



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise das tecnologias correntes para o tratamento e secagem de lamas de ETAR

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

Analysis of current technologies for treatment and drying of sewage sludge

Autor

Júlia Cardoso Gonçalves

Orientador

Professor José Carlos Miranda Góis

Júri

Presidente

Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor José Carlos Miranda Góis
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Professor Doutor Licínio Manuel Gando de Azevedo Ferreira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2017

“O senhor é meu pastor e nada me faltará”

Salmo 23

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de pessoas queridas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Agradeço ao meu orientador, Professor José Carlos Miranda Góis, pela orientação, apoio, disponibilidade e dedicação durante a realização do trabalho.

Aos engenheiros Filomeno, Filipe e Cristina por toda ajuda com a disponibilização de dados.

Aos meus amigos e colegas pela ajuda, carinho e disponibilidade em todas as circunstâncias e momentos.

Aos meus pais (Aberto e Joana), meus irmãos e outros familiares por me apoiarem incondicionalmente desde de início da minha caminhada.

A todos os que me apoiaram e incentivaram, sou muito grata.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o estudo das características e quantidade de lama produzida nas ETAR em Portugal, e a análise dos tipos de tecnologias existentes para secagem de lama, de modo a minimizar a humidade e favorecer o processo de gestão, tendo por finalidade a sua valorização. É apresentada e analisada a produção e o tratamento das lamas (urbanas e industriais) ao nível da ETAR, e as suas principais características. As obrigações legais dos produtores e operadores de lamas e as diferentes opções de valorização são analisadas, com ênfase para a valorização agrícola, sendo indicadas as concentrações máximas de metais pesados e substâncias tóxicas aceitáveis.

Neste estudo é realizada uma revisão das tecnologias de secagem de lamas por sistemas indiretos, diretos e combinados, incluindo os sistemas de secagem baseados no aproveitamento da energia solar. É também efetuada uma revisão dos assuntos relacionados com a taxa de secagem, alterações superficiais, dimensionais e reológicas das lamas. De modo analisar a influência e eficiência dos diferentes sistemas de secagem procedeu-se à análise das tecnologias correntes e resultados de estudos experimentais de secagem de lamas. Os resultados mostram que a superfície específica da lama afeta a cinética de secagem, devido à formação de uma crosta superficial que dificulta a secagem de lama, e que o aumento da cinética de secagem e redução do tempo de secagem requer altas temperaturas do fluido de secagem. Os secadores que promovem a agitação ou movimentação das lamas ao longo do processo são mais eficientes e permitem reduzir o consumo energético e o tempo de secagem das lamas, se adicionalmente usam uma baixa temperatura de operação ainda é possível reduzir mais os custos de operação. Mesmo assim, tendo em conta que a secagem térmica consome muita energia, para diminuir o consumo é recomendável o uso de energias renováveis (solar, biogás).

Com este estudo conclui-se que a seleção de um de secador depende do tipo de lama, destino final e tipos de energia disponíveis.

Palavras-chave: Lamas residuais urbanas, Tratamento de lama, Secagem, Secadores de lama, ETAR.

Abstract

The aim of this work is the analysis of the characteristics and quantity of sewage sludge produced in Portuguese's WWTP and the study of the different types of technologies for sewage sludge drying used to minimise moisture and favourise the management for the purpose of valorisation. The production and treatment of sludge (urban and industrial) at WWTP and the main characteristics of sewage sludge delivered are presented and analysed. The responsibilities of producers and operators of sewage sludge according the legislation is described and the different options of valorisation are analysed, with emphasis on agricultural valorisation and the maximum concentrations of heavy metals and acceptable toxic substances allowed are shown.

A review of sewage sludge drying technologies currently used, based in indirect, direct and combined systems, as also drying systems based on solar energy used is carry out. The drying rate, surface area, volume and rheological changes of sewage sludge during drying process are also analysed. The design and efficiency of the different types of dryers and the results of experimental studies are analysed. The results show that the influence of specific surface of the sewage sludge on the drying kinetic due to the formation of a surface crust, which makes sewage sludge drying difficult and show also that to increasing drying kinetics and reducing drying time requires high temperatures. Dryers that promote agitation or movement of sewage sludge are more efficient and allow the reduction of energy consumption and drying time. In addition, the dryers that operate at low temperature allows to increasing the reduction of operational costs. Nevertheless, thermal drying usually consumes a significant amount of energy, so to reduce energy consumption it is suitable to use renewable energy (solar, biogas).

In conclusion, the selection of sewage sludge dryer depends on the type of sewage sludge, final destination and type of energy available.

Keywords Urban sewage sludge, Sewage sludge treatment, Drying, Sewage sludge dryers, WWTP

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Siglas	xv
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e motivação do trabalho	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Tratamento de águas residuais e Gestão de lamas de etar: Revisão teórica	5
2.1. Processo de tratamento de águas residuais: fase líquida e fase sólida	5
2.2. Características e composição das lamas de ETAR	10
2.3. Gestão de lamas de ETAR	13
2.3.1. Transporte	13
2.3.2. Armazenamento	15
2.3.3. Destino final	15
2.3.4. Custos de tratamentos e destino final das lamas	19
2.3.5. Comparação da produção de lamas urbanas e opções de destino final nos países da EU	20
3. Análise comparativa das características das lamas de ETAR urbanas	25
3.1. Métodos de análise	25
3.2. Resultados e discussão	28
4. Secagem térmica de lamas de ETAR: análise de tecnologias	31
4.1. Formas de humidade na lama de ETAR e sua repartição	31
4.2. Relação da taxa de secagem com a humidade e estado físico da lama de ETAR	32
4.3. Métodos de secagem de lamas de ETAR	34
4.4. Sistemas tecnológicos de secagem de lama de ETAR	35
4.4.1. Secagem de lama de secador de tambor rotativo	35
4.4.2. Secadores de leito fluidizado	37
4.4.3. Secagem por atomização	38
4.4.4. Secador de disco horizontal	39
4.4.5. Secador de discos rotativos	40
4.4.6. Secador de lamas por tapete	41
4.4.7. Sistema de secagem de lamas WATROMAT	41
4.4.8. Sistema de secagem de lama a baixa temperatura (Evaporis LT)	42
4.4.9. Secagem térmica por turbo-secador (VOMM) com cogeração	43
4.4.10. Secagem térmica integrada com cogeração	44
4.4.11. Secagem solar (Héliantis)	45
4.5. Estudos laboratoriais de secagem	46
4.5.1. Secagem por convecção	46
4.5.2. Secagem por condução	51

