁGUAS RESIDUAIS EM PORTUGAL: RESUMO ESTATÍSTICO

Como já foi referido anteriormente, o crescente aumento da produção de lamas cria um problema ambiental de elevada escala. Uma solução para responder a este problema tem sido a capacidade de inovar na qualidade das ETAR. Dados estatísticos obtidos da PORDATA, mostram que ao longo dos últimos anos se tem registado um aumento considerável do número de ETAR em Portugal. Com este aumento do número de ETAR, observa-se também uma maior percentagem da população servida por este tipo de instalações, bem como uma maior percentagem dos efluentes tratados, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida das populações e dos ecossistemas. Na tabela 2.1 e nas figuras 2.1, 2.2 e 2.3 são apresentados os dados relativos à percentagem de população servida por tipo de instalação de tratamento de águas residuais, bem como um mapa de Portugal onde é apresentado a localização das ETAR, a percentagem de tratamento de águas residuais e onde ocorrem descargas para o meio recetor após tratamento.

**Tabela 2.1 – População servida por tipo de instalação de tratamento de águas residuais (ETAR ou FSC)**  
(Fonte: INSAAR, 2011).

Regiões Hidrográficas	População servida (%)	
	ETAR	FSC
Continente	96	4
<i>Minho e Lima (RH 1)</i>	99	1
<i>Cavado, Ave e Leça (RH 2)</i>	98	2
<i>Douro (RH 3)</i>	93	7
<i>Vouga, Mondego, Lis e Ribeiras do Oeste (RH 4)</i>	94	6
<i>Tejo (RH 5)</i>	98	2
<i>Sado e Mira (RH 6)</i>	94	6
<i>Guadiana (RH 7)</i>	95	5
<i>Ribeiras do Algarve (RH 8)</i>	100	0
Açores (RH 9)	63	37
Madeira (RH 10)	100	0
Nacional	97	3

FSC – Fossa séptica coletiva

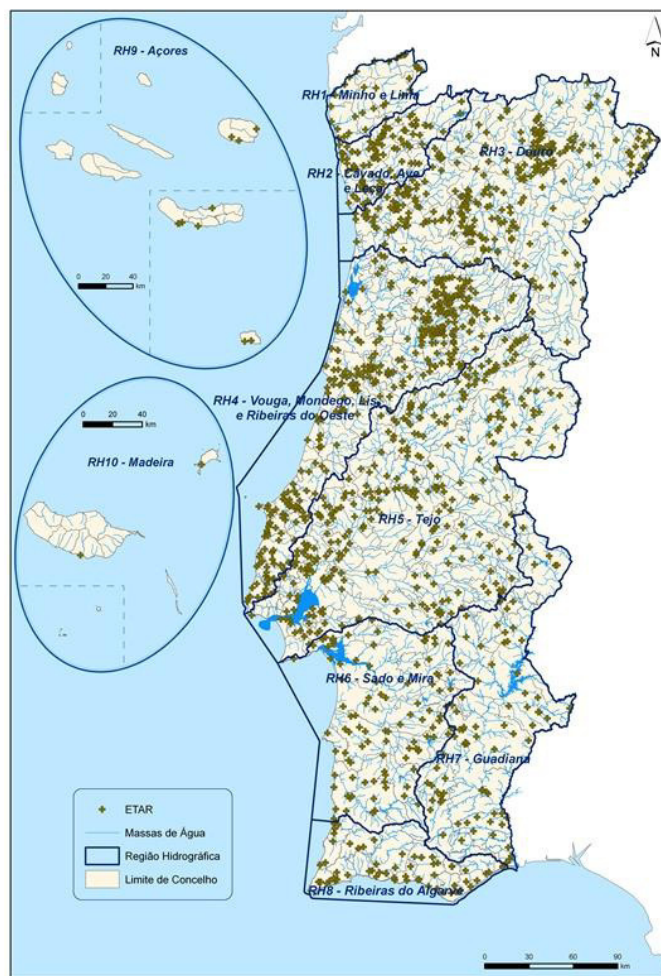


Figura 2.1 – Localização das ETAR em Portugal (Fonte: INSAAR, 2011).

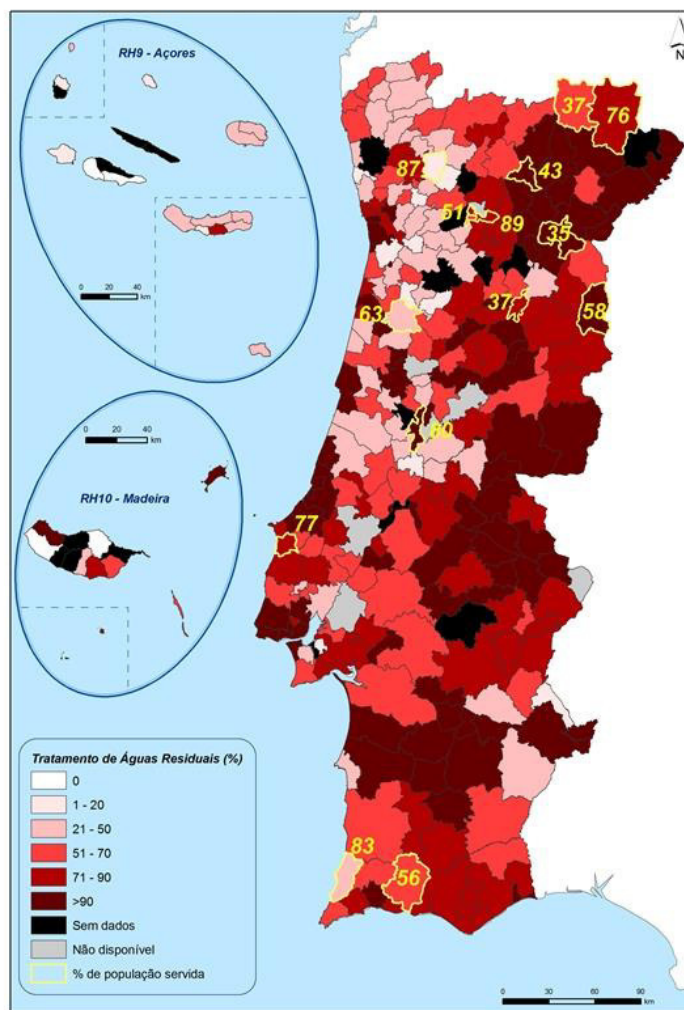


Figura 2.2 – Percentagem de tratamento de águas residuais em Portugal por concelho (Fonte: INSAAR, 2011).

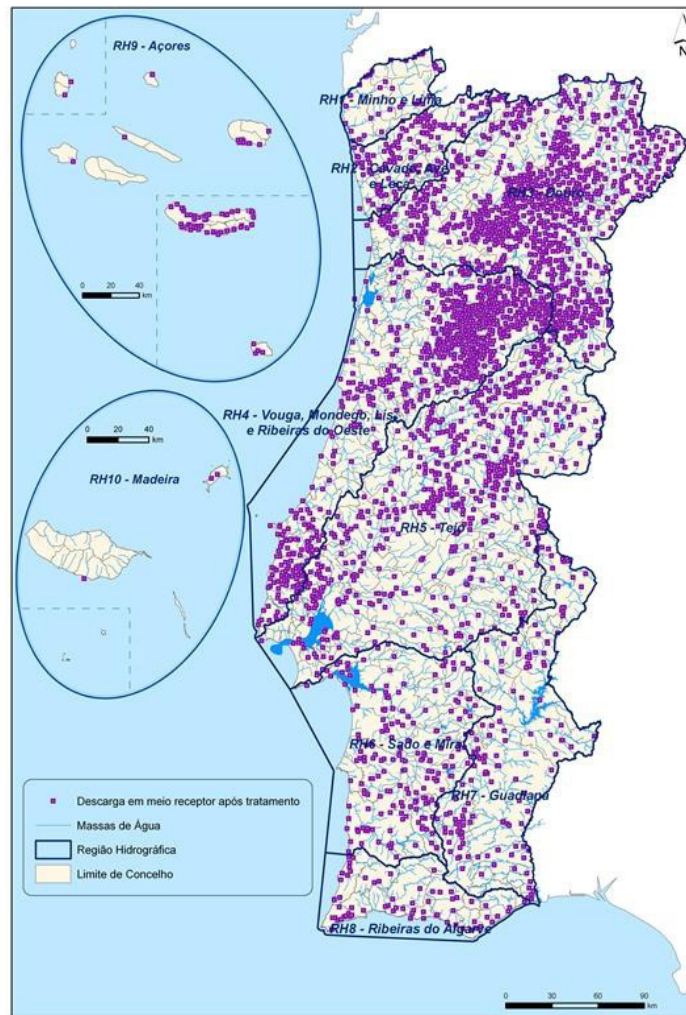


Figura 2.3 – Descarga para o meio receptor após tratamento em Portugal por concelho (Fonte: INSAAR, 2011).

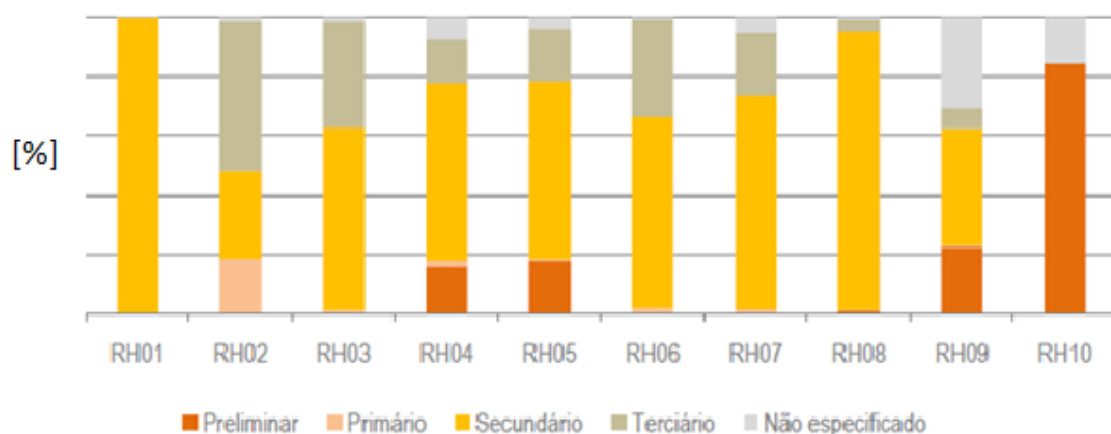
Dados relativos a 2009, obtidos de acordo com Inventário Nacional de Sistemas de Águas e Águas Residuais mostram que o volume de água residuais tratadas a nível nacional é cerca de 562 milhões de  $m^3$ , sendo a captação de águas residuais domésticas de 169 L/hab.dia. Ao longo dos anos, o volume de águas residuais tratadas tem tendência a aumentar nas ETAR, e a diminuir nas tradicionais FSC, tal como é mostrado na tabela 2.2 e na figura 2.4.

**Tabela 2.2 – Volume de águas residuais tratadas por tipo de instalação (ETAR ou FSC) (Fonte: INSAAR, 2011).**

(1) – Percentagem do volume total de águas residuais tratadas em ETAR.

(2) – Percentagem do volume total de águas residuais tratadas em FSC.

Regiões Hidrográficas	ETAR		FSC		Total
	(x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	(%) <sup>(1)</sup>	(x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	(%) <sup>(2)</sup>	(x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
Continente	531670	98	12641	2	544312
Minho e Lima (RH 1)	11579	100	29	0,3	11608
Cavado, Ave e Leça (RH 2)	71909	100	198	0,3	72107
Douro (RH 3)	60747	94	3730	6	64477
Vouga, Mondego, Lis e Ribeiras do Oeste (RH 4)	108642	95	5438	5	114081
Tejo (RH 5)	208805	99	2033	1	210837
Sado e Mira (RH 6)	16559	97	569	3	17127
Guadiana (RH 7)	13058	96	613	4	13671
Ribeiras do Algarve (RH 8)	40371	100	32	0,1	40404
Açores (RH 9)	2996	64	1680	36	4676
Madeira (RH 10)	13627	100	0	0	13627
Nacional	548294	-	14321	-	562615

**Figura 2.4 – Tipos de tratamento de águas residuais por Região Hidrográfica (Fonte: INSAAR, 2011).**

No que diz respeito ao tratamento das águas residuais, verifica-se que o tratamento preliminar é basicamente utilizado na região da Madeira (RH 10), com cerca de 85% do tratamento das águas residuais. Em relação ao tratamento secundário, este é o mais utilizado



nas ETAR de Portugal Continental, tendo nas regiões do Minho e Lima (RH 1) e nas Ribeiras do Algarve (RH 8) as maiores percentagens deste tipo de tratamento, com cerca de 97% e 90%, respetivamente. De destacar ainda, que o tratamento terciário apresenta uma baixa representatividade em relação ao tratamento secundário, mas, no entanto, em Portugal Continental verifica-se um aumento de cerca de 3% de ETAR com tratamento terciário de águas residuais, das quais se destaca a região de Cávado, Ave e Leça (RH 2), com cerca de 50% deste tipo de tratamento.

Dados INSAAR mostram que em 2009 foram produzidas nas ETAR portuguesas, cerca de  $1268 \times 10^3$  toneladas de lamas de depuração (base húmida), provenientes de ETAR urbanas e industriais. Assim, com a exibição destes dados, podemos concluir que em Portugal têm sido realizados vários investimentos com vista a melhorar e otimizar a recolha e o tratamento de águas residuais. Estes investimentos nas ETAR vai permitir o crescimento e o melhoramento de mais fases de tratamento, permitindo uma melhor monitorização das lamas, fazendo com que estas cumpram os requisitos indicados na legislação, para que possam ser valorizadas ou eliminadas.

Os subprodutos provenientes do tratamento de águas residuais devem ser eliminados ou depositados de forma a que seja aceitável do ponto de vista económico e ambiental. As duas opções mais comuns para o destino final das lamas de depuração praticadas em Portugal e na Europa são a deposição em aterro e a sua valorização na agricultura, horticultura e florestas. A incineração apresenta-se como uma solução válida para a eliminação das lamas, mas no entanto é um processo que implica custos, liberta gases nocivos para a atmosfera e existe sempre no final resíduos sólidos sobrantes.

A deposição em aterro, pode ser efuada para lamas desidratadas ou em cinzas, se forem previamente incineradas. A sua deposição em aterro torna necessário a realização de medidas preventivas, tais como deposição das lamas em áreas previamente impermeabilizadas e a proteção das águas subterrâneas contra a contaminação de agentes patogénicos. Assim, para minimizar os problemas ambientais associados à deposição das lamas em aterros, têm sido consideradas opções alternativas para a sua eliminação, como por exemplo, o seu uso como combustível na produção de cerâmica e em painéis para edifícios, e na agricultura como fertilizante e corretor de solos, alternativa esta que se tem mostrado como a opção preferível. Com isto, a escolha do destino final para as lamas de depuração é afetada por uma série de fatores, nos quais se incluem:

- As características físicas das lamas, isto é, se são tratadas, não tratadas, líquidas, em forma de bolo, secas, etc.;
- O grau de contaminação das lamas, especialmente o seu teor em elementos potencialmente tóxicos e outras substâncias tóxicas que passam inalteradas através dos processos de tratamento de águas residuais;
- A disponibilidade de solos agrícolas;
- As infraestruturas e a facilidade de acesso aos destinos finais.

### 3. COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS LAMAS DE ETAR

Neste capítulo vai ser abordada a composição e outros parâmetros para a caracterização das lamas de ETAR urbanas.

A composição e a qualidade das lamas de depuração variam de acordo com a composição das águas residuais que lhe deram origem, da eficiência dos decantadores e das tecnologias de tratamento aplicadas nas mesmas. Apesar de vários compostos orgânicos e minerais de natureza diversa presentes nas lamas terem características fertilizantes, outros não são desejáveis, devido aos riscos para a saúde e ambiente. Estes constituintes indesejáveis geralmente podem ser agrupados em:

- metais pesados;
- contaminantes orgânicos;
- organismos patogénicos.

As águas residuais provenientes de populações saudáveis apresentam substancialmente menos organismos patogénicos do que as das populações menos saudáveis. De um modo similar, as lamas provenientes de águas residuais domésticas contêm menos metais pesados, não apresentando geralmente nenhum perigo para o meio ambiente. Muitos dos químicos contaminantes presentes nas lamas são consequência de descargas de efluentes industriais na rede de esgotos.

A composição das lamas de depuração varia entre as ETAR, devido à variação dos efluentes que cada estação recebe ao longo do ano.