4.5.3. Secagem solar.....	52
4.5.4. Sistemas combinados de condução e convecção de calor utilizados na secagem de lama.....	54
4.6. Análise comparativa entre as técnicas de secagem	57
5. Conclusões e propostas de trabalho	59
6. Referências bibliográfias.....	61
ANEXO A - Normas de referência para a análise às lamas.....	65
ANEXO B – Lamas de depuração e outras de composição similar.....	66
ANEXO C - Elementos de instrução do Plano de Gestão de Lamas	68
ANEXO D – Dados de 2012 e 2013 da Produção e destino final de lamas de ETAR em Portugal	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - O diagrama esquemático de uma linha de tratamento convencional de águas residuais urbanas (Montes 2010).....	6
Figura 2.2 - Custos de tratamento e utilização/deposição final de lamas (Hall, 1999, citado por Tavares, 2007).....	20
Figura 2.3 - Principais opções de destino final das lamas de ETAR na EU (Adaptado de http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/index.htm , Comissão Europeia, 2008).....	23
Figura 3.1 - Relação entre a disponibilidade de elementos e microrganismos em função do pH do solo (adaptado de INIAP, 2006 citado por Lopes 2016).	27
Figura 4.1 – Repartição da água na lama de ETAR (adaptado de Tsang and Vesilind, 1990, citado em Chen et al., 2002).....	31
Figura 4.2 - Curvas de secagem para lamas de depuração (Adaptado Werther e Ogada, 1999).....	32
Figura 4.3 - As mudanças físicas durante a secagem de lamas (adaptado de Chen et al., 2002 e Werther e Ogada, 1999).....	33
Figura 4.4 - Secadores de tambor rotativo: (a) de passagem única (Cortesia de Vandebroek International BV) (Chen, 2002).	36
Figura 4.5 - Secador tambor rotativa de passagem única (Haarslev, 2017).	36
Figura 4.6 -Secadores de leito fluidizado: (a) com tubos de aquecimento; (b) com sobreaquecido aquecimento a vapor, transportador 1-parafuso, lâmina 2-estacionária, 3-cilindro, ciclone 4-lado, 5-ejector, palhetas 6-estacionárias, 7-superaquecedor, 8-impulsor (Chen, 2002).	38
Figura 4.7 - Secador de atomização (Sprayprocess, 2017).....	39
Figura 4.8- Secador de disco (Haarslev,2017).	40
Figura 4.9 - Secador de discos rotativos (Dryingmachineschina, 2017).	40
Figura 4.10 - Sistema de secagem de lama WATROMAT (Watropur, 2017).	42
Figura 4.11 - Secador Evaporis LT (Suez's Degremont, 2017).....	42
Figura 4.12 - Instalação integral do turbo-secador VOMM (Fonte: Cortesia ETAR da Guia, citado em Berco, 2013).	44
Figura 4.13 - Representação esquemática do processo de secagem térmica com cogeração (Godinho, 2009).	45
Figura 4.14 - O princípio de funcionamento do secador solar (Fonte: Héliantis, 2017).	45
Figura 4.15 - Curva típica de secagem das lamas residual (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).....	46

Figura 4.16 - Influência da origem das lamas no seu comportamento durante a secagem por convecção (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).....	47
Figura 4.17 - Observação da contração de volume durante a secagem por convecção das lamas de ETAR (Adaptada de Bennamoun et al., (2013).....	48
Figura 4.18 - Variação do encolhimento e fissuras durante a secagem por convecção das lamas de águas residuais (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).	49
Figura 4.19 - Contração e formação de fissuras durante a secagem por convecção (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).....	49
Figura 4.20 - Influência do armazenamento durante o comportamento cinético de secagem das lamas de ETAR (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).	50
Figura 4.21 Evolução do torque durante a secagem de contacto com agitação para diferentes lamas e diferentes condições de operação (Deng et al., 2009, citado por Bennamoun et al. 2013).	51
Figura 4.22 - Evolução da taxa de secagem durante a secagem solar (Lei et al.,2009, citado Bennamoun et al., 2013): (a) Teor de humidade, (b) taxa de secagem.....	53
Figura 4.23 - Influência da temperatura do óleo no comportamento de secagem das lamas durante a fritura (Wu et al., 2012). (a) Variação do teor de humidade do produto e da sua temperatura, (b) Taxa de secagem.	55
Figura 4.24 - Curvas de secagem obtidas por secagem ao ar quente e uso de vapor superaquecido (Adaptado Arlabosse e Blanc (2012), citados em Bennamoun et al., 2013).	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo das fases e métodos de tratamentos da fase solida nas ETAR (adaptados de Silva, 2015 e de Lopes, 2016).....	9
Tabela 2.2 - Valores típicos de uma lama de ETAR tratada e não tratada (adaptado de Metcalf e Eddy, 2003).....	10
Tabela 2.3 - Concentração de metais pesados em lamas referentes a águas residuais urbanas e águas residuais urbanas & industriais, (Sleeman (1984), citado em Tavares, 2007).....	12
Tabela 2.4 - Valores Limite de metais pesados, compostos orgânicos e microrganismos nas lamas destinadas à aplicação na agricultura (adaptado do Anexo I do Decreto-Lei nº 276/2009).....	17
Tabela 2.5 - Valores limite de concentração de metais pesados consoante o pH do solo (adaptado do Anexo I do Decreto-lei nº 276/2009).....	18
Tabela 2.6 - Valor limite para as quantidades anuais de metais pesados que podem ser introduzidas nos solos cultivados, com base numa média de 10 anos (adaptado do Anexo I de Decreto-Lei n.º 118/2006 (kg /ha/ano).....	18
Tabela 2.7 - Produção de lamas urbanas e respetiva solução de destino final (adaptado do portal de estatística europeu, Eurostat, 2017).....	21
Tabela 3.1 - Classificação do solo de acordo com o pH (adaptado de INIAP, (2006) citado por Lopes, 2016).....	26
Tabela 3.2 - - Efeito do processo de tratamento das lamas sobre as formas de azoto nos bioossólidos (Dias, 2004).....	27
Tabela 3.3 - Características e composição das lamas de diferentes ETAR.....	29
Tabela 4.1 - Tipos de secadores diretos e indiretos (Adaptado de Farinha, 2003).....	34
Tabela 4.2 - Vantagens e desvantagens de cada método de secagem (Adaptado de Bennamoun et al. 2013).....	57

[Remover se não aplicável.]

SIGLAS

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

DPO – Declaração de planeamento de operações

DRAP – Direção regional de agricultura e pescas

ETAR – Estação de tratamento de águas residuais

H – Humidade

LER- Lista europeia de resíduos

LU – Lamas urbanas

MO – Matéria orgânica

PCS – Poder calorífico superior

PGL – Plano de Gestão de Lamas

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação do trabalho

A dificuldade da gestão de lamas provenientes das ETAR tem-se vindo a acentuar, devido ao aumento da população, incremento das atividades industriais e crescimento da produção de lamas. Os efluentes enviados para ETAR são submetidos a processos físico-químicos e biológicos, e o objetivo destes tratamentos é garantir que a descarga no final para meio ambiente não afete o meio ambiente e a saúde pública. A concretização de planos de gestão de lamas deve ser vista de uma forma geral desde a quantidade produtiva até as tecnologias utilizadas para secar as lamas, porque isso vai reduzir o volume das lamas consideravelmente, permitindo diminuir os custos relacionados com o tratamento, transporte e armazenamento das lamas, e diminuir os odores produzidos, seguindo-se depois uma análise de modo a garantir as melhores soluções para o uso das lamas. As principais soluções de destino final das lamas são normalmente a valorização agrícola, valorização energética e o aterro sanitário. Em Portugal, em 2012, foi produzido 338 kt de lamas urbanas, tendo quase 50% das lamas produzidas sido enviada para valorização agrícola (Eurostat, 2017). Este valor está em concordância com a informação da APA de 2013, que refere uma produção total de 589 kt de lamas de depuração e uma quantidade de lamas de depuração declarada pelos operadores de gestão de resíduos para tratamento de 388 kt vinda de ETAR urbanas.