As lamas provenientes das ETAR são maioritariamente constituídas por água, cerca de 70 a 90% (Ohm *et al*, 2009). Em termos de massa seca, a matéria orgânica é o principal constituinte das lamas em cerca de 50 a 70%, variando conforme o grau de estabilização. Assim, de acordo com o teor de humidade e o teor de sólidos presentes nas lamas, estas podem ser classificadas em cinco categorias, descritas na tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Características que as lamas podem apresentar (Adaptado de Myers, 1998).**

Designação das lamas	Teor de humidade (%)	Teor de sólidos (%)
Líquida	90-98	2-10
Fina, lama viscosa	80-90	10-20
Bolo	65-80	20-35
Seca ao ar	30-50	50-70
Secagem térmica	<10	>90

Na composição das lamas, além da presença de substâncias orgânicas e minerais, existem alguns nutrientes, nomeadamente Azoto (N) e Fósforo (P), podendo existir em menor quantidade, Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S). Como foi

referido na introdução, as lamas para o uso agrícola estão sujeitas a valores-limite de acordo com a legislação em vigor para os seguintes metais pesados: Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Zinco (Zn), Mercúrio (Hg) e Crómio (Cr). Assim, a concentração de metais pesados presentes nas lamas é um fator importante que condiciona a sua utilização nos solos agrícolas, tendo em conta a legislação em vigor atualmente. Nas tabelas 3.2 e 3.3 são apresentados alguns valores para a composição das lamas de depuração tratadas e não tratadas, bem como os metais pesados mais comuns que se encontram presentes nas lamas de depuração.

**Tabela 3.2 – Composição química típica para lamas de depuração tratadas e não tratadas (Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004a).**

Item	Lamas Primárias não tratadas		Lamas Primárias Digeridas		Lamas Ativadas não tratadas
	Intervalo	Valor típico	Intervalo	Valor típico	
Matéria Seca Total (MST), %	5-9	6	2-5	4	0,8-1,2
Sólidos Voláteis (% de MST)	60-80	65	30-60	40	59-88
Proteínas (% de MST)	20-30	25	15-20	18	32-41
Azoto (N, % de MST)	1,5-4	2,5	1,6-3	3	2,4-5
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % de MST)	0,8-2,8	1,6	1,5-4	2,5	2,8-11
Potássio (K <sub>2</sub> O, % de MST)	0-1	0,4	0-3	1	0,5-0,7
Ferro	2-4	2,5	3-8	4	-
pH	5-8	6	6,5-7,5	7	6,5-8
Alcalinidade (mg/L)	500-1500	600	2500-3500	3000	580-1100
Energia contida (kJ MST/kg)	23000-29000	25000	9000-14000	12000	19000-23000

**Tabela 3.3 – Metais mais comuns presentes nas lamas de depuração (Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004b).**

Metal	Matéria Seca (mg/kg)	
	Intervalo	Média
Arsénio	1,1-230	10
Cádmio	1-3410	10
Crómio	10-99000	500
Cobalto	11,3-2429	30
Cobre	84-17000	800
Ferro	1000-154000	17000
Chumbo	13-26000	500
Magnésio	32-9870	260
Mercúrio	0,6-56	6
Níquel	2-53000	80
Selénio	1,7-17,2	5
Estanho	2,6-329	14
Zinco	101-49000	1700

De acordo com o Decreto-Lei nº 276/2009 de 2 de outubro, as lamas de depuração só podem ser usadas nos solos agrícolas se forem devidamente tratadas. No entanto a legislação em vigor não especifica a necessidade de higienizar as lamas, limitando a sua aplicação em culturas que apresentem riscos de contaminação para o ser humano. A nível europeu o último documento oficial é a diretiva comunitária 86/278/CEE, que contempla não só os metais pesados, mas também alguns microrganismos patogénicos e micropoluentes orgânicos.

A composição das lamas não é totalmente correspondente com as características dos fertilizantes químicos, apresentando níveis de Potássio e Fósforo mais baixos, mas, no entanto, apresentam níveis bastante aceitáveis em Azoto, conforme se encontra demonstrado na seguinte tabela.

**Tabela 3.4 – Comparação entre os níveis de nutrientes dos fertilizantes comercializados e das lamas de depuração (Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004c).**

Produto	Nutrientes, %		
	Azoto	Fósforo	Potássio
Fertilizantes típicos utilizados na agricultura	5	10	10
Valores típicos para as lamas de depuração	3,3	2,3	0,3

Como já foi anteriormente referido, as lamas podem conter metais pesados, agentes patogénicos e contaminantes orgânicos. Deste modo é importante proceder à análise da composição das lamas de modo a poder aplicar-lhes o melhor encaminhamento possível, seja ele a sua eliminação, aplicação em solos ou a incineração. Existem vários métodos analíticos que permitem avaliar a sua composição, os quais se encontram ilustrados na tabela 3.5.

**Tabela 3.5 – Métodos analíticos para determinação da composição das lamas (Adaptado de Alvarenga, P., et al, 2015)**

Métodos analíticos
Caracterização química
Análise da concentração de metais pesados
Extração de metais
Contaminantes orgânicos
Análise microbiológica
Indicadores de estabilidade e fitotoxicidade



## **4. SECAGEM TÉRMICA DE LAMAS**

Com o crescente rigor da legislação ambiental e o aumento das atividades domésticas e industriais, a produção de lamas de depuração provenientes das ETAR também aumentou continuamente em todo o Mundo, tornando-se necessário lidar com este problema ambiental.

As lamas provenientes de águas residuais são sistemas coloidais muito complexos com um conteúdo variável de biomassa de seres vivos e não vivos, polímeros, partículas inorgânicas e água. Mais especificamente, as lamas brutas formam um líquido preto e com odores, a que corresponde 95-98% de água e que podem conter microrganismos patogénicos. Por esta razão, as lamas são consideradas como resíduos de risco biológico. Até há pouco tempo, pensava-se que as lamas eram um material sem valor que deveria ser descartado, sendo estas incineradas, depositadas em aterros sanitários ou lançadas no oceano. Mas, as enormes quantidades de lamas produzidas a nível global tornam todas estas opções como ambientalmente inaceitáveis. Assim, existe uma necessidade de realizar testes de laboratório de processos de secagem de lamas, que ajudarão a escolher a melhor tecnologia de secagem de lamas, bem como descrever como estas podem ser secas. Neste capítulo vão ser abordados os vários tipos de tecnologias de secagem, metodologias e métodos de lamas existentes e/ou em estudo, de modo a que depois de tratadas as lamas possam ter o melhor encaminhamento possível, em benefício do meio ambiente e da saúde das populações e ecossistemas.

### **4.1. Tecnologias de secagem de lamas**

As tecnologias de secagem de lamas mais usadas nos dias de hoje, consistem em métodos de transferência de calor por convecção, radiação e condução. Contudo, estes processos são demorados devido à velocidade de secagem se tornar lenta, devido à superfície exterior das lamas secar, sendo necessário mais tempo para diminuir o teor de água para cerca de 40%. Assim, a secagem tem sido utilizada para estabilizar as lamas, reduzir o seu volume e massa, destruir agentes patogénicos e reduzir os custos de transporte e de armazenamento.

#### **4.1.1. Secador de lamas horizontal de película fina**

A tecnologia de secagem Buss-SMS-Canzler, e em particular o secador horizontal de película fina, tem sido usado com sucesso na secagem de lamas.

Os secadores horizontais de película fina são operados continuamente como secadores de contacto, usando uma ampla gama de aplicação em vácuo, pressão atmosférica

e alta pressão. O secador consiste num casco cilíndrico aquecido externamente com tampas nas extremidades, existindo no interior um agitador com lâminas desmontáveis. O agitador é suportado em ambas as extremidades por rolamentos externos, sendo o sistema facilmente montável. As lamas húmidas que entram no secador são transportadas de forma constante pelos elementos do agitador ao longo da película fina aquecida pela parede quente do secador, permitindo uma transferência de calor ótima e um rendimento elevado de evaporação. Os vapores do aquecimento externo cedem calor na sua passagem no secador e são descarregados através de um bocal adjacente ao bocal de alimentação das lamas. Na figura 4.1 é apresentado um esquema deste sistema de secagem de lamas.

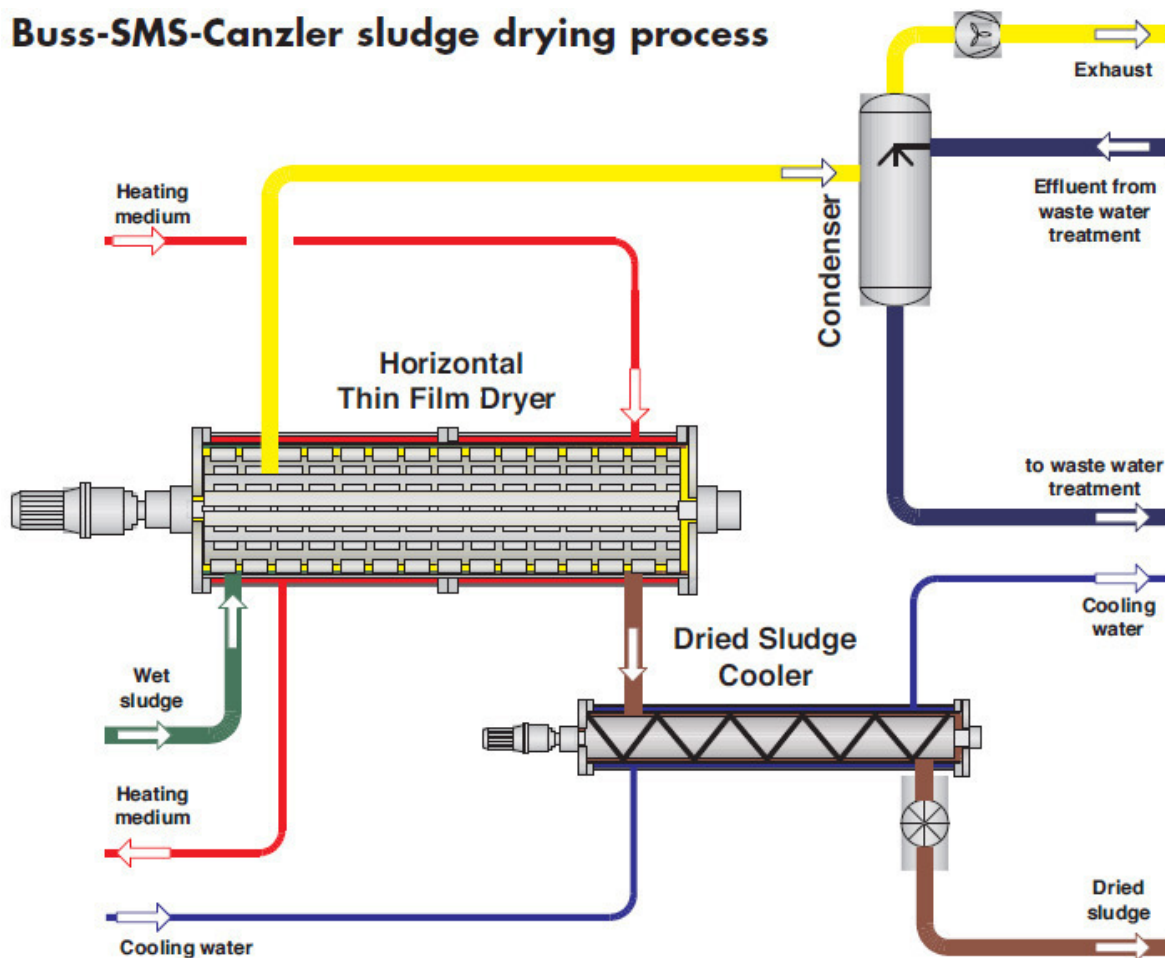


Figura 4.1 – Esquema representativo do sistema de secagem com secador horizontal de película fina (Fonte: Buss-SMS-Canzler, 2017).

O secador horizontal de película fina oferece uma solução ideal para a secagem de lamas urbanas e industriais, para níveis médios ou altos de sólidos secos. A tecnologia Buss-SMS-Canzler de secadores horizontais de película fina permite obter um produto totalmente seco em várias formas, apropriadas para o objetivo final num único estágio ou em combinação com um secador de disco segmentado ou “Rovactor”. O secador de disco segmentado é uma solução perfeita para secar os grânulos provenientes do secador horizontal de película fina até 90% de sólidos secos. Consiste num transportador aquecido

em forma de U com um movimento lento e um eixo aquecido com pás de transporte especialmente concebidas. A lenta rotação do rotor em combinação com uma altura de enchimento relativamente baixo, garante um movimento suave e o transporte dos grânulos. Para a tecnologia Buss-SMS-Canzler são apresentadas as seguintes vantagens:

- Processamento contínuo, totalmente fechado;
- Secagem por contacto sem usar o varrimento do ar/gás;
- Não existe nenhum pré-condicionamento especial das lamas húmidas;
- Baixo consumo de energia;
- Recuperação de calor integrado (opcional);
- Auto-limpeza da superfície aquecida;
- Baixos custos de manutenção;
- Supervisão mínima;
- Aplicável a todos os tipos de lamas;
- Adequado para qualquer conteúdo sólido inicial;
- Estágio único ou operação de dois estágios de aquecimento.

#### 4.1.2. Secador de lamas por atomização

Os secadores por atomização, conhecidos por “*spray dryers*”, são um método de produção de pó seco a partir de um líquido ou suspensão por secagem rápida com um gás quente. Este tipo de secagem tem como princípio básico a maximização da área de troca de calor e massa durante a secagem, sendo a operação de atomização um dos fatores principais para a eficiência do processo de secagem. O equipamento de secagem de lamas por atomização usa um atomizador ou bico de pulverização, dispersando as lamas numa atomização (“*spray*”) com tamanho reduzido. No interior do equipamento, misturam-se um gás aquecido e as lamas numa secagem por contacto direto. Na figura 4.2 é apresentado um diagrama esquemático da configuração deste tipo de secagem de lamas por atomização.

Neste tipo de secador o teor de sólidos à entrada deve ser baixo para permitir uma boa pulverização e o não entupimento do injetor.

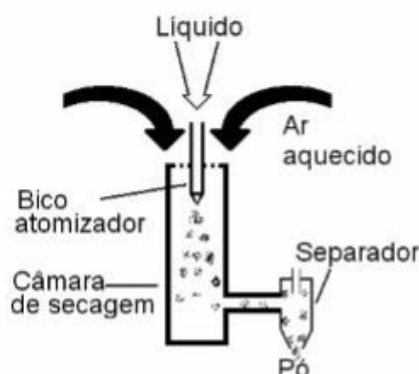


Figura 4.2 – Diagrama esquemático de um secador por atomização (Fonte: Rosa, E.D et al, 2017).



#### 4.1.3. Secador de lamas contínuo de baixas temperaturas (sistema Watromat)

O sistema de secagem de lamas Watromat foi projetado para secar lamas provenientes de filtros-prensa, filtros banda, centrífugas ou outros dispositivos semelhantes. O bolo prensado é seco através da injeção de ar seco quente e reciclado. O ar saturado que sai do topo do secador de lamas é conduzido através de um compressor de refrigeração, que remove a humidade, e volta a ser aquecido antes de ser injetado novamente no secador. Com este ciclo de secagem fechado são eliminadas as emissões e as cargas poluentes para o ar. Este sistema de secagem de lamas permite uma temperatura máxima de operação do processo de 30 °C, em que as lamas são secas até um grau máximo de humidade de 10%, e requer apenas uma potência elétrica de 330 W/L de água evaporada. Na figura 4.3 é apresentado um esquema do sistema de secagem de lamas Watromat.

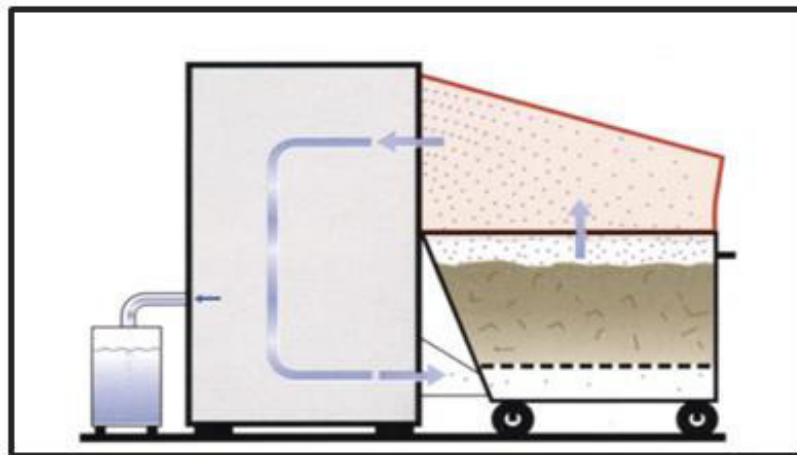
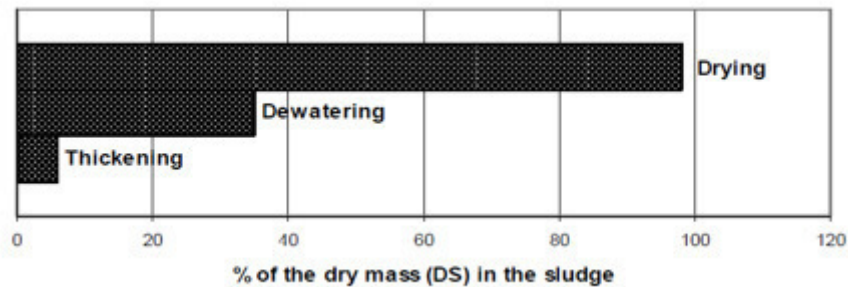


Figura 4.3 - Esquema do sistema de secagem de lamas Watromat (Fonte: Watropur, 2017).

#### 4.1.4. Secador de lamas com recuperação de energia

O processo de secagem térmica, comparado com outros processos, requer um maior fornecimento de energia, refletindo-se em melhores resultados de secagem das lamas, tal como mostra a figura 4.4, o que representa um aumento significativo no número de possibilidades do seu uso em benefício do meio ambiente.



**Figura 4.4 - Concentração de massa seca (DS) presente nas lamas após os processos de espessamento, desidratação e secagem (Fonte: Flaga e Schnotale, 2006).**

Este sistema de secagem térmica de lamas consiste na utilização de uma bomba de calor que recupera o calor a baixas temperaturas, para produzir um calor de elevada temperatura. Baseia-se geralmente em quatro elementos principais: evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão. O fluido de trabalho passa do estado líquido para o estado gasoso, à medida que o calor é absorvido da fonte de calor. No circuito de refrigeração, vai para o compressor, passando depois para o condensador, onde o fluido de trabalho condensa, à medida que o calor é libertado, passando depois pela válvula de expansão. O calor libertado no condensador corresponde ao trabalho da bomba de calor e pode ser utilizado para diversos fins. A bomba de calor necessita de energia para fazer trabalhar o compressor.

Para sistemas de secagem de lamas, a bomba de calor é energeticamente eficiente e evita as emissões de maus odores provenientes da instalação de secagem. Se for aplicado CO<sub>2</sub> como fluido de trabalho na bomba de calor, a instalação cria também a possibilidade de higienização do produto seco, que é especialmente importante se as lamas forem usadas na agricultura. Para além disso, o CO<sub>2</sub> é um fluido natural, o que diminui a influência da instalação para o aquecimento global.

A poupança de energia na instalação de uma bomba de calor em secadores de lamas resulta da recuperação eficiente de energia no ciclo da bomba de calor e da realização do processo de secagem num sistema fechado com humidade e temperatura controladas. Neste sistema, as lamas são secas por um circuito fechado de circulação de ar tratado na bomba de calor. A capacidade de refrigeração da bomba de calor é usada para desumidificar o ar humedecido, enquanto que a capacidade de aquecimento é usada para aquecer o ar seco resfriado, que retorna para a câmara de secagem (figura 4.5). Para além disso, uma parte do calor, a temperatura mais elevada (cerca de 55 °C) é usado na câmara de higienização, que é especialmente importante no contexto da utilização das lamas secas no meio ambiente. O ar de secagem circula num circuito fechado, o que torna a realização do processo independente das condições atmosféricas, permitindo a recuperação e hermetização do processo.

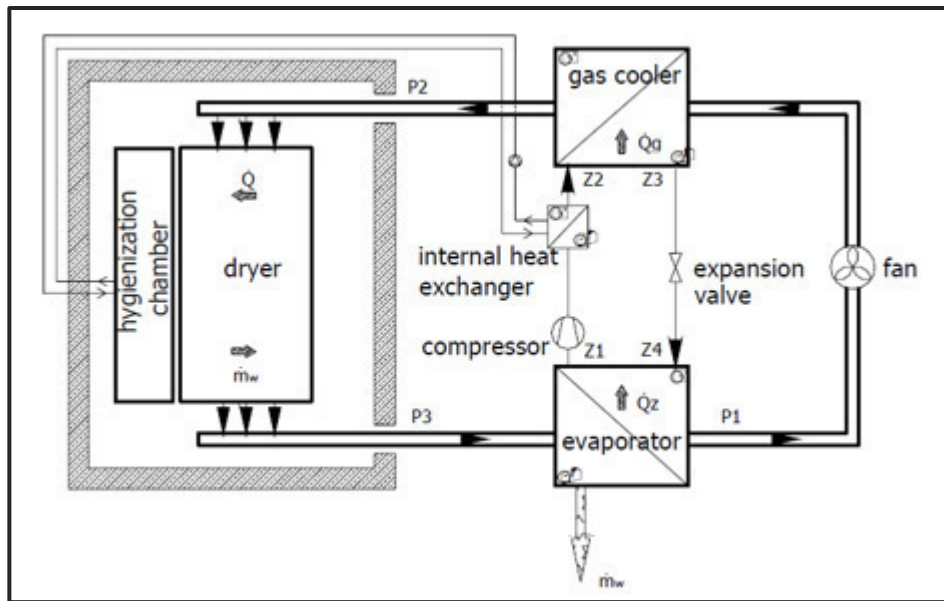


Figura 4.5 - Esquema representativo da conceção da bomba de calor num sistema de secagem de lamas. (Fonte: Flaga e Schnotale, 2006)

Aplicando o  $\text{CO}_2$  como gás refrigerante numa bomba de calor, o sistema de secagem das lamas não só permite a higienização das lamas secas, como também é cada vez mais importante tendo em conta as alternativas a hidrofluorcarbonetos (HFC). De acordo com os regulamentos da Diretiva 70/156/CEE, relativa à utilização de fluidos refrigerantes com potencial efeito global (GWP) superior a 150, estes não devem ser utilizados, o que força os engenheiros a olhar para um novo tipo de refrigerantes. Assim, o  $\text{CO}_2$  (com  $\text{GWP}=1$ ), naturalmente presente no meio ambiente, é visto como uma alternativa promissora para contrapor a refrigerantes com alto GWP, geralmente vindo do grupo dos HFC.

#### 4.1.5. Secador rotativo (sistema Manfredini & Schianchi)

Os secadores rotativos funcionam através de um tambor rotativo contendo um eixo horizontal, onde no seu interior existem vários tipos de pás, podendo estas ser de rebatimento, avanço e de alto rendimento, favorecendo assim a troca térmica entre os gases quentes e as lamas que são submetidas à secagem. Nas figuras 4.6 e 4.7, encontram-se imagens representativas deste tipo de secador rotativo através da tecnologia Manfredini & Schianchi. Este tipo de secador funciona em contra-corrente, em que o fluxo dos gases quentes é contrário ao sentido do material a ser seco, aumentando assim o rendimento térmico do processo de secagem das lamas.



**Figura 4.6 – Imagem representativa do secador rotativo através da tecnologia Manfredini & Schianchi (Fonte: Manfredini & Schianchi, 2017).**



**Figura 4.7 - Imagem representativa do interior do secador rotativo através da tecnologia Manfredini & Schianchi (Fonte: Manfredini & Schianchi, 2017).**

As lamas, juntamente com os gases quentes entram no interior do secador, vão ser rebatidas continuamente, favorecendo o processo de secagem. As pás presentes no interior, encarregam-se de transportar as lamas até ao bocal de descarga, enquanto que o material mais leve, como por exemplo poeiras, são transportados através do fluxo de gases. Assim, as lamas a serem secas e os gases quentes, entram no tambor rotativo e permanecem no seu interior durante o tempo necessário para o aquecimento das lamas e a evaporação da água presente nas lamas. À saída do tambor encontra-se instalada a cabeça de descarga, na qual se encontra montado o queimador, por onde entra eventualmente mais gases quentes. As lamas secas caem numa tremonha de coleta e são transportadas para silos, onde são armazenadas.

Neste tipo de secador, podem ser várias as fontes de calor, destacando-se os queimadores a gás e/ou combustíveis líquidos e queimadores para biomassa (por exemplo, madeira de recuperação de processos industriais), sendo que as condições operacionais

ideais de um secador do tipo rotativo compreendem a sua utilização mediante um ciclo combinado com a cogeração energética, o que permite reduzir drasticamente os custos energéticos, com o envio de gases de descarga, que normalmente são expelidos a uma temperatura de 450 °C, para a câmara de mistura instalada antes do secador, obtendo-se assim uma economia significativa dos custos energéticos.

O rendimento da conversão térmica do combustível é diretamente proporcional à diferença das temperaturas e, conseqüentemente, o secador é alimentado com gás à máxima temperatura possível, comparativamente com as características químicas e físicas das lamas a serem submetidas ao processo de secagem.

#### 4.1.6. Secagem de lamas solar (sistema Héliantis)

O processo de secagem solar térmica Héliantis tem como princípio de funcionamento a utilização dos raios solares para aquecer e evaporar a água presente nas lamas de depuração, sendo a água posteriormente evacuada por ventilação. Este processo de secagem transforma lamas desidratadas provenientes de ETAR num produto seco e granulado. A secagem é efetuada em estufa, tal como é ilustrado na figura 4.8, através dos raios solares e por meio de uma máquina de revolvimento e de escarificação de lamas (rolo).

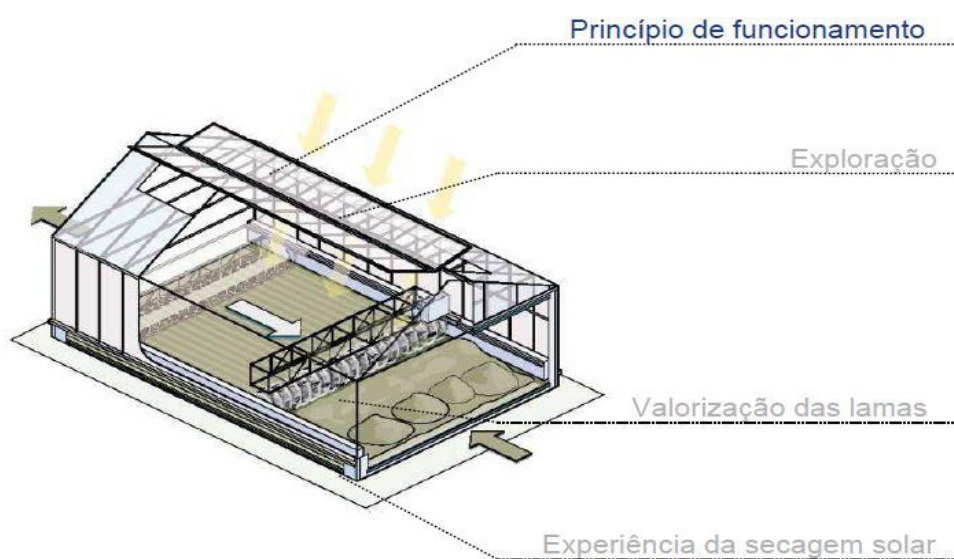
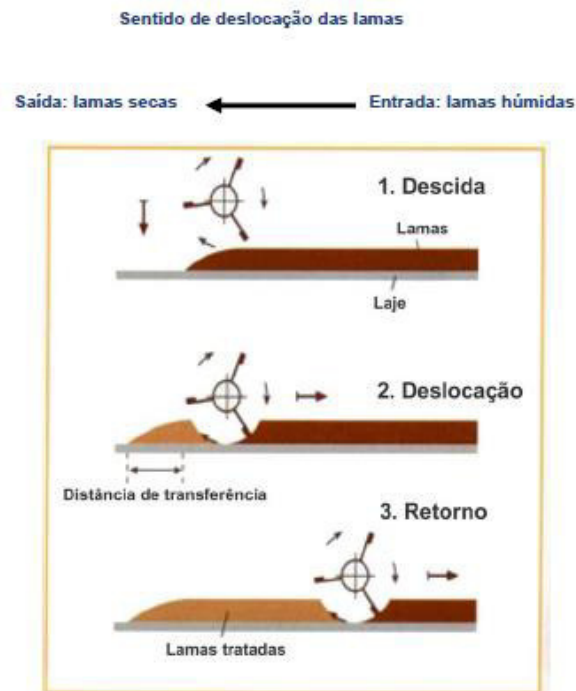


Figura 4.8 – Esquema representativo do princípio de funcionamento do secador solar Héliantis (Fonte: Héliantis, 2017).

O rolo proporciona a desidratação das lamas, através do aumento da superfície de evaporação pelo revolvimento das lamas para a renovação da superfície de evaporação. O arejamento das lamas permite manter as condições aeróbias e o transporte das lamas ao longo da estufa, não necessitando de manipulação de lamas por parte do pessoal no interior da estufa. Este princípio de funcionamento encontra-se ilustrado na figura 4.9.



**Figura 4.9 – Princípio de funcionamento do secador solar Héliantis (Fonte: Héliantis, 2017).**

Esta estufa é concebida para fornecer o efeito de estufa e manter o calor no inverno através de uma parede de duplo filme no topo e paredes laterais com “bolhas”, ocorrendo a ventilação de um modo natural por convecção do ar através de diferenças de temperatura. Existe também a possibilidade de ocorrência de uma ventilação forçada para apoiar a ventilação natural durante os períodos de evaporação intensa e para renovar a camada de ar húmido por cima do leito de lamas.

Esta tecnologia permite uma redução de 3 a 5 vezes do volume das lamas, o que proporciona uma redução proporcional dos custos de transporte, de armazenamento e de deposição das lamas de depuração provenientes das ETAR. Com este princípio de funcionamento, assistimos a uma redução no consumo de energia de até 10 vezes, uma vez que é utilizada a energia solar.

#### **4.1.7. Secadores de lamas por tapete**

O desenvolvimento de processos de secagem de lamas de depuração precisa atender às altas exigências em termos de operação, economia e compatibilidade para com o meio ambiente. O *design* de sistemas de secagem de lamas de depuração por tapete permite satisfazer as solicitações dos operadores de lamas, no sentido em que estes sistemas consistem em dois ou mais tapetes organizados em cima uns dos outros, sendo que o produto que se pretende secar é colocado sobre estes. A eficiente secagem das lamas é conseguida com o fluxo de ar do processo que flui através da camada das lamas. Este tipo de secadores é equipado com um sistema de tratamento de exaustão do ar, que se ajusta à aplicação específica e projetado para criar um sistema seguro de acordo com os padrões exigentes

(instruções técnicas para a prevenção da poluição do ar pelas emissões para a atmosfera). As fontes de calor utilizadas para o processo podem ser obtidas de diferentes fontes de energia, especialmente através do calor de exaustão das centrais elétricas, fábricas ou de águas residuais.

Em Ingolstadt, na Alemanha, foi implementado um secador Huber com tecnologia de secagem de lamas por tapete, com a particularidade de o processo de secagem ocorrer com um nível de temperatura muito baixo, com água morna, portador térmico, a uma temperatura de cerca de 53 °C. Esta água é aquecida numa estação de incineração de resíduos, adjacente, através da troca de calor sob a forma de vapor de água. Como este vapor de água é gratuito para a estação de tratamento de lamas, os seus custos operacionais para a secagem de lamas de depuração são muito baixos. As lamas secas neste processo atingem 90% de matéria seca e são utilizadas na unidade de incineração de resíduos. Devido ao facto de a ETAR se encontrar na proximidade intermédia da instalação de incineração de resíduos, podem ser conseguidas algumas vantagens como por exemplo:

- Poupança de 294000 km de condução por ano;
- Poupança de 88000 L de combustível (diesel) por ano;
- Redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de 225000 kg por ano;
- Não utilização de energia primária;
- Utilização de energias secundárias, sob a forma de calor de exaustão proveniente da unidade de incineração de resíduos.

A grande maioria dos trabalhos de manutenção do secador pode normalmente ser efetuada sem que ocorra a necessidade de interrupção da operação de secagem das lamas, podendo as estações de secagem de lamas, atingir um tempo médio de operação anual de mais de 8000 h. Os dados técnicos da estação de secagem de lamas de Ingolstadt são os seguintes:

- Entrada de lamas: 12000 t/ano;
- Número de linhas de secagem: 2;
- Tempo de operação superior a 8000 h/ano;
- Fluxo de lamas por linha de secagem: aproximadamente 900 kg/h;
- Evaporação máxima de água por linha de secagem: aproximadamente 600 kg/h;
- Temperatura do fluxo de água quente: 53 °C;
- Energia requerida: 7500 MWh/ano da estação de incineração de resíduos.