Segundo Tavares (2007), uma grande parte dos solos portugueses são carentes em matéria orgânica. Visto que as lamas são ricas em nutrientes, sobretudo fósforo, potássio e azoto, e em matéria orgânica, a valorização agrícola permite utilizar as lamas como corretivos, ajudando para a redução da quantidade de lama produzida pela ETAR urbanas. Esta utilização de lama no solo agrícola apresenta um enorme potencial para a gestão das lamas. Contudo, deve-se ter cuidado com utilização de lama no solo, por causas dos contaminantes orgânicos, dos metais pesados presentes nas lamas, e excesso de azoto que ao se encontrar em forma de nitratos, conseguirá originar poluição nos lagos e rios. Quanto a valorização energética das lamas, o processo de secagem térmica eleva o seu poder calorífico

de modo a tornar mais competitiva a sua utilização como fonte de energia. A deposição de lama em aterro sanitário só deve ser encarada com última solução.

Neste estudo, os diversos tipos de tecnologias de secagem vão ser estudados e comparadas, de maneira a ter noção da eficiência de cada um delas, para melhor adequar as lamas aos seus destinos finais, em favor da saúde e meio ambiente.

1.2. Objectivos

O presente trabalho pretende analisar os diferentes processos de tratamento de águas residuais urbanas e os vários tipos de secadores de lama, através dos seguintes objectivos específicos:

- revisão dos processos de tratamento e gestão de lama de ETAR;
- análise das características físico-químicas das lamas em três diferentes ETAR;
- comparar os diferentes tipos de secadores de lamas.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos e está dividida em três partes fundamentais: enquadramento geral, pesquisa dos estudos feitos anteriormente e resultados obtidos de caracterização de lamas de ETAR. No capítulo 1 é efectuado o enquadramento do tema, e definidos os objectivos e por fim a estrutura sucessiva dos capítulos durante a realização da presente dissertação. No capítulo 2 é realizada estado da arte, relativamente a gestão da lama de ETAR, sendo apresentados os processos de tratamento do efluente líquido e sólido na ETAR, apresentados os parâmetros usados para a caracterização de lama de ETAR e é ainda referido os aspetos mais relevantes do enquadramento legal e os diferentes destinos finais para a valorização e eliminação de lamas de ETAR.

No capítulo 3 são mostrados uma análise comparativa das características das lamas de três ETAR diferentes, referindo os materiais e os métodos experimentais usados. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os tipos de secadores de lama considerados mais representativos e resultados obtidos em estudos laboratoriais, procurando-se estabelecer comparações entre as diferentes soluções para a secagem de lamas de ETAR.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões alcançadas e possíveis propostas futuras para seguir esta pesquisa.

2. TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS E GESTÃO DE LAMAS DE ETAR: REVISÃO TEÓRICA

2.1. Processo de tratamento de águas residuais: fase líquida e fase sólida

As águas residuais têm origem em vários tipos de atividades antropogénicas, sendo uma mistura de efluentes urbanos e industriais a que se podem juntar águas pluviais, subterrâneas e superficiais. As águas residuais urbanas têm uma composição maioritariamente orgânica, já as águas residuais industriais, para além de possuírem uma elevada carga orgânica, podem incluir componentes de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos de petróleo (das indústrias petroquímicas), ácidos, bases e compostos tóxicos (das indústrias agroalimentares), forte coloração derivado de corantes (das indústrias têxteis), solventes e outros reagentes (das indústrias farmacêuticas), crómio, taninos, óleos, resinas e detergentes (das indústrias de curtumes).

Estas águas têm que ser tratadas antes de serem descarregas em meio hídrico, para não causarem problemas de eutrofização e contaminação química, devido à elevada concentração de nutrientes e de compostos químicos respetivamente, e poderem conter microrganismos patogénicos e formar gases de odor desagradável. O tratamento de águas residuais tem como objetivo de produzir um efluente líquido inofensivo, que não prejudique o ecossistema recetor.

No tratamento de águas residuais são utilizados diferentes processos físicos, químicos, biológicos, correspondentes às diversas etapas de tratamento do efluente. Os processos físicos incluem a gradagem para retirar os grosseiros, a filtração e a sedimentação, os processos químicos envolvem a desinfecção, precipitação e outro tipo de processos. Quando aos processos biológicos estes são responsáveis pela degradação da matéria orgânica e remoção de nutrientes através da atividade microbiana.

De um modo geral o tratamento de águas residuais divide-se em quatro fases: (1) pré-tratamento, (2) tratamento primário, (3) secundário e (4) terciário. Em função da sequência do tratamento que o efluente residual sofre na ETAR, vão-se formando subprodutos indesejáveis, nomeadamente as lamas primárias e as lamas secundárias (biológicas), que necessitam de tratamento de modo a reduzir o seu volume e serem estabilizadas.

Na Figura 2.1 apresenta-se um diagrama esquemático de uma linha de tratamento convencional de águas residuais urbanas, com as diferentes etapas do tratamento da fase líquida e da fase sólida.