Uma segunda tecnologia de secagem de lamas de depuração por tapete é a tecnologia de separação Andritz, que granula a lama desidratada num misturador com produto já seco. As lamas húmidas são distribuídas uniformemente sobre o tapete no secador, através de um módulo de alimentação especialmente concebido para o efeito. A camada de lamas uniforme no tapete cria condições ideais para a distribuição uniforme do ar no processo de secagem, que por sua vez é necessário para o aquecimento e a secagem das lamas de depuração. A camada de lamas no tapete forma um filtro para que o ar possa fluir sobre a camada de lamas,

e assim impedir o arrastamento de poeiras. A baixa temperatura dos gases de secagem (<150°C) e o baixo teor de poeiras no sistema facilitam uma operação segura, não sendo as lamas secas expostas ao *stress* mecânico durante a secagem e serem previamente arrefecidas antes de serem retiradas do secador. As vantagens da secagem de lamas através da tecnologia de separação Andritz são as seguintes:

- O secador de tapete é particularmente atrativo economicamente, uma vez que usa calor a uma baixa temperatura;
- Elevada qualidade das lamas secas de diferentes qualidades;
- Estrutura modular e simples;
- Alta disponibilidade;
- Mais de 30 estações de secagem de referência que secam cerca de 800000 t de lamas de depuração por ano;
- A totalidade do valor de aquecimento das lamas de depuração e cinzas são utilizados na produção de cimento;
- Redução considerável dos custos operacionais, substituindo a energia primária.



#### 4.1.8. Comparação entre tecnologias de secagem de lamas

Para efeitos comparativos dos diferentes sistemas de secagem de lamas é apresentada a tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Comparação entre os diferentes sistemas de secagem de lamas.

	<b>Secador Buss-SMS-Canzler</b>	<b>Secador de lamas por atomização</b>	<b>Secador Watromat</b>	<b>Secagem térmica de lamas e higienização</b>	<b>Secador Manfredini &amp; Schianchi</b>	<b>Secador solar Héliantis</b>	<b>Secador Huber</b>	<b>Secador Andritz</b>
<b>Forma do processo</b>	Contínuo (rotativo)	Contínuo (atomização)	Descontínuo (tapete)	Contínuo	Contínuo (rotativo)	Contínuo	Contínuo (tapete)	Contínuo (tapete)
<b>Consumo de energia</b>	Baixo	n.d.	330 W/L de água evaporada	n.d.	Baixo	Baixo (20 – 80 kWh/t de água evaporada)	Baixo (7500 MWh/ano)	Baixo
<b>Recuperação de energia dos gases de exaustão</b>	Sim (opcional)	n.d.	n.d.	Sim	Sim	n.a.	Sim	Sim
<b>Autolimpeza</b>	Sim	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.a.	n.d.	n.d.
<b>Custos de manutenção</b>	Baixo	n.d.	Baixos	n.d.	n.d.	Muito baixo	Baixo	Baixo
<b>Supervisão do funcionamento</b>	Mínimo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Mínimo	Mínimo	n.d.
<b>Variabilidade do tipo de lamas à entrada</b>	Elevado	n.d.	Elevado	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>Tempo de secagem</b>	n.d.	Rápido	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>Fluxo de ar e de lamas</b>	Contracorrente	Concorrente	Concorrente	Concorrente	Contracorrente	Concorrente	Contracorrente	Contracorrente
<b>Forma de contacto entre fluxo de fluido quente e lamas</b>	Indireto	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto

	<b>Secador Buss-SMS-Canzler</b>	<b>Secador de lamas por atomização</b>	<b>Secador Watromat</b>	<b>Secagem térmica de lamas e higienização</b>	<b>Secador Manfredini &amp; Schianchi</b>	<b>Secador solar Héliantis</b>	<b>Secador Huber</b>	<b>Secador Andritz</b>
<b>Temperatura de funcionamento</b>	n.d.	n.d.	30°C	Elevado	Elevado	n.d.	53 °C	< 150 °C
<b>Grau de humidade das lamas secas</b>	30 – 50% para incineração com resíduos ou compostagem, 50 – 65% para incineração, 5 – 15% em condições de secagem completa	n.d.	10%	n.d. (permite a higienização das lamas)	n.d.	17 – 70%	10%	10%
<b>Sistema aberto ou fechado</b>	Fechado	Fechado	Fechado	Fechado	Fechado	Fechado	Fechado	Fechado
<b>Tipo de fonte de energia</b>	Eletricidade	Eletricidade	Bomba de calor-eletricidade	Eletricidade	Eletricidade e outras fontes de calor	Eletricidade e energia solar	Eletricidade e energias secundárias (incineração)	Eletricidade (podendo ser substituída por energias secundárias)
<b>Tratamento do ar de exaustão relativamente aos odores</b>	Sim	n.d.	n.d.	Sim	n.d.	n.a.	Sim	Sim
<b>Caudal de lamas</b>	n.d.	n.d.	400 kg/dia	n.d.	10 – 60 t/h	250 t/h	900 kg/h	800000 t/ano
<b>Emissões de partículas/poeiras</b>	Não	n.d.	Não	Não	n.d.	n.d.	Baixo	Baixo
<b>Arrefecimento das lamas à saída do secador</b>	Sim	n.d.	Não	n.d.	n.d.	n.a.	n.d.	Sim
<b>Estrutura modular</b>	Não	n.d.	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim

## 4.2. Resumo de estudos de secagem térmica de lamas

Neste subcapítulo são descritos de forma resumida, alguns estudos acadêmicos de secagem de lamas de depuração.

### 4.2.1. Estudo experimental da eficiência de secagem de lamas

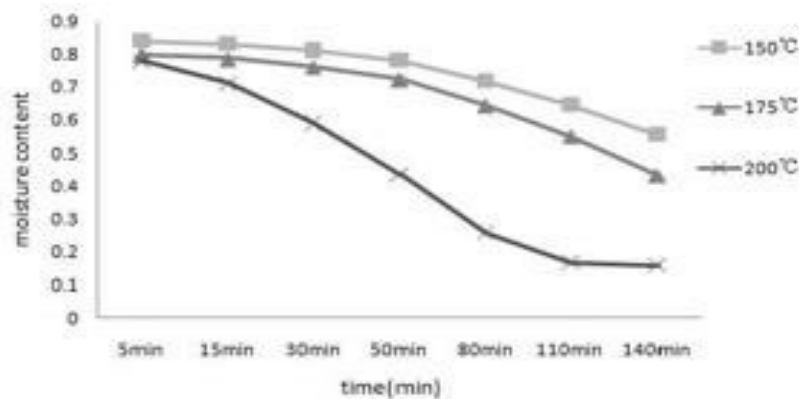
O aquecimento térmico é um bom método para reduzir o teor de água nas lamas de depuração. Embora uma elevada temperatura possa melhorar a eficiência da secagem, o seu elevado custo e a probabilidade de explosão de poeiras são fatores restritivos. Para economizar energia e reduzir o investimento nos equipamentos, foi estudada a cinética de secagem para diferentes condições de temperatura e diferentes formas geométricas da amostra de lama. Para isso foram utilizadas três temperaturas (150; 175 e 200 °C) e três formas geométricas diferentes: bolo (cilindro achatado), cilindro (longitudinal) e esfera.

Para este estudo da eficiência de secagem de lamas de depuração foi recolhida uma amostra de lama fresca de uma ETAR em Pequim, China. O teor de humidade na amostra de lama era de 79 % (base húmida). Na tabela 4.2 encontram-se os parâmetros das lamas nas três formas geométricas anteriormente descritas.

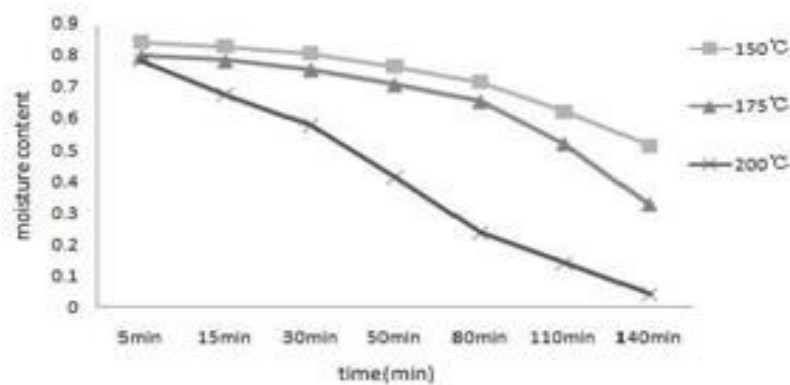
Tabela 4.2 – Parâmetros das lamas nas três formas (Adaptado de Zhu, F. et al, 2012a).

Forma da lama	Massa (g) ±1g	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Superfície específica (m <sup>-1</sup> )
Bolo	66,96	6,00	2,00	1,67
Cilindro	66,84	4,00	4,50	1,39
Esfera	60,45	5,00	-	1,20

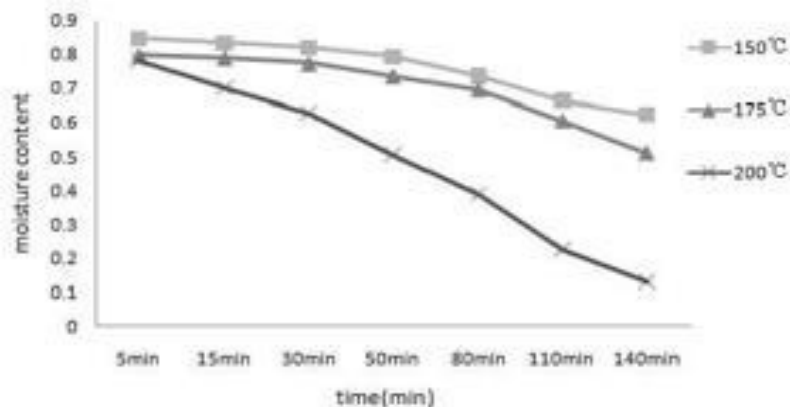
Nesta experiência foi utilizado um forno termoelétrico de comando termostático WGLL-45BE, com uma tensão elétrica de 220 V e uma potência elétrica de 1,2 kW. A temperatura do forno podia variar entre 5 e 300 °C. Para cada tipo de amostra foram realizadas duas experiências em paralelo, com temperaturas de 150, 175 e 200 °C, e a massa da amostra foi registada em diferentes tempos desde 5 minutos até 140 minutos. Na figura 4.10 são representadas as curvas de secagem das três formas geométricas para as três temperaturas atrás referidas.



(a) – Lamas em forma cilíndrica



(b) – Lamas em forma de bolo



(c) – Lamas em forma esférica

Figura 4.10 – (a) Curvas de secagem das lamas em forma de cilindro; (b) Curvas de secagem das lamas em forma de bolo; (c) Curvas de secagem das lamas em forma de esfera (Adaptado de Zhu, F. *et al*, 2012b).

Da figura 4.10, pode-se constatar que a uma temperatura mais elevada se obtém uma melhor eficiência de secagem. As lamas em forma de bolo são as que apresentam maior eficiência de secagem e as lamas em forma de esfera são as que têm a menor eficiência. As três formas de lamas foram realizadas na mesma ETAR, com aproximadamente a mesma massa, para que o volume destas seja o mais aproximado possível, ainda que a superfície

específica seja diferente entre as formas de lamas. Com uma superfície específica maior, a água no interior da amostra de lama tem mais hipóteses de se escapar para a superfície, e a lamas tem maior contacto com o ar quente, tornando a superfície de secagem maior. Para além disso, no processo de secagem, as amostras de lamas encolhem de forma heterogénea formando fissuras. Estas fissuras, quanto mais e maiores se tornam, podem aumentar a superfície específica das amostras de lamas, tornando a velocidade do processo de secagem mais rápido. A criação de fissuras encontra-se relacionada com a superfície específica do material, e as lamas com maior superfície específica são mais prováveis de sofrerem fissuras. Isto ocorre porque a humidade da superfície específica diminuiu muito mais rápido do que a humidade no interior. Nesta experiência, a superfície das lamas em forma de bolo é maior, sendo então compreensível que sejam estas que apresentam a maior eficiência de secagem.

#### **4.2.2. Estudo da cinética de secagem de lamas com adição de CaO e NaClO**

Atualmente as lamas são geralmente secas por convecção de calor, usando radiação solar ou fornos de ar quente como meio de aquecimento para remover a água das lamas. A secagem das lamas é um processo complexo de transferência de calor e massa, que varia ao longo do tempo e com a temperatura. Alguns modelos cinéticos de secagem foram introduzidos e aplicados para permitir uma melhor compreensão da convecção de calor e da transferência de massa das amostras.

Na indústria da secagem de lamas a modelação matemática é usada com o objetivo de descobrir as condições e o processo de funcionamento de secagem mais adequados para que o equipamento possa ser projetado tendo a expectativa de uma elevada eficiência. Os conceitos básicos da modelação matemática devem-se a um conjunto de equações que podem definir exatamente o sistema. A solução destas equações matemáticas deve dar valores de parâmetros constantes, que ajudam na previsão da variável dependente em função das variáveis independentes em todos os pontos do sistema baseados nas condições iniciais. Assim, o uso de modelação matemática é uma ferramenta eficaz para prever o desempenho de um sistema de secagem. A secagem por convecção isotérmica para materiais que contêm elevada humidade são um processo complexo que envolve a transferência de calor e massa entre o sistema (próprio material) e o material envolvente. A modelação matemática de materiais que contêm elevado teor de água é difícil, uma vez que a secagem dos materiais leva a uma alteração significativa no seu volume. Os dados da secagem de tais materiais podem ser classificados em modelos semi-teóricos ou empíricos. Os modelos semi-teóricos de secagem podem ser derivados diretamente da solução geral da segunda lei de Fick, enquanto os modelos empíricos para a secagem de lamas são derivados da relação de proporção de tempo e de humidade. Os modelos semi-teóricos e empíricos são amplamente utilizados para a secagem por convecção de materiais com elevada humidade e que contêm biomassa.

Num passado recente, os processos de desidratação e de secagem de lamas usavam diferentes agentes químicos, uma vez que estes ajudam a reduzir o tempo de secagem e os maus odores das lamas, e podem também destruir ou modificar os componentes químicos das lamas, o que será benéfico no processo de eliminação dos agentes patogénicos. Até hoje (2016) ainda ninguém estudou a modelação cinética de lamas húmidas a secar na presença de óxido de cálcio (CaO) e de hipoclorito de sódio (NaClO), tendo comparado os resultados. Assim, é necessário desenvolver um modelo matemático cinético adequado, que descreva as características de secagem das lamas húmidas na presença e na ausência de agentes químicos (CaO e NaClO) durante a secagem convectiva isotérmica. Neste estudo foram realizadas experiências laboratoriais de secagem com diferentes temperaturas de secagem (70, 80, 90 e 100 °C), podendo a secagem convectiva por energia solar ser aplicada nesta faixa de temperatura. Os dados experimentais foram baseados no modelo mais adequado que foi determinado com base no coeficiente de regressão (R<sup>2</sup>), na soma dos quadrados do erro (SSE), raiz quadrada do erro (RMSE) e valores de quadrado (v<sup>2</sup>), usando programação MATLAB R2012a.

#### 4.2.2.1. Materiais e métodos

As amostras de lamas de depuração húmidas foram recolhidas de uma ETAR na China. Após a recolha das amostras, as experiências de secagem foram realizadas na Universidade de Shanghai Jiao Tong, em Shanghai. As experiências foram realizadas num forno de ar quente (equipamento de temperatura DZF-6050 Shanghai Shen Xianheng), capaz de controlar a velocidade do ar no seu interior. As informações detalhadas do forno são as seguintes: precisão da temperatura de controlo do forno  $\pm 0,1$  °C; variação de temperatura operacional de 10 a 250 °C, a variação desta foi de  $\pm 1$  °C. A recolha da amostra demora cerca de 20 segundos a sair do forno. De acordo com Ceylan, I. et al, e citado por Danish, M. et al, foi medida a variação da temperatura do ar em função do tempo de secagem, não tendo sido observada qualquer alteração na temperatura do ar de secagem. Com base neste estudo, assumiu-se que a variação de temperatura dentro do forno de ar quente era insignificante.

O tamanho das amostras de lamas usadas foi de  $30 \pm 3$  g, mantidas em caixas de Petri, com um diâmetro de 7 cm e uma altura de 2 cm. As lamas de depuração foram tratadas com 0,10 ml de NaClO por cada grama de lama e 100 mg de CaO por cada grama de lama, tendo sido comparadas com lamas sem tratamento para analisar o seu comportamento durante a secagem. A perda de massa das amostras foi constantemente monitorizada usando uma balança eletrónica com um desvio médio de 0,1 mg. Uma amostra de lama idêntica foi usada para identificar o conteúdo de humidade inicial das lamas, que foi determinada em  $88 \pm 2\%$  (base húmida). O teor de humidade inicial, o teor de humidade em qualquer momento (t) e o teor de humidade de equilíbrio das lamas foi determinado utilizando-se as seguintes expressões (1; 2 e 3):

$$M_o = \frac{(initial\ wt. - fully\ dried\ wt.)}{fully\ dried\ wt.} \quad (1)$$

$$M_t = \frac{(wt.\ at\ anytime\ t - fully\ dried\ wt.)}{fully\ dried\ wt.} \quad (2)$$

$$M_e = \frac{(wt.\ at\ equil. - fully\ dried\ wt.)}{fully\ dried\ wt.} \quad (3)$$

A razão de humidade adimensional (MR) das lamas foi determinada usando a relação:

$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_o - M_e)}$ , em que  $M_t$  corresponde ao teor de humidade em qualquer momento (t) (g água/g sólido seco),  $M_o$  corresponde ao teor de humidade inicial (g água/g sólido seco) e  $M_e$  corresponde ao teor de humidade de equilíbrio da amostra (g água/g sólido seco).

O teor de humidade de equilíbrio ( $M_e$ ) é relativamente pequeno em relação ao teor de humidade inicial ( $M_o$ ) ou ao teor de humidade em qualquer momento (t). A razão de humidade adimensional (MR) versus o tempo de curva obtida para a secagem de lamas húmidas foi alcançado de acordo com vários modelos cinéticos existentes, como por exemplo Henderson-Pabis, Newton, Page, e modelos de Nadhari, mas nenhum destes modelos foi definido, por não se obterem dados satisfatórios em toda a gama de temperaturas durante a secagem das lamas. Assim, com base em dados de secagem de lamas, foi proposto um novo modelo usando um método de tentativas e erros com a ferramenta matemática MATLAB R2012b, com o qual foram determinados todos os parâmetros estatísticos.

#### 4.2.2.2. Resultados experimentais

As lamas brutas obtidas da ETAR tinham uma consistência pastosa semi-sólida, contendo 8,5 kg de água por cada kg de lama seca. Durante o processo de secagem, observou-se o seu comportamento com diferentes aditivos de secagem. As lamas não tratadas e as lamas tratadas com NaClO foram secas de forma idêntica. As lamas criaram fissuras na sua superfície durante o processo de secagem com temperaturas que variaram de 70 a 100 °C, durante 50 a 120 minutos. Estas fissuras ao longo do tempo de secagem tornaram-se mais profundas e pedaços de massa de lama separavam-se uns dos outros. Depois desta etapa, observou-se uma redução do volume das lamas.

As características de secagem das lamas encontram-se representadas nas curvas das figuras 4.11, 4.12 e 4.13, nas quais se representa a perda de humidade em função do tempo para lamas não tratadas, lamas tratadas com NaClO e lamas tratadas com CaO. A figura 4.14 compara a secagem a temperaturas constantes sob diferentes tratamentos químicos.

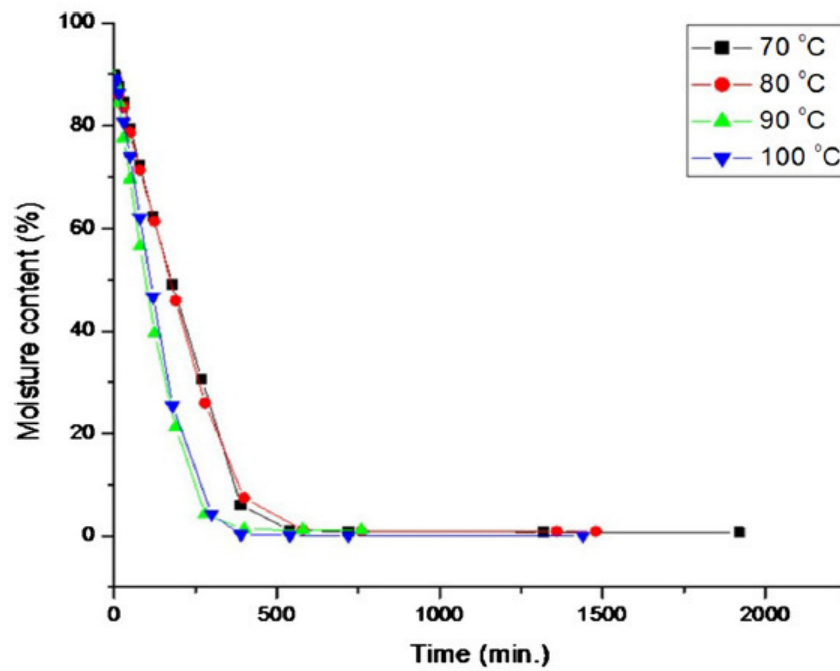


Figura 4.11 – Percentagem de humidade em função do tempo para lamas não tratadas (Adaptado de Danish *et al*, 2016a).

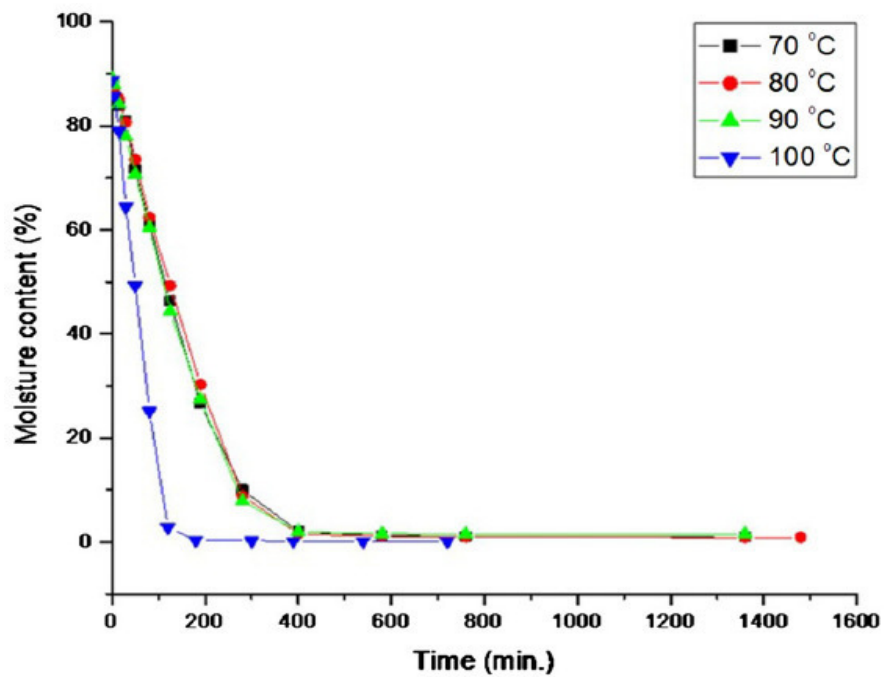


Figura 4.12 – Percentagem de humidade em função do tempo para lamas tratadas com NaClO (Adaptado de Danish *et al*, 2016b).



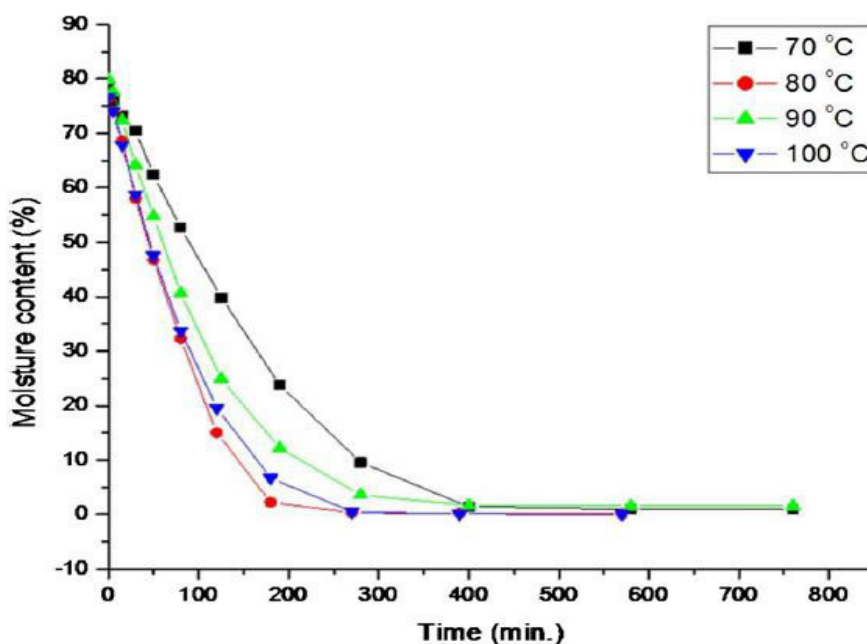


Figura 4.13 – Percentagem de humidade em função do tempo para lamas tratadas com CaO (Adaptado de Danish *et al*, 2016c).

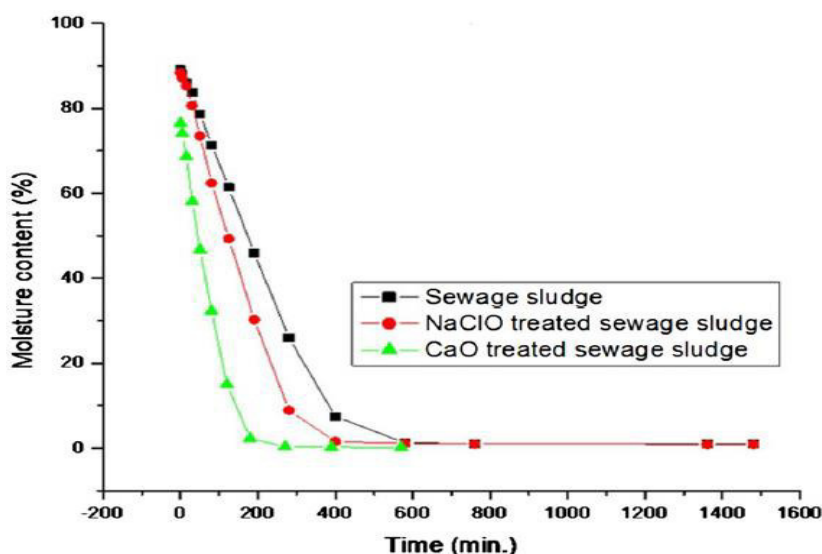


Figura 4.14 – Comparação a temperatura constante de 80 °C com diferentes tratamentos químicos (Adaptado de Danish *et al*, 2016d).

Pela análise das figuras anteriores, observa-se que numa primeira fase ocorre uma evaporação rápida das moléculas de água não ligadas, à superfície das lamas, e numa segunda fase surgem fissuras na superfície e ocorre a evaporação de moléculas de água não ligadas. Numa terceira fase ocorre lentamente a remoção de moléculas de água interligadas, em que se regista um equilíbrio do nível de humidade das amostras de lamas. Assim, observou-se que cerca de 80 a 88% da humidade é removida das amostras de lamas numa primeira fase de secagem, e os restantes 0,5 a 2% de humidade são removidos na última fase da secagem.

Os resultados obtidos mostraram que a secagem de lamas por tratamento com CaO foi o método mais eficaz no processo de secagem e no consumo de energia (19,8 kJ/mol), tendo a redução do volume das lamas sido de  $86,9 \pm 0,2\%$ ,  $92,6 \pm 0,5\%$  e  $93 \pm 0,5\%$ , para lamas tratadas com CaO, lamas tratadas com NaClO e lamas não tratadas, respetivamente.

### 4.2.3. Estudo experimental da secagem de lamas num secador de pás rotativas

Para o estudo experimental e simulação da secagem de lamas de depuração por contacto através de um secador de pás rotativas foi usado uma amostra de lama de depuração contendo 2,6 kg H<sub>2</sub>O por kg de sólido seco, proveniente de uma ETAR da cidade de Hangzhou, situada na China. Estas lamas de depuração foram produzidas a partir da desidratação mecânica de lamas ativadas, que foram obtidas a partir de bacias de arejamento anaeróbio do tratamento de águas residuais. O sistema do secador de pás rotativas é composto principalmente por um eixo duplo de pás, um condensador e uma bomba de vácuo, tal como é exemplificado no esquema da figura 4.15. O secador é constituído por 16 pás em forma de cunha e dois eixos ociosos, sendo que cada pá apresenta um diâmetro de 16 mm e 25 mm para os eixos. O volume efetivo do secador é de 1,1 litro. Em funcionamento, o óleo térmico é aquecido eletricamente, passando através dos eixos, pás e paredes do sistema, onde ocorre a secagem térmica das lamas por transferência de calor. A temperatura das lamas foi medida em duas posições axiais diferentes, a 1 cm abaixo da superfície livre do produto por dois termopares, e o binário no misturador foi medido através de um dinamómetro.

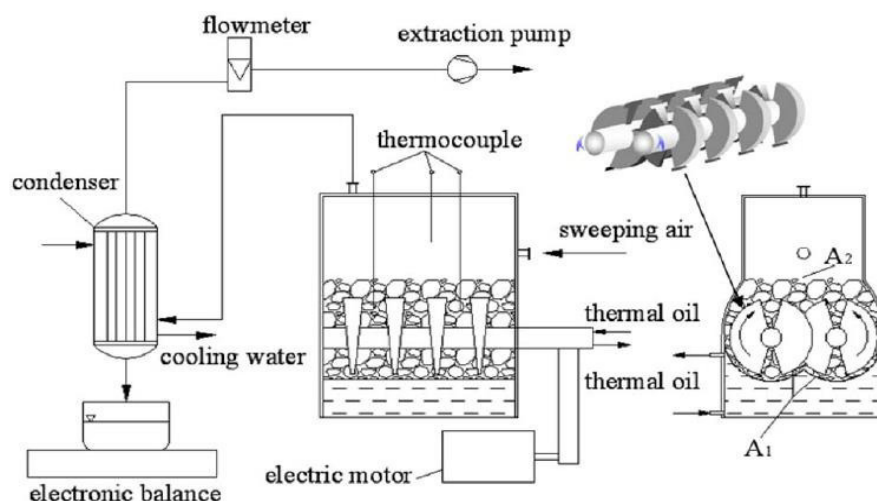


Figura 4.15 – Esquema do sistema de secagem de pás rotativas (Adaptado de Deng *et al*, 2009a).

De acordo com a figura 4.15, existe uma entrada de ar, onde o ar entra a uma temperatura de 20 °C, o que faz com que a secagem de lamas ocorra na presença de ar sob pressão atmosférica. Nesta experiência de secagem, foi colocada uma quantidade fixa de lamas (0,9 kg) no sistema. Durante o processo de secagem, a água evaporada foi extraída

pela bomba de vácuo e foi removida num condensador que a descarregava para fora do sistema sob a forma de água condensada. Assim, a taxa de secagem foi calculada através da medição da massa de condensado continuamente ao longo da experiência.

Com os resultados experimentais obtidos, o processo de secagem das lamas num secador de pás rotativas pode ser realizado através de três fases (fase irregular, fase pastosa e fase granular). Quando as lamas são introduzidas no secador, inicia-se a fase pastosa. Após alguns minutos, com o aumento da temperatura e a agitação das pás do secador, as lamas tornam-se pastosas. A figura 4.16 ilustra a taxa de secagem das lamas.

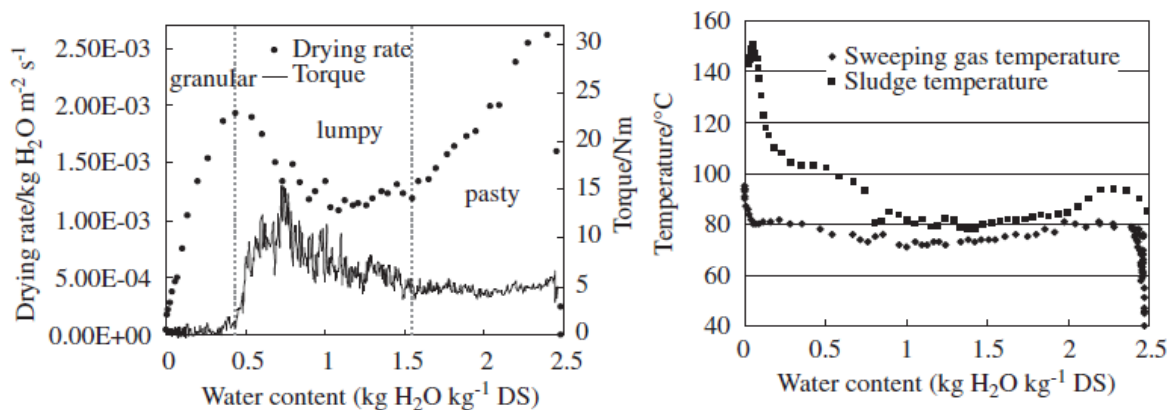


Figura 4.16 – Resultados experimentais, com temperatura do óleo de 80 °C e caudal de ar ( $Q=1,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ) (Adaptado de Deng *et al*, 2009b).