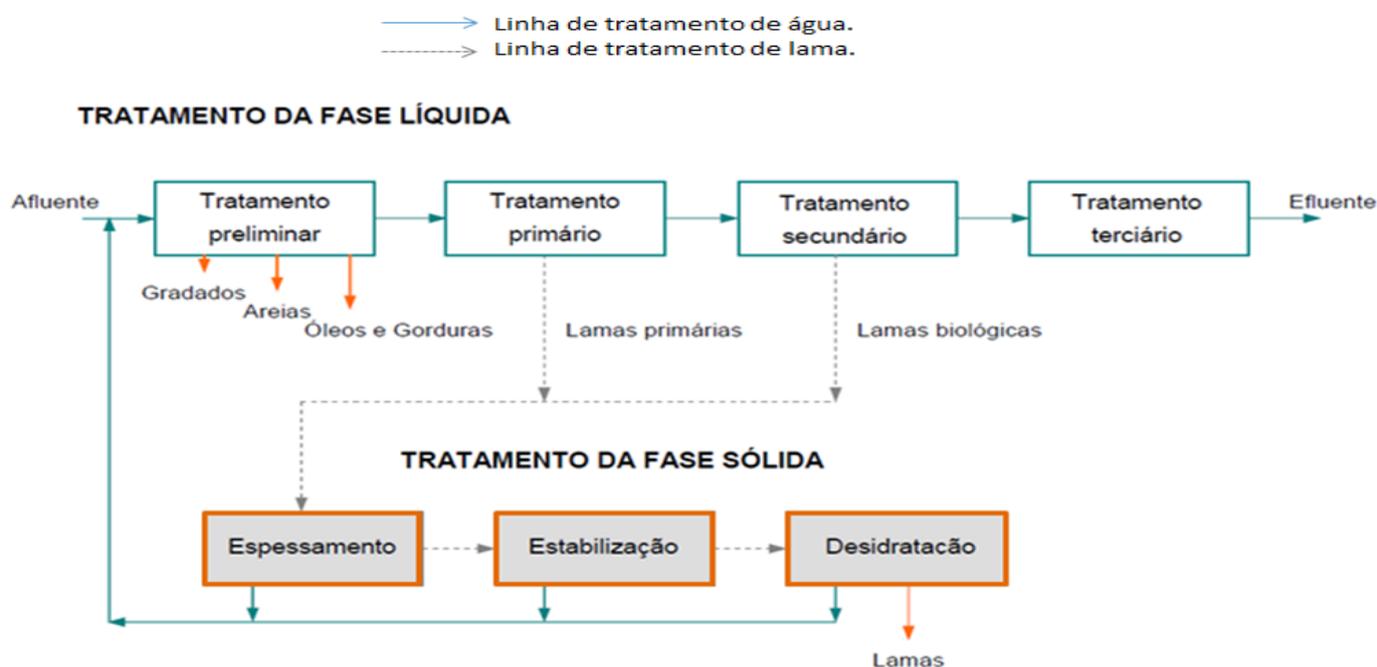


Figura 2.1 - O diagrama esquemático de uma linha de tratamento convencional de águas residuais urbanas (Montes 2010).

O tratamento primário é feito em sedimentadores primários e tem como objetivo a remoção de sólidos e matéria orgânica suspensa, através do processo de sedimentação. A remoção das partículas flutuantes é realizada à superfície do tanque e os sólidos suspensos sedimentáveis são recolhidos no fundo do tanque e são designados de lamas primárias. Esta etapa, quando se trata de efluentes urbanos, tem uma eficiência de remoção de 50 a 70% dos sólidos em suspensão total (SST) e de 25 a 40% da carência bioquímica de oxigénio (CBO5) (Metcalf e Eddy, 2003). Sempre que se adicionam produtos químicos, no sentido de aumentar a capacidade de sedimentação dos sólidos, designa-se por tratamento primário avançado.

O tratamento secundário consiste na remoção da matéria orgânica por processos biológicos (com formação de biomassa microbiana, por processos que podem ser aeróbios ou anaeróbios) seguidos de processos físico-químicos. Esta etapa é muito importante pelo facto de remover a maior parte da matéria orgânica e sólidos suspensos. Nos processos de tratamento secundário por via aeróbia, a degradação da matéria orgânica é realizada na presença de oxigénio e pode ser realizada em sistemas com biomassa suspensa, como é o

caso das lamas ativadas, reatores descontínuos sequenciais e sistemas de biomassa aeróbia granular, ou em sistemas com biomassa fixa, como é o caso dos leitos percoladores e dos sistemas de discos rotativos. A população microbiana pode desenvolver-se no reator na forma dispersa (biomassa suspensa) ou fixa a um material de suporte, como areia, pedra ou plástico (biomassa fixa).

O tratamento terciário permite aumentar a eficiência do tratamento, com a remoção dos sólidos em suspensão, o carbono, o azoto, o fósforo e alguns poluentes que ficaram no efluente depois ter passado pelos tratamentos antecedentes. Este tratamento não é realizado em todas as ETAR, depende do que se pretende remover, e passa por processos e operações unitárias, como a desinfecção por meio de radiação ultravioleta e nalguns casos também por sistemas de ozonização. Os processos e operações usadas dependem do que se pretende remover do efluente, podendo ser utilizada precipitação química, osmose inversa, filtração, adsorção em carvão ativado, permuta iónica, desinfecção, entre outros. A fase de desinfecção pode ser realizada com adição de reagente químico - cloro livre, ou por radiação ultravioleta (UV), entre outros.

Na ETAR, as lamas geradas no tratamento da fase líquida são sujeitas ainda ao tratamento da fase sólida. Este tratamento inclui: espessamento, estabilização, condicionamento e desidratação. Segundo Metcalf e Eddy (2003), o tratamento da fase sólida em algumas ETAR começa nas operações preliminares que têm como objetivos: (1) trituração para diminuição de tamanho e desintegração do material filamentosos impedindo o risco de obstrução ou entupimento dos equipamentos; (2) gradagem com a separação de areias, através da aplicação de estruturas cilíndricas por meio da aplicação de forças centrífugas, onde as partículas mais pesadas se movem para o lado de fora da secção cilíndrica e as lamas são descarregadas por uma saída lateral; (3) mistura para homogeneização das lamas primárias e secundárias, que pode acontecer em tanques de mistura (misturas homogeneizadas (caso de lamas mistas) aumentam a eficiência de alguns processos posteriores como por exemplo a desidratação); (4) armazenamento, que permite corrigir as flutuações na produção de lamas, garantindo um caudal de lamas a tratar mais ou menos uniforme aos processos subsequentes (um armazenamento superior a 3 dias provoca a deterioração das lamas, com a libertação de odores desagradáveis e prejudica a sua desidratação).

O tratamento de espessamento de lamas é um processo físico e pode ser feito por espessamento gravítico, flotação por ar dissolvido, mesas de espessamento ou tambor rotativo. O objetivo do espessamento das lamas é a diminuição do volume de lamas e a concentração dos sólidos, de modo a reduzir os custos de transporte e eventuais operações subsequentes. Este tratamento permite obter lamas com um teor de sólidos entre 0,8 e 4%, o que equivale a reduzir o volume de lamas a cerca de 1/5 do valor inicial.

A estabilização (ou higienização) de lamas tem como objetivo reduzir o teor de organismos patogénicos e de odores, de modo a evitar efeitos nocivos no caso da sua aplicação em solos. Os métodos usados na estabilização de lamas são a estabilização química (alcalina) e a compostagem, ambas para lamas já desidratadas, e a digestão anaeróbia e digestão aeróbia para lamas espessadas. Destes, o método mais usado é a digestão anaeróbia, em que microrganismos anaeróbios degradam a matéria orgânica, em bioreatores. A produção de biogás que resulta da digestão anaeróbia é usada para produção de energia térmica e/ou elétrica, contribuindo para a redução dos custos do processo.