A configuração do sistema de secagem (figura 4.15) em forma de cunha das pás e a rotação oposta contínua dos eixos fazem com que seja possível as lamas vibrarem durante o processo de secagem. Assim, as lamas não permanecem na superfície das pás, e com a diminuição do teor de humidade, bem como do volume, as lamas tornam-se mais pegajosas e elásticas, o que faz com que estas se acumulem na superfície das pás. Como consequência, a capacidade de transferência de calor do óleo térmico para o volume das lamas será menor, e por isso, a taxa de secagem diminui acentuadamente durante a fase pastosa, com um teor de humidade de 2,50 a 1,55 kg de água por kg de sólidos secos. Quando o teor de humidade diminui ainda mais, a força dos eixos aumenta gradualmente, correspondendo à transição entre a fase pegajosa e a fase irregular. Durante a fase irregular, ocorre uma taxa de secagem constante das lamas e observa-se num determinado instante que a taxa de secagem cresce, acompanhada de um aumento da força de rotação das pás. O aumento da rotação das pás indica que o volume das lamas irregulares diminuiu acentuadamente e inicia-se a transição para a fase granular, onde a taxa de secagem diminui para um valor mínimo, sendo a força de rotação das pás nesta fase insignificante, quando comparada com as outras duas fases.

Com os resultados obtidos nesta experiência, pode-se concluir que os principais parâmetros que influenciam a taxa de secagem das lamas são a temperatura de aquecimento, a velocidade do agitador e o caudal de entrada de ar.

Para determinar a influência da temperatura de aquecimento sobre o processo de secagem de lamas, foram realizadas três experiências sob diferentes temperaturas do óleo térmico (140, 160 e 180°C), e com um caudal de entrada de ar de 1,3 m<sup>3</sup>/h, tal como se

encontra ilustrado na figura 4.17 pelas curvas de taxa de secagem para as três experiências. Apesar de ter sido feita uma simplificação do diâmetro das partículas na fase irregular igual à fase granular, os resultados são satisfatórios de acordo com os dados obtidos experimentalmente.

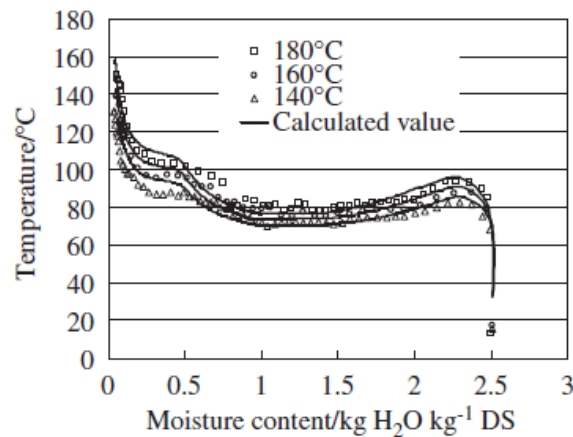


Figura 4.17 – Comparação entre as três experiências realizadas a diferentes temperaturas (Adaptado de Deng *et al*, 2009c).

A influência do caudal de ar sobre a curva de secagem foi obtida através de três caudais de ar diferentes (0,5; 1 e 1,3 m<sup>3</sup>/h), e com uma temperatura de aquecimento de 180°C. As curvas da taxa de secagem, calculadas experimentalmente, encontram-se ilustradas na figura 4.18. Os resultados obtidos indicam que o caudal de ar na faixa examinada tem pouca influência na taxa de secagem de lamias, uma vez que o caudal de ar se encontra diretamente relacionado com o coeficiente de transferência de calor por convecção.

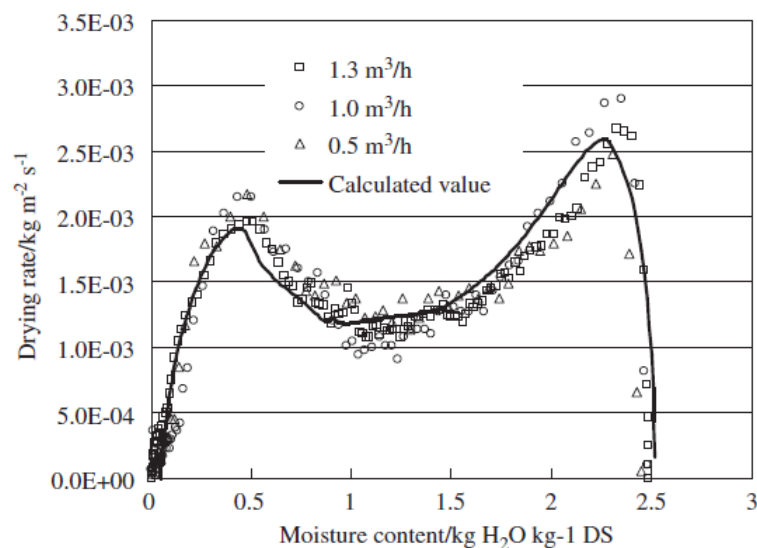


Figura 4.18 – Comparação entre as três experiências realizadas para diferentes caudais de ar (Adaptado de Deng *et al*, 2009d).

#### **4.2.4. Estudo da modelação matemática da transferência de calor e massa num secador de lamas solar**

Os secadores solares aplicados na secagem de lamas de depuração, parecem ser a melhor opção em termos de custos de operação e simplicidade para reduzir o volume e humidade das lamas. Este tipo de secadores consiste essencialmente numa estufa transparente instalada sobre um pátio, onde as lamas são espalhadas no pavimento. Assim, a radiação solar atinge diretamente as lamas, passando pela estrutura transparente da estufa e fornece calor necessário para evaporar a humidade residual presente nas lamas, através da instalação de um sistema de ventilação projetado para distribuir uniformemente o ar sobre a superfície das lamas.

Para a modelação matemática da secagem de lamas de depuração foi recolhida uma amostra de uma ETAR localizada na Polónia. Os resultados da modelação matemática têm por objetivo obter informações para a formulação de diretrizes para a conceção e operação de secagem de lamas através de um sistema de secagem solar.

Os principais pressupostos para o modelo matemático que descreve o processo de secagem solar de lamas incluem o transporte de calor e de massa dentro das lamas, no ar ambiente e na fronteira de ambos.

Para trabalhar na programação matemática, assumiu-se que o dispositivo de revolvimento trabalha a uma velocidade linear constante de 0,5 m/min, e que a duração total de uma única passagem da amostra é de 120 minutos. Ao completar uma volta, o dispositivo inverte a seu sentido e reinicia o seu movimento, podendo os intervalos de inversão reais variar. Apenas as lamas localizadas na parte central da instalação são movidas em intervalos iguais de 120 minutos. De seguida são apresentados os resultados da simulação realizada num único dia de verão, em que a taxa de secagem obtida foi de 8,12 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>.dia para cada movimento de 120 minutos, e 8,1 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>.dia para movimentos em intervalos de 200 minutos e 40 minutos. No entanto, valores instantâneos e locais deste parâmetro podem diferir consideravelmente para diferentes frequências de tempo. Se por um lado, o movimento das lamas aumenta o teor de humidade na superfície da camada, por outro lado baixa a sua temperatura (durante o dia). Para os resultados obtidos na figura 4.19, efetuaram-se ambas as experiências às 13:30h.

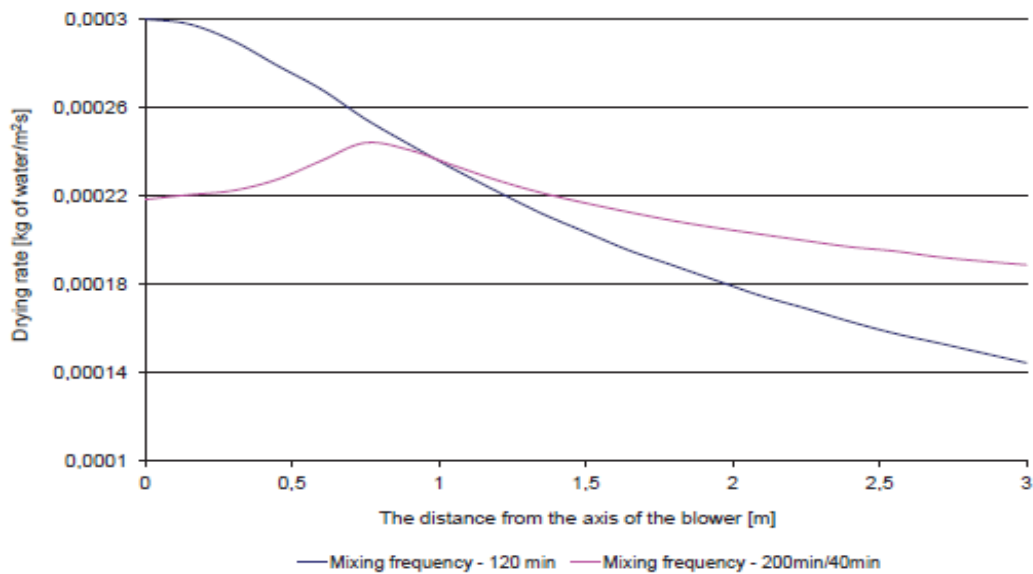


Figura 4.19 – Taxa de secagem das lamas em função da distância entre o eixo do ventilador para diferentes intervalos de tempo (Adaptado de Krawczyk, P., 2016a).

Para a simulação do impacto da elevação do ventilador na taxa de secagem das lamas, foi realizada modelação matemática, que demonstra que a mudança da elevação do ventilador acima da superfície húmida neste caso, não tem impacto significativo na taxa de secagem (figura 4.20). Tal como na situação anterior, os resultados foram obtidos num dia de verão com três valores de elevação do ventilador (2,7; 3,2 e 3,7 metros), em que durante o dia quase não se registaram alterações entre as diferentes alturas do ventilador.

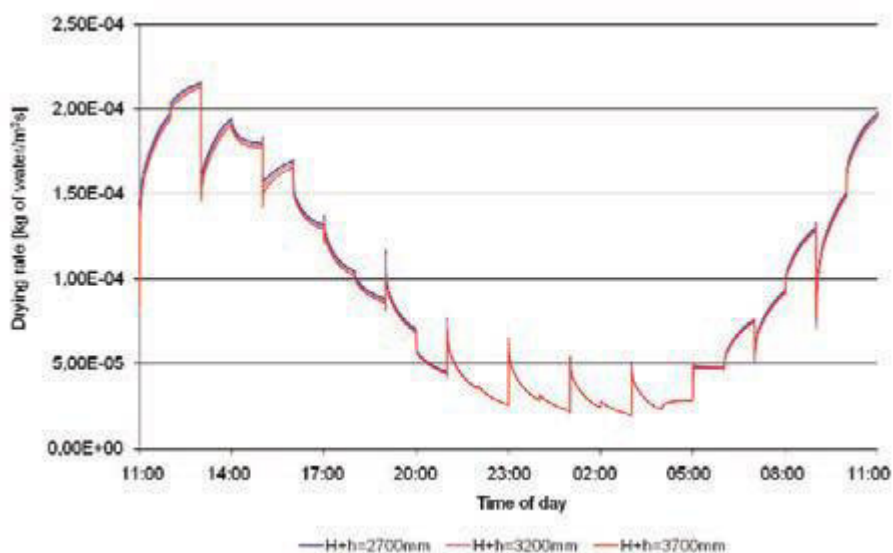


Figura 4.20 – Comparação da variação diária da taxa de secagem para diferentes alturas do ventilador (Adaptado de Krawczyk, P., 2016b).

Os resultados obtidos, permitiram calcular a taxa de secagem média das lamas, que foi de 8,21 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>.dia para uma elevação de 2,7 metros do ventilador, 8,12 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>.dia para uma elevação de 3,2 metros do ventilador e de 8,03 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>.dia para uma elevação de 3,7 metros do ventilador. Assim, reduzir a elevação do ventilador em 1 metro leva a um aumento da taxa de secagem média de apenas 0,18 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>.dia, obtendo-se a maior taxa de secagem das lamas.

#### **4.2.5. Estudo de modelos cinéticos semi-teóricos e empíricos de secagem de lamas em camada fina por lâmpada de infravermelhos**

Nos últimos anos têm sido usados muitos modelos cinéticos de secagem de lamas com camada fina para descrever o comportamento do processo de secagem de camadas finas de lamas de depuração. O objetivo deste estudo de modelação matemática foi o de investigar a influência da espessura de lama e da temperatura de secagem no processo de secagem de camadas finas de lamas de depuração provenientes de ETAR municipais. Neste estudo foram aplicados vinte modelos cinéticos semi-teóricos e empíricos de secagem de camada fina para o processo de secagem das lamas, os quais se encontram registados na tabela 4.3, sendo os principais objetivos a obtenção de um modelo cinético de secagem de camada fina adequada para o processo de secagem de lamas, e o cálculo da humidade e a energia durante do processo de secagem de lamas.

**Tabela 4.3 – Modelos de secagem de camada fina usados neste caso de estudo (Adaptado de Zhou e Jin, 2016a).**

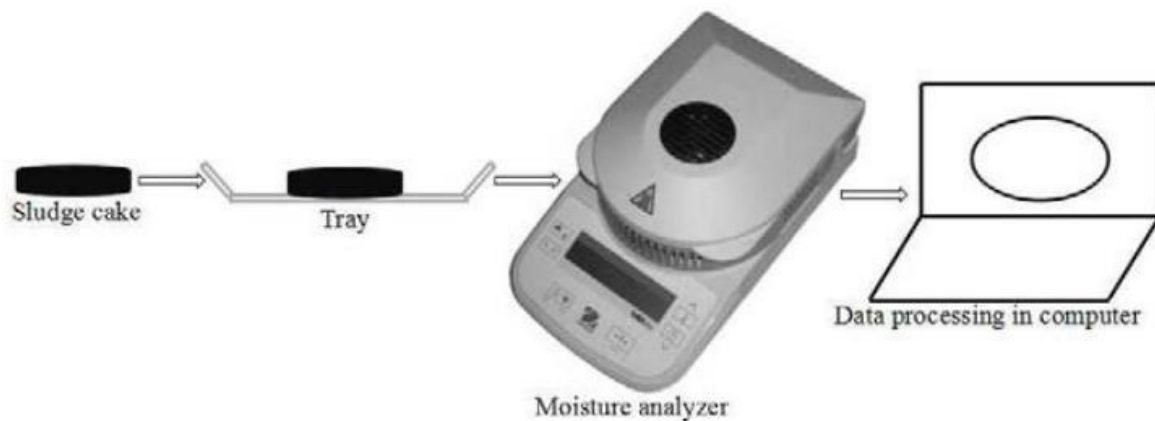
Num	Model	Mathematical expression
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
3	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
4	Modified page I	$MR = \exp(-(kt)^n)$
5	Modified page II	$MR = \exp(-k(\frac{t}{L^2})^n)$
6	Simplified Fick's diffusion	$MR = \exp(-k(\frac{t}{L^2}))$
7	Weibull	$MR = \exp(-(\frac{t}{a})^b)$
8	Thompson	$t = a \cdot \ln(MR) + b \cdot (\ln(MR))^2$
9	Wang and Singh model	$MR = a \cdot t^2 + b \cdot t + 1$
10	Parabolic model	$MR = a + b \cdot t + c \cdot t^2$
11	Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$
12	Midilli	$MR = a \cdot \exp(-kt^n) + b \cdot t$
13	modified Midilli	$MR = \exp(-kt^n) + b \cdot t$
14	Balbay and Sahin	$MR = (1 - a) \cdot \exp(-kt^n) + b$
15	Hasibuan and Daud	$MR = 1 - a \cdot t^n \cdot \exp(-kt^n)$
16	Two-term	$MR = a \cdot \exp(-k_1 t) + b \cdot \exp(-k_2 t)$
17	Two-term exponential	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-kat)$
18	Approximation of diffusion	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-kbt)$
19	Verma	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1 - a) \cdot \exp(-gt)$
20	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht)$

As amostras frescas de lamias de depuração usadas neste caso de estudo foram obtidas a partir de uma ETAR municipal situada em Pequim, onde inicialmente o teor de humidade médio era de 76% (base seca), tendo sido medido com uma temperatura de 105 °C. As amostras de lamias foram preparadas em cilindros com um diâmetro de 1,7 cm e com uma espessura a variar entre 2 a 10 mm, tendo sido cada experiência de secagem efetuada em triplicado.

Neste caso de estudo, o equipamento de secagem usado para a realização das experiências foi um analisador de humidade Sartorius Moisture Analyser MB25. As características técnicas pertinentes deste equipamento são: aquecimento por lâmpada de infravermelhos, potência máxima de 250 W; escala de temperatura de 50-160 °C, com uma sensibilidade de temperatura de 1%; carga máxima de 110 g, com uma sensibilidade de 0,6% para uma amostra de 1 g e de 0,06% para uma amostra de 10 g.

As amostras de lamias de depuração (bolo) foram colocadas numa bandeja no analisador de humidade e a temperatura de secagem foi ajustada como 65, 85, 100, 115, 125 e 135 °C. A massa de bolo de lamias foi obtida em intervalos de 30 segundos durante o processo de secagem, a fim de se obter uma curva característica de secagem. O fluxograma da experiência de secagem de camada fina realizada, encontra-se ilustrado na figura 4.21.





**Figura 4.21 – Fluxo do processo da experiência de secagem da camada fina de lamas de depuração (Adaptado de Zhou e Jin, 2016b).**

O teor de humidade ( $M_t$ ) (equação 1), o rácio de humidade ( $MR$ ) (equação 2) e a taxa de secagem ( $DR$ ) (equação 3) do bolo de lamas de depuração foram calculados através das seguintes equações (Zhou e Jin, 2016c):

$$M_t = \frac{(W_o - W_t) - W_d}{W_d} \quad (1)$$

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (2)$$

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3)$$

A análise de regressão não linear foi realizada com o *software* Origin 8.0, tendo sido usado como critério para avaliar o ajuste de modelos cinéticos de secagem de lamas de camada fina aos dados experimentais, duas funções de erro ( $R^2$  – coeficiente de correlação e RSS – soma residual de quadrados), sendo que o valor de  $R^2$  mais elevado e o valor de RSS mais baixo, correspondem ao melhor ajuste.

Devido ao processo de secagem ocorrer principalmente no período de queda da taxa de secagem, a difusão da humidade durante o processo de secagem é principalmente controlada pela difusão interna. Com base nas leis de Fick, e condições iniciais de fronteira, foi derivado um modelo de difusão para calcular a difusividade efetiva da humidade ( $D_{eff}$ ), tal como se segue na seguinte equação (4) (Zhou e Jin, 2016d):

$$MR = \frac{2 \sin^2(\lambda)}{\lambda^2 + \lambda \sin(\lambda) \cos(\lambda)} \exp\left(-\lambda^2 \frac{D_{eff}}{L^2} t\right) \quad (4)$$

A relação entre a difusividade efetiva da humidade e a temperatura de secagem foi descrita pela equação (5) de Arrhenius (Zhou e Jin, 2016e):

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (5)$$

A energia de ativação ( $E_a$ ) pode ser determinada a partir da equação (5) de Arrhenius.

O comportamento de secagem do bolo de lamias neste caso de estudo foi semelhante para as diversas amostras, no entanto, o tempo de secagem de cada processo de secagem foi diferente consoante a espessura das amostras e a temperatura de secagem. A figura 4.22 apresenta as curvas de secagem para diferentes espessuras de amostras de lamias e temperaturas de secagem.

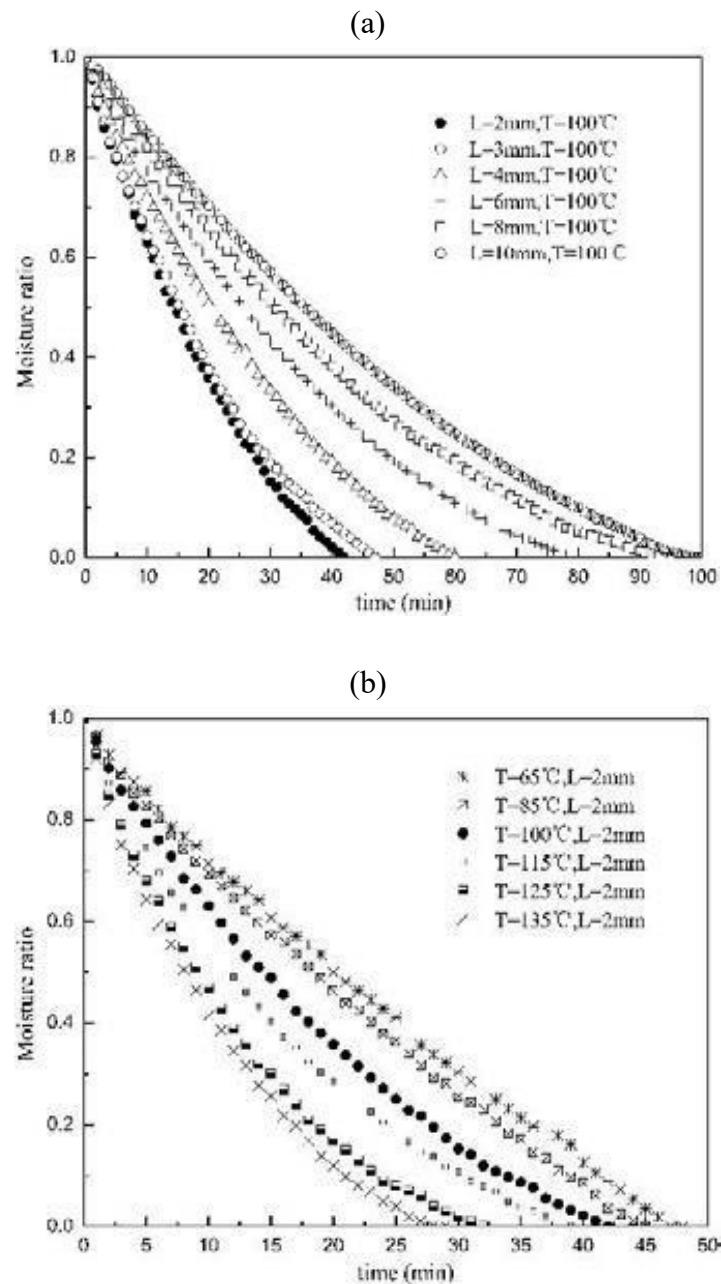


Figura 4.22 – Curvas de secagem para uma temperatura de 100 °C e diferentes espessuras de bolo de lamias (a) e curvas de secagem para uma espessura de 2 mm de bolo de lamias a diferentes temperaturas de secagem (b) (Adaptado de Zhou e Jin, 2016f).

Como se pode observar através da figura 4.22, e como seria espectável, o bolo de lamas mais fino e uma temperatura de secagem mais elevada resultaram num processo de secagem mais rápido. A figura mostra também que o tempo de secagem necessário para atingir a proporção de humidade final foi de 42, 47, 60, 80, 95 e 100 minutos, em espessuras de bolo de lamas de 2, 4, 6, 8 e 10 mm, respetivamente, sendo que a taxa de secagem média aumentou 2,38 vezes, à medida que a espessura do bolo de lamas diminuiu de 10 para 2 mm. Pode-se também concluir que o tempo de secagem necessário para atingir a proporção de humidade final foi de 48, 45, 42, 39, 32 e 29 minutos em temperaturas de 65, 85, 100, 115, 125 e 135 °C, respetivamente, sendo que a taxa de secagem média aumentou 1,66 vezes com a temperatura de secagem.

A figura 4.23 apresenta a taxa de secagem *versus* a humidade em diferentes espessuras do bolo de lamas e temperaturas de secagem.

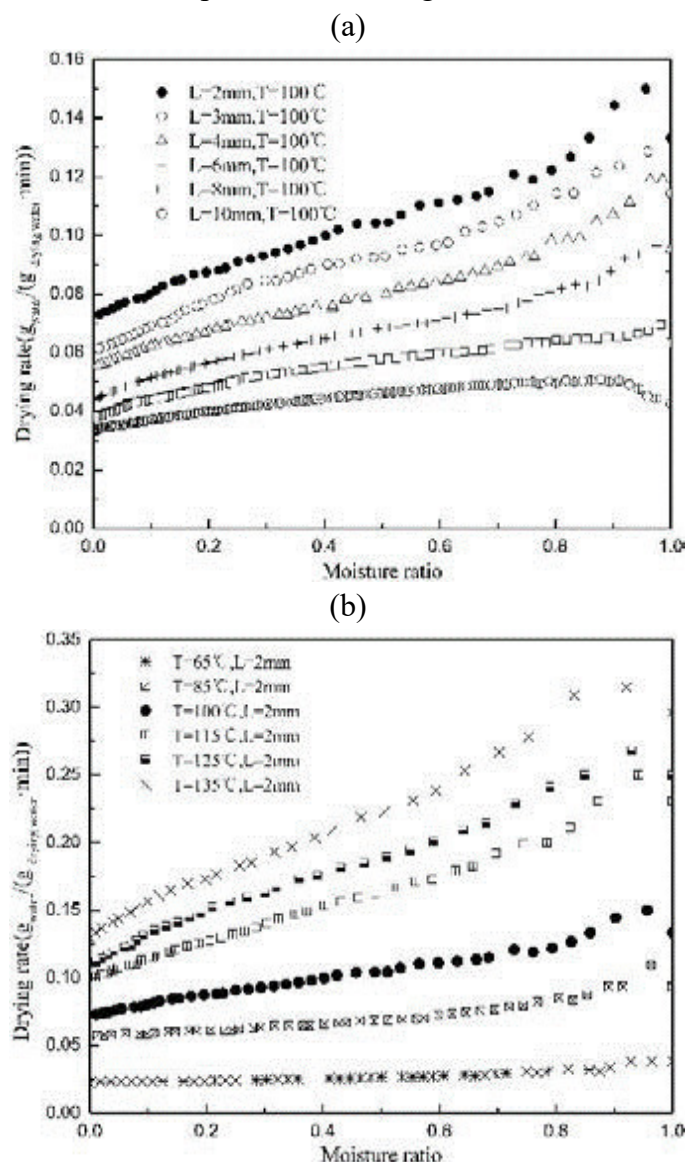


Figura 4.23 – Curva de taxa de secagem para uma temperatura de 100 °C e diferentes espessuras de bolo de lamas (a) e curva de taxa de secagem para uma espessura de 2 mm de bolo de lamas e diferentes temperaturas de secagem (b) (Adaptado de Zhou e Jin, 2016g).

Como se pode observar através da figura 4.23, o processo de secagem ocorreu principalmente no período de queda da taxa de secagem, o que prova que a difusão devida ao mecanismo físico reage ao movimento de humidade no bolo das lamaz.

Os resultados dos dados experimentais da análise não linear dos vinte modelos cinéticos de secagem de camada fina de lamaz encontram-se apresentados nas tabelas 4.4 e 4.5.

**Tabela 4.4 – Resultados da regressão não linear para uma temperatura de 100 °C e diferentes espessuras do bolo das lamaz (Adaptado de Zhou e Jin, 2016h).**

Num	L=2 mm		L=3 mm		L=4 mm		L=6 mm		L=8 mm		L=10 mm	
	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>
1	0.09799	0.97319	0.08714	0.97849	0.14116	0.97420	0.16986	0.97498	0.23721	0.97135	0.33690	0.96093
2	0.07986	0.97761	0.06880	0.98265	0.11771	0.97812	0.13234	0.98026	0.16833	0.97945	0.22806	0.97328
3	0.03072	0.99139	0.02340	0.99410	0.04468	0.99169	0.04417	0.99341	0.04252	0.99481	0.06226	0.99271
4	0.03071	0.99139	0.02340	0.99410	0.04468	0.99169	0.04417	0.99341	0.04252	0.99481	0.06216	0.99272
5	0.05103	0.98570	0.03618	0.99087	0.06422	0.98806	0.06284	0.99063	0.06259	0.99236	0.08715	0.98979
6	0.09799	0.97319	0.08714	0.97849	0.14116	0.97420	0.16986	0.97498	0.23721	0.97135	0.33690	0.96093
7	0.03071	0.99139	0.02340	0.99410	0.04468	0.99169	0.04417	0.99341	0.04252	0.99481	0.06216	0.99272
8	1788.08	0.72339	2223.09	0.75343	3708.47	0.80849	6673.98	0.84476	9461.91	0.86613	21246.7	0.74272
9	0.00375	0.99895	0.00446	0.99888	0.00477	0.99911	0.00394	0.99941	0.00115	0.99986	6.7×10 <sup>-4</sup>	0.99992
10	0.00160	0.99954	0.00243	0.99937	0.00184	0.99965	0.00121	0.99982	0.00109	0.99987	4.0×10 <sup>-4</sup>	0.99995
11	9.4×10 <sup>-4</sup>	0.99973	0.00204	0.99947	0.00147	0.99972	0.00239	0.99964	0.00420	0.99948	0.00205	0.99976
12	0.00111	0.99967	0.00190	0.99950	0.00176	0.99966	0.00170	0.99974	0.00127	0.99984	6.8×10 <sup>-4</sup>	0.99992
13	0.00124	0.99964	0.00219	0.99943	0.00207	0.99961	0.00252	0.99962	0.00179	0.99978	7.4×10 <sup>-4</sup>	0.99991
14	9.4×10 <sup>-4</sup>	0.99972	0.00172	0.99955	0.00145	0.99972	0.00134	0.99980	0.00103	0.99987	5.0×10 <sup>-4</sup>	0.99994
15	8.3×10 <sup>-4</sup>	0.99976	0.00151	0.99961	0.00126	0.99976	0.00103	0.99984	7.6×10 <sup>-4</sup>	0.99991	3.3×10 <sup>-4</sup>	0.99996
16	0.07986	0.97647	0.06880	0.98186	0.11771	0.97735	0.13234	0.97974	0.16833	0.97900	0.22806	0.97272
17	0.03413	0.99043	0.02551	0.99357	0.04972	0.99076	0.05045	0.99247	0.05499	0.99329	0.08577	0.98995
18	0.00119	0.99966	0.00168	0.99957	0.04389	0.99170	0.00156	0.99976	0.04589	0.99434	0.07280	0.99138
19	0.03015	0.99134	0.02202	0.99432	0.04389	0.99170	0.04344	0.99343	0.04589	0.99434	0.07280	0.99138
20	0.07986	0.97519	0.06880	0.98099	0.11771	0.97653	0.13234	0.97919	0.16833	0.97853	0.22806	0.97214

**Tabela 4.5 – Resultados da regressão não linear para uma espessura de 2 mm do bolo das lamaz e diferentes temperaturas (Adaptado de Zhou e Jin, 2016i).**

Num	T=65°C		T=85°C		T=100°C		T=115°C		T=125°C		T=135°C	
	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>	RSS	R <sup>2</sup>
1	0.19876	0.95023	0.16174	0.95740	0.09799	0.97319	0.05019	0.98456	0.03992	0.98563	0.04048	0.98414
2	0.16597	0.95750	0.13732	0.96301	0.07986	0.97761	0.04457	0.98593	0.03419	0.98730	0.03642	0.98522
3	0.06989	0.98210	0.06230	0.98322	0.03072	0.99139	0.02365	0.99253	0.01546	0.99426	0.02032	0.99176
4	0.06989	0.98210	0.06227	0.98323	0.03071	0.99139	0.02364	0.99254	0.01545	0.99426	0.02031	0.99176
5	0.11130	0.97150	0.09370	0.97476	0.05103	0.98570	0.03406	0.98925	0.02192	0.99186	0.02892	0.98826
6	0.19876	0.95023	0.16174	0.95740	0.09799	0.97319	0.05019	0.98456	0.03992	0.98563	0.04048	0.98414
7	0.06989	0.98210	0.06227	0.98323	0.03071	0.99139	0.02364	0.99254	0.01545	0.99426	0.02031	0.99176
8	4594.62	0.50803	2112.89	0.73347	1788.08	0.72339	1528.23	0.70573	1026.16	0.64597	1627.77	0.24988
9	0.00633	0.99838	0.00684	0.99816	0.00375	0.99895	0.01449	0.99543	0.00955	0.99645	0.01299	0.99473
10	0.00314	0.99918	0.00270	0.99926	0.00160	0.99954	0.00602	0.99805	0.00431	0.99835	0.00588	0.99753
11	0.00279	0.99927	0.00210	0.99942	9.4×10 <sup>-4</sup>	0.99973	0.00100	0.99968	0.00105	0.99960	0.00185	0.99922
12	0.00181	0.99951	8.0×10 <sup>-4</sup>	0.99977	0.00111	0.99967	5.9×10 <sup>-4</sup>	0.99981	0.00127	0.99950	0.00179	0.99922
13	0.00181	0.99953	8.0×10 <sup>-4</sup>	0.99978	0.00124	0.99964	6.1×10 <sup>-4</sup>	0.99980	0.00134	0.99948	0.00181	0.99924
14	0.00180	0.99952	7.8×10 <sup>-4</sup>	0.99978	9.4×10 <sup>-4</sup>	0.99972	4.8×10 <sup>-4</sup>	0.99984	0.00104	0.99959	0.00151	0.99934
15	0.00180	0.99953	7.8×10 <sup>-4</sup>	0.99979	8.3×10 <sup>-4</sup>	0.99976	4.2×10 <sup>-4</sup>	0.99986	7.0×10 <sup>-4</sup>	0.99973	0.00117	0.99951
16	0.16597	0.95547	0.13732	0.96125	0.07986	0.97647	0.04457	0.98515	0.03419	0.98642	0.03642	0.98408
17	0.08353	0.97861	0.07076	0.98094	0.03413	0.99043	0.02277	0.99281	0.01518	0.99436	0.01993	0.99191
18	0.07574	0.98015	0.06441	0.98225	0.00119	0.99966	0.00275	0.99911	0.00126	0.99951	0.04048	0.98296
19	0.07574	0.98015	0.06446	0.98223	0.03015	0.99134	0.02078	0.99326	0.01349	0.99482	0.01822	0.99233
20	0.16597	0.95325	0.13732	0.95931	0.07986	0.97519	0.04457	0.98428	0.03419	0.98542	0.03642	0.98276

Como se ilustra nas tabelas 4.4 e 4.5, os valores de R2 e RSS variam entre 0,24988 a 0,99996 e de  $3,3 \times 10^{-4}$  a 21246,7, respetivamente. Dos vinte modelos cinéticos de secagem de camada fina de lamas de depuração, o modelo de Hasibuan e Daud foi o que deu os valores de R2 mais elevados e os valores de RSS mais baixos (Zhou e Jin, 2016j). Deste modo, este modelo foi considerado o mais apropriado para descrever a secagem de camada fina de lamas de depuração da ETAR em estudo.