Depois destes processos, as lamas apresentam ainda um elevado teor de humidade. A desidratação das lamas, que surge na final da linha do tratamento da fase sólida na ETAR, tem como objetivo reduzir a humidade e o volume para facilitar o transporte. A desidratação pode ser concretizada usando dois tipos de processos: natural ou mecânico. Os processos naturais incluem: evaporação e percolação em leitos de secagem. Nos processos mecânicos são usados equipamentos como centrifugas, filtros de prensa ou filtros de banda, entre outros. Esta última etapa de tratamento da fase sólida pode reduzir o volume final das lamas em 90%. A Tabela 2.1 resume as fases e os métodos mais usados no tratamento de fase sólida na ETAR.

Em ETAR urbana, as lamas primárias são formadas por sólidos inorgânicos e orgânicos, como sólidos fecais, produtos de utilização sanitária e medicinal, papel e desperdícios de cozinha, que não ficaram retidos nos tratamentos preliminares. Geralmente estas lamas são de cor cinzento-escuro, tem elevada viscosidade, são fibrosas e com grumos e apresentam um odor fortemente desagradável, associado à putrefação, e possuem entre 5 a 8 % de sólidos, dependendo da sua origem.

Tabela 2.1 - Resumo das fases e métodos de tratamentos da fase sólida nas ETAR (adaptados de Silva, 2015 e de Lopes, 2016)

Fase	Métodos	Características
Tratamentos preliminares	Trituração	Redução do tamanho de partícula
	Gradagem	Remoção de materiais fibrosos
	Desarenamento	Remoção de areia
	Mistura	Homogeneização dos fluxos sólidos
Espessamento	Gravidade	Sedimentação de partículas pela ação da gravidade
	Flotação	Injeção de ar no material. Partículas sólidas juntam-se às partículas de ar, ficando com uma densidade inferior à da água, sendo arrastadas para a superfície.
Estabilização	Compostagem	Degradação da matéria orgânica por microrganismos aeróbios, produzindo um composto humificado.
	Digestão anaeróbia	Degradação da matéria orgânica na ausência de oxigénio. Tem a vantagem de produzir biogás. No entanto, é um processo caro e com muitas vulnerabilidades.
	Estabilização química	Adição de compostos, como a cal. Garante a higienização da lama, aumentando a sua temperatura e pH. Reduz os maus cheiros e pode precipitar metais pesados.
Desidratação	Leitos de secagem	Evaporação natural da água.
	Centrifugação	Separação da fase líquida da fase sólida por ação centrífuga. Promove também o espessamento da lama.
	Filtros de prensa	Extração da fase líquida, através de telas filtrantes que retêm a fase sólida.

As lamas secundárias (ou biológicas) são basicamente formadas por sólidos biológicos que resultam da degradação da matéria orgânica, podendo produzir-se:

- lamas biológicas resultantes do processo de lamas ativadas, constituídas por sólidos sintetizados e microrganismos floculados. Estas lamas apresentam uma textura lisa e homogénea. Quando submetidas a espessamento, a cor varia entre o castanho-escuro e o cinzento. É comum terem menos de 1,5% de sólidos;

- lamas biológicas geradas por sistemas de biomassa fixa (biofilme), formadas por fungos e bactérias que se desprendem do material de suporte do biofilme. Exibem uma cor castanho-escura e é comum apresentarem entre 1 a 2% de sólidos.

As lamas terciárias são formadas pela fração de lamas secundárias que não foram extraídas nos sedimentadores secundários e pelas lamas originadas na remoção de azoto e fósforo, através processos físico-químicos. As lamas terciárias não representam uma grande porção na quantidade total de lamas produzida numa ETAR. A maior produção é de lamas primárias e secundárias, estando o volume condicionado à composição das águas residuais, eficiência do tratamento primário e tipo de tratamento secundário.

Qualquer que seja o tipo de lamas produzida na ETAR existe necessidade de diminuir o seu teor em água e o seu volume, obter a estabilização da matéria orgânica de forma a reduzir os efeitos adversos, evidenciados pelos maus cheiros e presença de agentes patogénicos perigosos à saúde pública. Como as lamas possuem matéria orgânica e nutrientes (fósforo, potássio e azoto) é fundamental um tratamento complementar de modo a favorecer a sua valorização agrícola, ou energética, no caso de não poderem ser valorizadas dessa forma e apresentarem um poder calorífico relativamente elevado. No caso de lamas conterem metais pesados a sua aplicação nos solos fica condicionada aos valores limite estabelecidos pela legislação.

2.2. Características e composição das lamas de ETAR

As características e composição química das lamas de depuração variam em função da composição das águas residuais de origem e das tecnologias de tratamento aplicadas. As lamas de ETAR integram na sua composição substâncias orgânicas, minerais de natureza diversa e diferentes microrganismos. A Tabela 2.2 apresenta os principais descritores usados para a sua caracterização e valores típicos de uma lama de depuração tratada e não tratada.

Tabela 2.2 - Valores típicos de uma lama de ETAR tratada e não tratada (adaptado de Metcalf e Eddy, 2003).

Item	Lamas Primárias Não Tratadas		Lamas Primárias Digeridas		Lamas Ativadas Não tratadas
	Gama	Valor típico	Gama	Valor típico	Gama*
pH	5,0 – 8,0	6,0	6,5-7,5	7,0	6,5 – 8,0
Sólidos totais (MST, %)	5,0 – 9,0	6,0	2,0 – 5,0	4,0	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 – 4,0	2,5	1,6 – 3,0	3,0	2,4 – 5,0
Fósforo (P ₂ O ₅ , % de MST)	0,8 – 2,8	1,6	1,5 - 40	2,5	2,8 - 11
Potássio (K ₂ O, % de MST)	0- 1,0	0,4	0 – 3,0	1,0	0,5 – 0,7
Ferro	2,0 -4,0	2,5	3,0 – 8,0	4,0	-

n.d. (não determinado)

Da análise de Tabela 2.2 verifica-se que o teor de sólidos totais (MST) é o parâmetro que apresenta maiores diferenças para os três tipos de lamas apresentados, com uma diminuição do valor de MST das lamas primárias para as secundárias. Os elevados teores de sólidos voláteis, indicam a quantidade de matéria orgânica existente nas lamas. No caso de lamas de depuração procedentes de águas residuais industriais podem existir metais pesados com concentrações elevadas.

As lamas de ETAR incorporam materiais orgânicos e inorgânicos, nutrientes, microrganismos, metais pesados e alguns poluentes. Em geral as quantidades de substâncias tóxicas, bactérias e vírus presentes nas lamas que saem da ETAR devem ser relativamente baixas para evitar riscos de saúde pública e danos no meio ambiente quando são encaminhadas para o destino final. A matéria orgânica (sob a forma de carbono) e os nutrientes (azoto, fósforo, potássio e em porções mais reduzidas, cálcio, enxofre e magnésio) são elementos fundamentais para a sua valorização. De uma forma mais detalhada são evidenciadas as características associadas à matéria orgânica, nutrientes, metais pesados, microrganismos patogénicos e contaminantes orgânicos.

Matéria orgânica

A matéria orgânica nas lamas contém aproximadamente 50% da matéria seca e é normalmente composta por aminoácidos, hidratos de carbono e pequenas quantidades de proteínas e lípidos. Podem existir ainda uma quantidade mínima de lenhina e de celulose. A matéria orgânica inclui uma fração significativa do carbono. Cerca de 60% da matéria orgânica é facilmente biodegradável (Tavares, 2007).

Nutrientes

O fósforo (P), azoto (N) e potássio (K) são os nutrientes que aparecem em maior quantidade nas lamas, relativamente os outros nutrientes como cálcio (Ca), magnésio (Mg), ou enxofre (S), havendo ainda micronutrientes como ferro (Fe), manganésio (Mn), molibdénio (Mo), boro (B), cobalto (Co). Estes nutrientes são considerados potenciais para a valorização das lamas em solos agrícolas. As concentrações de nutrientes modificam-se com o tipo de tratamento das águas residuais e com o tratamento das lamas. Em alguns casos o azoto aparece nas lamas sob formas inorgânicas, designadamente amónia (NH₃) e nitrato

(NO₃) e sob formas orgânicas, agregadas em grande parte à matéria sólida. O fósforo na forma mineral pode representar 30 a 80% do fósforo total (Carvalho, 2002).

Segundo Carvalho 2002, as concentrações destes nutrientes variam conforme os tipos de tratamento que a lama é sujeita ao longo do processo. Nutrientes tal como, ferro, magnésio, e cálcio juntam-se, como o azoto, aos sólidos das lamas gerando compostos insolúveis. No caso de sódio e potássio, que são nutrientes solúveis em água, se não for feito tratamento terciário (como as suas concentrações nas lamas não são elevadas) estes vão permanecer no efluente líquido descarregado.

Metais pesados

Os metais pesados mais significativos nas lamas são geralmente: cobre (Cu), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e zinco (Zn), cádmio (Cd), crómio (Cr), chumbo (Pb), particularmente originários de efluentes de indústria e devem ser considerados nos pedidos de análise por serem perigosos (Carvalho, 2002). Na Tabela 2.3 são apresentadas, para efeito de comparação, as diferenças de concentrações de metais pesados entre lamas resultantes de águas residuais urbanas e lamas de águas residuais urbanas e industriais.

Tabela 2.3 - Concentração de metais pesados em lamas referentes a águas residuais urbanas e águas residuais urbanas & industriais, (Sleeman (1984), citado em Tavares, 2007).

Águas residuais	Concentrações de metais pesados (mg/kg)						
	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb	Hg	Cr
Urbanas	1031	505	62	10	431	4	107
Urbanas + Industriais	1807	881	144	21	731	6	712

Tendo por base os resultados da Tabela 2.3 constata-se que a mistura de efluente industrial faz aumentar a concentração de metais pesados presentes nas lamas. No caso do Cr esse aumento é bastante significativo e deverá resultar da descarga de efluente da indústria de curtumes. Para os outros elementos o aumento é sensivelmente semelhante, atingindo entre 50 e 132%.

Microrganismos patogénicos

As lamas residuais com microrganismos patogénicos ao serem aplicadas na agricultura podem levar à poluição dos cursos de água, colocando em causa a saúde pública. As concentrações de bactérias, protozoários, fungos, vírus e vermes presentes nas lamas podem aumentar quando as lamas sofrem tratamento biológico (Metcalf e Eddy, 2003). O facto dos microrganismos patogénicos terem elevada capacidade de sobrevivência em diversas condições não ajuda na sua remoção (Carvalho, 2002).

Contaminantes orgânicos

Segundo Tavares (2007) estes compostos são tóxicos, persistentes e possuem tendência para a bioacumulação, apresentando por isso um risco para a saúde pública e animal, no caso de entrada na cadeia alimentar. As consequências nocivas destes compostos nas lamas impedem a aplicação de lamas no solo, quando a concentração de compostos orgânicos na lama excede os valores limite estabelecidos na lei (em Portugal são fixados pelo Decreto-Lei nº 276/2009, alínea c) do nº 1 do artigo 12º). Os compostos orgânicos que exigem maior cuidado são as dioxinas, os compostos bifenilos policlorados (PCB) e os hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (PAH), que podem estar presentes na carne e no leite dos animais que consumiram plantas em solos onde foram depositadas lamas contaminadas.

Outros

A matéria inorgânica nas lamas inclui poeiras urbanas e industriais (areia e partículas de solos) e peças metálicas resultantes da erosão de tubagens. Os componentes provenientes de reagentes (sulfatos, fosfatos, sulfuretos óxidos, hidróxidos e silicatos) impedem o condicionamento das águas residuais e das próprias lamas (Tavares, 2007).

2.3. Gestão de lamas de ETAR

2.3.1. Transporte

O transporte das lamas é uma operação inevitável no processo de gestão de lamas de ETAR, podendo representar uma parcela significativa no custo total da gestão de lamas. O valor dessa parcela é influenciada pelas características e quantidade de lama produzida,

distância a percorrer entre o local de produção e destino final ou local de armazenamento e a flexibilidade de meios de transporte.

As lamas podem ser transportadas por bombagem, barco, comboio, camiões, ou combinação destes meios. O método de transporte depende da consistência e da quantidade de lamas a ser transportada.

O transporte por bombagem através de condutas, geralmente subterrâneas, é apropriado para grandes quantidades, se as lamas tiverem um teor de sólidos inferiores a 10%, mas tem elevados custos de instalação, de consumo de energia e de manutenção dos equipamentos (Metcalf e Eddy, 2003). O transporte ferroviário permite o transporte de elevadas quantidades elevadas, sem qualquer limitação em relação ao teor de sólidos, permitindo o transporte até longa distância. Contudo, este meio é pouco usado, uma vez que requer uma rede ferroviária apropriada e a criação de lugares fixos e adequados para recolha e entrega, implicando um elevado investimento inicial. Já o transporte por barco é adequado para transportar elevadas quantidades de lama para longas distâncias, sendo o custo de transporte por unidade de massa de lama transportada inferior aos outros métodos. Todavia, o custo de investimento é maior e a flexibilidade das rotas é menor. Pelas razões atrás referidas, o transporte por camião tem sido o método mais usado, por ter um mais baixo custo de investimento, permitir um elevado grau de flexibilidade e permitir gerir mais facilmente os pontos de recolha, mas tem o inconveniente de libertar maus odores pelos locais por onde circula o camião, se o teor de sólidos for baixo. Por isso, as lamas mais líquidas e não estabilizadas devem ser transportadas em camiões com recipientes herméticos. As lamas desidratadas ou estabilizadas podem ser transportadas em camiões com recipientes cobertos com lonas, devendo a zona de fecho estar coberta com borracha de modo a impedir perdas.

Em Portugal, de acordo com a Portaria n.º 335/1997 de 16 de maio, o transporte de lamas é acompanhado por uma guia de transporte Modelo A, onde consta numa declaração que especifica o resíduo transportado, a sua quantidade e destino, as características do veículo de transporte, devendo esta ser preenchida em triplicado para processamento e arquivo pelo produtor, operador e transportador das lamas.