A difusividade efetiva da humidade ( $D_{eff}$ ) foi calculada, obtendo-se valores de  $0,16670 \times 10^{-8}$ ,  $0,33487 \times 10^{-8}$ ,  $0,50149 \times 10^{-8}$ ,  $0,75086 \times 10^{-8}$ ,  $1,00095 \times 10^{-8}$  e  $1,33440 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, em temperaturas de secagem de 65, 85, 100, 115, 125 e 135 °C, respetivamente, sendo que como seria de esperar, o valor de difusividade efetiva da humidade aumentou à medida que a temperatura de secagem aumentou. De acordo com Zhou e Jin, 2016, a literatura relativa à secagem de lamas em camada fina mostra resultados diferentes dos obtidos neste estudo, o que pode ser devido a diferentes origens de lamas de depuração e a diferentes condições experimentais.

A energia de ativação ( $E_a$ ) pode ser determinada a partir da equação anteriormente referida neste estudo *versus*  $1/(T+273,15)$ , de modo a obter-se a influência da temperatura de secagem na difusividade efetiva da humidade, tal como se encontra representado na figura 4.24, que apresentou uma boa relação linear.

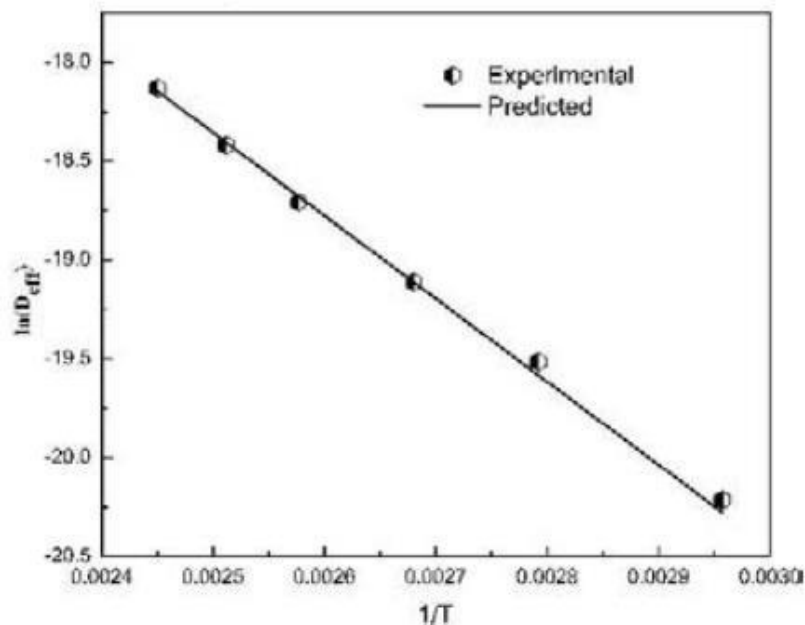


Figura 4.24 – Influência da temperatura de secagem na difusividade eficaz da humidade (Adaptado de Zhou e Jin, 2016j).

A influência da temperatura de secagem no valor de difusividade efetiva da humidade foi calculada através da seguinte equação (6):

$$D_{eff} = 3.9 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{4200.28}{T+273.15}\right) \quad (R^2= 0.99774) \quad (6)$$

Assim, a energia de ativação ( $E_a$ ) obtida nas condições experimentais deste estudo foi de 34,9211kJ/mol.



## 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO

Neste trabalho foi efetuado um resumo do processo de gestão das águas residuais em Portugal e uma análise de alguns sistemas industriais de secagem de lamas de depuração e de alguns estudos académicos recentes sobre cinética de secagem de lamas de ETAR.

A gestão de lamas de depuração constitui um problema à escala global, com tendência para agravar devido ao crescente aumento da população e desenvolvimento socioeconómico, especialmente em países em desenvolvimento. Como tal verifica-se um interesse crescente da comunidade científica em estudar os processos de valorização de lamas, nomeadamente a eficiência dos processos de secagem, e o desenvolvimento industrial de secadores direcionados para a secagem de lamas. Ao longo desta dissertação comprovou-se que é de extrema importância que os atores intervenientes nestes processos, desenvolvam a sua atividade em complemento, concebendo planos de ação e de estudo orientados para alcançar um processo de tratamento de águas residuais sustentável, em que a secagem térmica de lamas constitua uma solução economicamente viável para uma melhor gestão das lamas, permitindo assim o desvio da deposição em aterro. No quadro legislativo atual, a valorização agrícola é vista em vários países, como Portugal, como uma alternativa válida para o destino final a dar às lamas provenientes de ETAR, sempre que estas cumpram os requisitos exigidos pela legislação em vigor e a viabilidade económica da gestão seja assegurada. O elevado teor de água das lamas de ETAR faz com que o transporte de lamas constitua uma fatia significativa do processo de gestão das lamas e ao mesmo tempo contribui para a produção de maus odores e risco de saúde pública pela presença de agentes patogénicos. Assim, a secagem térmica de lamas surge como inevitável no contexto atual de uma gestão de lamas que privilegie a valorização, sem causar impacto ambiental e mau estar à população.

A secagem térmica das lamas pode ocorrer de forma direta ou indireta, havendo uma clara tendência das tecnologias para a secagem térmica direta. A agitação/movimentação das lamas durante processo de secagem é considerada fundamental para mitigar o efeito de encolhimento das lamas e a barreira superficial que se forma e que impede a evaporação da água retida no interior, permitindo assim aumentar a cinética de secagem. O aumento da temperatura do fluxo de ar tem uma influência significativa no aumento da cinética de secagem e conseqüente redução do tempo de secagem. A formação de uma película fina de lamas reduz o tempo de secagem, tanto mais quanto menor a espessura da película. Se essa película fina for remexida esse tempo baixa consideravelmente, pois o efeito de crosta superficial é quebrado. A variação do caudal de ar quente só se torna mais significativo para o aumento da cinética de secagem se as lamas forem remexidas, caso contrário forma-se fissuras a superfície, que embora contribuam para aumentar a área específica, não proporcionam o mesmo efeito obtido com o remexer das lamas. A incorporação de aditivos adjuvantes à secagem, como o CaO, permite aumentar a cinética de secagem.



Não tendo sido possível a elaboração de experiências laboratoriais, é ainda necessário encontrar formas de secagem que sejam eficientes do ponto de vista energético, uma vez que para se obter um elevado grau de secagem das lamas, é preciso uma grande quantidade de calor, o que significa um maior consumo energético. No decorrer deste trabalho foi possível encontrar processos energeticamente eficientes, como por exemplo o recurso ao uso de energia solar, mas que não são tão eficientes do ponto de vista do tempo secagem das lamas quando comparados com sistemas que utilizam uma grande quantidade de energia. Também as soluções baseadas em bomba de calor se mostram promissoras do ponto de vista energético, mas os sistemas de secagem nela baseada, não permitem uma secagem rápida e estão limitados para altas temperaturas de secagem, devido às características dos fluidos frigorígenos permitidos, por limite do valor  $GWP < 150$ .

Deste modo, pode-se concluir que para se proceder a uma secagem eficaz das lamas, a utilização de um secador convectivo, contínuo, com recurso a um dispositivo que assegure a movimentação/agitação das lamas (por filme fino em tapete rolante com capacidade para promover a agitação) afigura-se como a melhor solução. Um secador deste tipo permite uma temperatura de funcionamento relativamente baixa ( $< 150^{\circ}\text{C}$ ), e possibilita a recuperação de energia dos gases de exaustão, bem como o seu tratamento devido aos odores e uma baixa emissão de partículas. Este tipo de secador permitirá um elevado caudal de lamas à entrada (da ordem de 900 kg/h), a higienização das lamas, e reduzir o tempo de secagem. Para baixar os custos operacionais a solução passa pela utilização de energias residuais de processo industrial (ou em cogeração) ou energias renováveis (solar, queima de resíduos ou biogás).

### **Propostas futuras**

Considerando que no processo de secagem e gestão das lamas se deve ambicionar uma melhoria contínua e soluções mais eficientes e sustentáveis, propõe-se que sejam efetuados mais estudos e análises. Assim, propõe-se que em trabalhos futuros se proceda à:

- Avaliação energética e eficiência de unidades de secagem de lamas (1);
- Avaliação económica do funcionamento de unidades de secagem de lamas para diferentes fontes energéticas (2);

Na proposta (1) importa obter indicadores de referência de energia térmica ( $\text{kWh}_t$ ) e energia elétrica específica ( $\text{kWh}_e$ ) por unidade de massa de lamas seca ou por unidade de massa de água removida. Para tal é preciso definir as fronteiras do volume de controlo do secador e estabelecer balanços mássicos e energéticos, e situações de recuperação de energia. Relativamente à eficiência da secagem importa apurar quais os parâmetros que mais influenciam a cinética de secagem e procurar obter correlações semi-téóricas ou empíricas que permitam posteriormente efetuar análises para a conceção de novos modelos de secadores.

Na proposta (2) interessa conhecer quais as potenciais fontes de energia residual ou renovável e a disponibilidade e potencial energético de cada uma. Ou seja, no caso de gases residuais de processo industrial, importa conhecer a temperatura, caudal, pressão,

composição do fluido quente, bem como a variação ao longo do dia ou ano. Para energias renováveis importa conhecer a disponibilidade ao longo do dia ou ano (caso da energia solar) e a variabilidade das suas características (no caso da biomassa, a humidade que influencia o poder calorífico e sistema de queima a seleccionar; no caso do biogás, a percentagem de  $H_2S$ , pois a sua presença contribui fortemente para a corrosão dos equipamentos, e também a variação do poder calorífico associado percentagem de  $CH_4$ ). Feita a avaliação das possíveis fontes de energia e suas características, é preciso conhecer o seu preço (tendo em atenção, que esse preço é influenciado por eventuais tratamentos preparatórios que a fonte de energia precise para poder ser usada, ex. secagem, trituração, remoção de  $H_2S$ ) e estimar a sua variação para um período de 10 anos, tendo em conta a inflação e medidas reguladoras ou incentivos que possam vir a existir o consumo dessas fontes de energia. Na estimação a 10 anos, importa discutir possíveis cenários, pois o mercado energético é muito guiado pelas flutuações associadas aos preços dos combustíveis tradicionais.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., Morais, M. e Cunha-Queda, C., *Sewage sludges, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors*. Waste Management. 40: (2015); 44-52.

Andreoli, C., Sperling, M., Fernandes, F. (Editors), *Sludge Treatment and Disposal*; Volume 6, (2007).

Buss-SMS-Canzler, *Drying Technology for Sewage Sludge*. [www.sms-vt.com](http://www.sms-vt.com), consulta em 17 abril 2017.

Danish, M., Jing, H., Pin, Z., Ziyang, L. e Pansheng, Q., *A new drying kinetic model for sewage sludge drying in presence of CaO and NaClO*. Applied Thermal Engineering. 106, (2016); 141-152.

Davis, Mackenzie L; *Water and Wastewater Engineering – design principles and practice*; Professional Edition, McGraw-Hill, (2010).

Decreto-Lei n.º 256/2009, de 2 de outubro; Diário da República, 1ª série – N.º 192.

Deng, W., Yan, J., Li, X., Wang, F., Lu, S., Chi, Y. e Cen, K., *Measurement and simulation of the contact drying of sewage sludge in a Nara-type paddle dryer*. Chemical Engineering Science. 64, (2009); 5117-5124.

Diretiva n.º 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de junho.

Diretiva n.º 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de maio.

Flaga, A. e Schnotale, J., *Sewage sludge thermal drying and hygienization in a closed loop energy recovering system*. Proceedings of a Polish-Swedish-Ukrainian Seminar, Lviv, Ukraine, October 26-28 (2006).

Krawczyk, P., *Numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer during sewage sludge drying in solar dryer*. Procedia Engineering 157, (2016); 230-237.

Lista Europeia de Resíduos, Código LER.

Mäkelä, M., Fraikin, L., Léonard, A., Benavente, V. e Fullana, A., *Predicting the drying properties of sludge based on hydrothermal treatment under subcritical conditions*. Water Research. 91, (2016); 11-18.

Manfredini & Schianchi,, @secadores rotativos. <http://www.manfredinieschianchi.com/305-02-4PO-secadores-rotativos.htm>. Consulta em 18 maio 2017.

Mendes, S., *Valorização de lamas de tratamento de águas residuais urbanas para utilização agrícola*; Trabalho de Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização em Hidráulica, (2014), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Metcalf and Eddy; *Wastewater Engineering – Treatment and Reuse*; 4ª Edição; Macgraw-Hill, Inc; (2004).

Ohm, T., Chae, J., Kim, J., Kim, H. e Moon, S., *A study on the dewatering of industrial waste sludges by fry-drying technology*; Journal of Hazardous Materials. 168, (2009); 445-450.

Portaria n.º 209/2004, de 3 de março; Diário da República, 1ª série – B.

Portaria n.º 335/97, de 16 de maio; Diário da República, 1ª série – B.

Relatório do Estado do Abastecimento de Água e do Tratamento de Águas Residuais; Sistemas Públicos Urbanos INSAAR 2010 (dados 2009); julho 2011.

Santos, Jorge Filipe Sequeira, *Metodologia de Tratamento de Lamas e Organização do Balanço de Massas*; Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Área de Especialização de Hidráulica, (2012), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Silva, Ana Lúcia Ferreira, *Estudo Comparativo de Sistemas de Espessamento de Lamas de ETAR – caso de estudo: mesa de espessamento versus tambor rotativo*; Mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do Território, (2015), Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo,

Sousa, Ricardo José Vieira, *Estratégias de Gestão de Lamas das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). Extrusão de Lamas para Aplicação na Agricultura*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Ambiente (Ramo de Gestão e Tratamento de Resíduos Industriais), (2015); Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Universidade do Porto, Porto.

Tavares, P., *Otimização da gestão de lamas de ETAR numa perspetiva regional*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, (2007), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Watropur, *Sistemas Watromat de secagem de lamas em contínuo e por cargas a baixa temperatura*. <http://www.watropur.com/products/standard-sludge-dryer.html>, consulta em 26 abril 2017.

Zhou, Y. e Jin, Y., *Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of dewatered municipal sewage sludges*; Procedia Environmental Sciences. 31, (2016); 758-766.

Zhu, F., Zhang, Z., Jiang, H. e Zhao, L., *The study of sewage sludges thermo-drying efficiency*; Procedia Environmental Sciences. 16, (2012), 363-367.