2.3.2. Armazenamento

De um modo geral o armazenamento de lamas na ETAR pode acontecer à altura do espessamento, da digestão anaeróbia e aeróbia, da compostagem ou da secagem natural. Durante o armazenamento verifica-se uma evolução dos maus cheiros, devido a condições anaeróbias, podendo no entanto ser diminuído com a estabilização.

O armazenamento de lamas pode realizado em estruturas concebidas para esta função. De acordo com Tavares (2007), as lamas líquidas conseguem ser armazenadas em tanques de armazenamento, lagoas facultativas (processo natural onde o efluente entra por uma extremo da lagoa e sai pela outra. Ao longo este caminho, que pode levar vários dias, a lama sofre um processo de purificação), lagoas anaeróbias e lagoas arejadas de lamas com fundos e paredes ou taludes impermeáveis, de modo a evitar infiltrações e consequentes riscos de poluição dos lençóis freáticos. Em todos tipos de armazenamento há produção de odores desagradáveis.

Ainda, segundo Tavares (2007), no caso de lamas secas (teor de sólidos superior a 60%), as técnicas de armazenamento utilizadas são semelhantes à dos materiais sólidos, no caso de lamas semi-secas (teor de sólidos compreendido entre 15 e 60%), poder-se-ão utilizar lagoas de lamas secas, medas ou pilhas assentes sobre pavimentos impermeáveis para evitar a possível poluição das águas subterrâneas. Este último método é o mais apropriado, quando se quer armazenar as lamas desidratadas num longo período de tempo, devendo ser colocados num espaço coberto para evitar que as lamas vejam as suas características modificadas.

Em função do tempo de armazenamento designa-se:

- armazenamento de longa duração, se a retenção de lamas é superior a um mês;
- armazenamento de equalização, se a retenção de lamas não excede três dias;
- armazenamento de curta duração, se a retenção de lamas é menor que três a quatro semanas (Tavares, 2007).

2.3.3. Destino final

O conhecimento das características físicas e químicas das lamas é essencial para encontrar as soluções de tratamentos e de destino final mais adequados. Quando a valorização das lamas não é possível e a deposição em aterro é a única solução possível é

importante encontrar esse local de eliminação a nível regional para permitir reduzir os custos de transporte.

Em 2002, em Portugal, 60% das lamas de ETAR eram depositados em aterro e 30% eram valorizadas na agricultura, não sendo referido o destino dos restantes 10% (Costa,2003 citado por Mendes, 2014).

De acordo com vários trabalhos académicos (Sousa, 2005; Tavares, 2007; Berco, 2013) as soluções de destino final de lamas de ETAR podem passar pela:

- valorização agrícola, com aplicação direta ou indireta nos solos como corretivo dos nutrientes;
- aplicação nas bermas das estradas para recuperação e sementeira de taludes;
- aplicação em áreas florestas para recuperação de solos e/ou reflorestação;
- compostagem e/ou co-compostagem com resíduos sólidos urbanos (RSU);
- aplicação no recobrimento de aterros sanitários (recuperação paisagística);
- aplicação na construção civil para fabricação de tijolos ou cerâmica (com incorporação até 20% de lama);
- combustão e co-combustão para a produção de energia ou por incineração e/ou co-incineração (incorporação no cimento);
- deposição em aterro sanitário.

Valorização na agricultura

As lamas de ETAR possuem nutrientes (fósforo, potássio e azoto) que são essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, o que faz com que a utilização no solo seja de imensa importância para a melhoria das suas características biológicas, físicas e químicas, tornando os solos mais produtivos e férteis. Mas, a aplicação de lamas na agricultura está condicionado às características das lamas, profundidade do nível freático, topografia, características dos solos, proximidade a áreas críticas e acessibilidade. Para que as lamas possam ser utilizadas na valorização agrícola é essencial que o tratamento realizado permita cumprir todos os requisitos legais associados a esta prática.

O licenciamento para a aplicação de lamas de ETAR no solo para uso agrícola exige que parâmetros relativos aos compostos orgânicos, teor de metais pesados e microrganismos patogénicos estejam dentro de certos limites. Em Portugal, a utilização de lamas em solos agrícolas está sujeita a um Plano de Gestão de Lamas (PGL) aprovado pela

Direção Regional de Agricultura e Pescas (DRAP) territorialmente competente, com parecer favorável da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) e da Administração da Região Hidrográfica (ARH) territorialmente competentes, na zona que se quer aplicar lama (Nos anexos A e B são apresentados respetivamente os códigos LER de lamas que podem ser encaminhadas para valorização na agricultura e os plano de instrução do PGL). O Decreto-lei n.º 276/2009, de 2 de outubro é diploma que estabelece o regime de utilização de lamas de depuração em solos agrícolas, transpondo para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de junho, de forma a evitar efeitos nocivos para o homem, para a água, para os solos, para a vegetação e para os animais, promovendo a sua correta utilização. Os procedimentos de aplicação de lamas no solo, definidos pelo Decreto-lei n.º 276/2009, de 12 de junho podem ser consultados no Anexo A1.

No anexo I do Decreto-lei n.º 276/2009 de 2 de outubro são designados os valores limite de concentração de compostos orgânicos e dioxinas, nas lamas destinadas à agricultura, quando produzidas em ETAR urbanas que recebam águas residuais de outras origens, para além da doméstica (Tabela 2.4). São igualmente definidos os valores limite para a concentração de metais pesados nos solos recetores de lamas e das lamas para utilização na agricultura (Tabelas 2.5 e 2.4 respetivamente), e os valores limite para as quantidades anuais de metais pesados que podem ser introduzidos nos solos cultivados, com base numa média de dez anos (Tabela 2.6).

A adsorção de metais pesados pelas plantas é fortemente influenciada pelo pH do solo, levando à necessidade de adaptação dos valores limite de metais pesados ao pH do solo, como se pode observar nos valores limite da Tabela 2.5. A grande meta deste regime jurídico é regular a utilização de lamas de depuração na agricultura, permitindo a credibilização da operação de valorização de resíduos e a proteção ambiental das águas e dos solos e saúde pública.

Tabela 2.4 - Valores Limite de metais pesados, compostos orgânicos e microrganismos nas lamas destinadas à aplicação na agricultura (adaptado do Anexo I do Decreto-Lei nº 276/2009).

Parâmetros	Valores-limite	Unidades
------------	----------------	----------

Metais Pesados	Cádmio	20	[mg/kg ST]
	Cobre	1000	
	Níquel	300	
	Chumbo	750	
	Zinco	2500	
	Mercúrio	16	
	Crómio	1000	
Compostos Orgânicos	LAS	5000	[mg/kg ST]
	NPE	450	
	PAH	6	
	PCB	0,8	
	PCDD	100	[ng TEQ/kg ST]
	PCDF	100	
Microrganismos Patogénicos	<i>Escherichia coli</i>	< 1000	células/g de matéria fresca
	<i>Salmonella spp.</i>	Ausente	em 50 g de material original

LAS (alquilo benzenossulfonatos lineares); **NPE** (nonilfenóis e nonilfenóis etoxilados); **PAH** (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos); **PCB** (compostos bifenilos policlorados); **PCDD** (policlorodibenzodioxinas); **PCDF** (policlorodibenzofuranos)

Tabela 2.5 - Valores limite de concentração de metais pesados consoante o pH do solo (adaptado do Anexo I do Decreto-lei nº 276/2009).

Metais pesados [mg/kg ST]	pH≤5,5	5,5<pH≤7	pH>7
Cádmio	1	3	4
Cobre	50	100	200
Níquel	30	75	110
Chumbo	50	300	450
Zinco	150	300	450
Mercúrio	1	1,5	2
Crómio	50	200	300

Tabela 2.6 - Valor limite para as quantidades anuais de metais pesados que podem ser introduzidas nos solos cultivados, com base numa média de 10 anos (adaptado do Anexo I de Decreto-Lei n.º 118/2006 (kg /ha/ano).

Parâmetro	Cádmio	Cobre	Níquel	Chumbo	Zinco	Mercúrio	Crómio
Valor limite	0,15	12	3	15	30	0,1	4,5

Valores em kg /ha.ano.

Valorização energética

A valorização energética consiste na queima dos componentes orgânicos combustíveis das lamas. Este processo permite a destruição de substâncias perigosas e organismos patogénicos, transformando a lama em cinzas, conseguindo-se uma redução de 90% do volume inicial. As cinzas resultantes poderão ser parte integrante de alguns produtos, nomeadamente materiais de construção. Porém se existirem metais pesados essa possibilidade fica excluída. Para reter as partículas são usados atualmente filtros de mangas, em completo a scrubbers, onde a injeção de leite de cal é usada para neutralização de gases ácidos nocivos que se possam formar no decurso do processo de incineração.

Deposição em aterro

A deposição em aterro das lamas só deve ser executada no caso não ser possível a valorização, caso existam determinados metais pesados (como: cobre (Cu), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e zinco (Zn), cádmio (Cd), crómio (Cr), chumbo (Pb)) ou substâncias tóxicas.

2.3.4. Custos de tratamentos e destino final das lamas

Os custos mais significativos na gestão de lamas estão relacionados com os tratamentos, os quais serão tanto mais elevados quanto mais exigentes forem os requisitos quanto a qualidade do produto final, no caso da sua valorização.

Em 1999, segundo Hall, citado por Tavares (2007), a aplicação na agricultura e a deposição em aterro eram as opções de mais baixo custo, conforme mostra a Figura 2.2. Nesse estudo do final do século XX a incineração era a opção de custo mais elevado. Com o provável aumento das exigências relativamente aos limites autorizados para as lamas para aplicação na agricultura é provável um aumento dos custos da gestão, aproximando-os dos obtidos para outros tipos de tratamento.

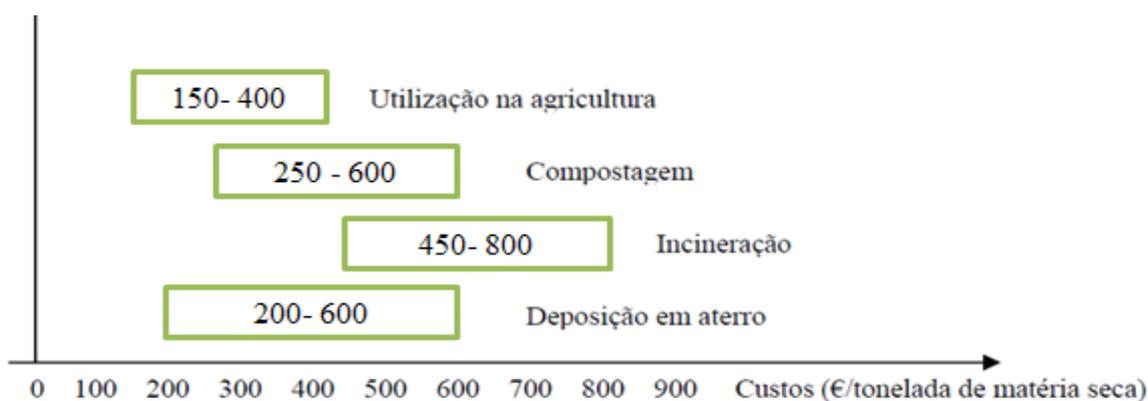


Figura 2.2 - Custos de tratamento e utilização/deposição final de lamas (Hall, 1999, citado por Tavares, 2007).

Num estudo realizado pela Comissão Europeia (EC, 2002), citado em Tavares 2007, a aplicação de lamas sólidas ou semi-sólidas na agricultura era a solução que apresentava um custo mais económico (110-160 €/tonelada de matéria seca). A valorização das lamas em compostagem, para aplicação das lamas na silvicultura e para a recuperação de terrenos apresentava custos intermédios (210-250 €/tonelada de matéria seca). A deposição de lamas em aterro, a incineração e a co-incineração eram as que apresentavam os custos mais altos (260-350 €/tonelada de matéria seca).

2.3.5. Comparação da produção de lamas urbanas e opções de destino final nos países da EU

Na Tabela 2.7, são apresentados os valores da produção de lamas urbanas, as que são encaminhadas para destino final e qual a repartição pelas soluções de destino final mais comuns. Na elaboração da referida tabela foi selecionado o ano de 2012, porque apesar de existirem dados para o ano de 2014, são escassos ou inexistentes para efeito de comparação, nomeadamente no caso de Portugal.

De acordo com os dados, em 2012, o país que gerava maior quantidade de lamas era a Espanha, com um valor superior a dois milhões de toneladas. A solução de tratamento preferida pela Espanha é aplicação na agricultura na correção de solos, correspondendo a metade das lamas produzidas, seguida pelo aterro, outros e a incineração. De acordo com os dados reportados a Espanha, Reino Unido, França, e Alemanha são os países com maior produção de lamas, sendo a Irlanda, Espanha, França e Reino Unido os Estados-Membros com maior percentagem de lamas aplicadas no solo agrícola (> 50%), enquanto a Alemanha

privilegia a incineração, embora a aplicação na agricultura atinja um valor bastante considerável. Na Alemanha não é permitido a deposição de lamas em aterro (Le Blanc et al., (2008), citado por Rei 2013).

Há semelhança da Alemanha, Holanda, e Áustria são países que privilegiam a incineração, encaminhando assim para valorização energética mais de 50% da sua produção. Na Holanda essa forma de valorização chega a cerca de 85% das lamas produzidas. Segundo Kelessidis e Stasinakis, (2012), também na Holanda é proibida a deposição de lamas em aterro. Na Grécia as lamas são encaminhadas predominantemente para aterro e incineração.

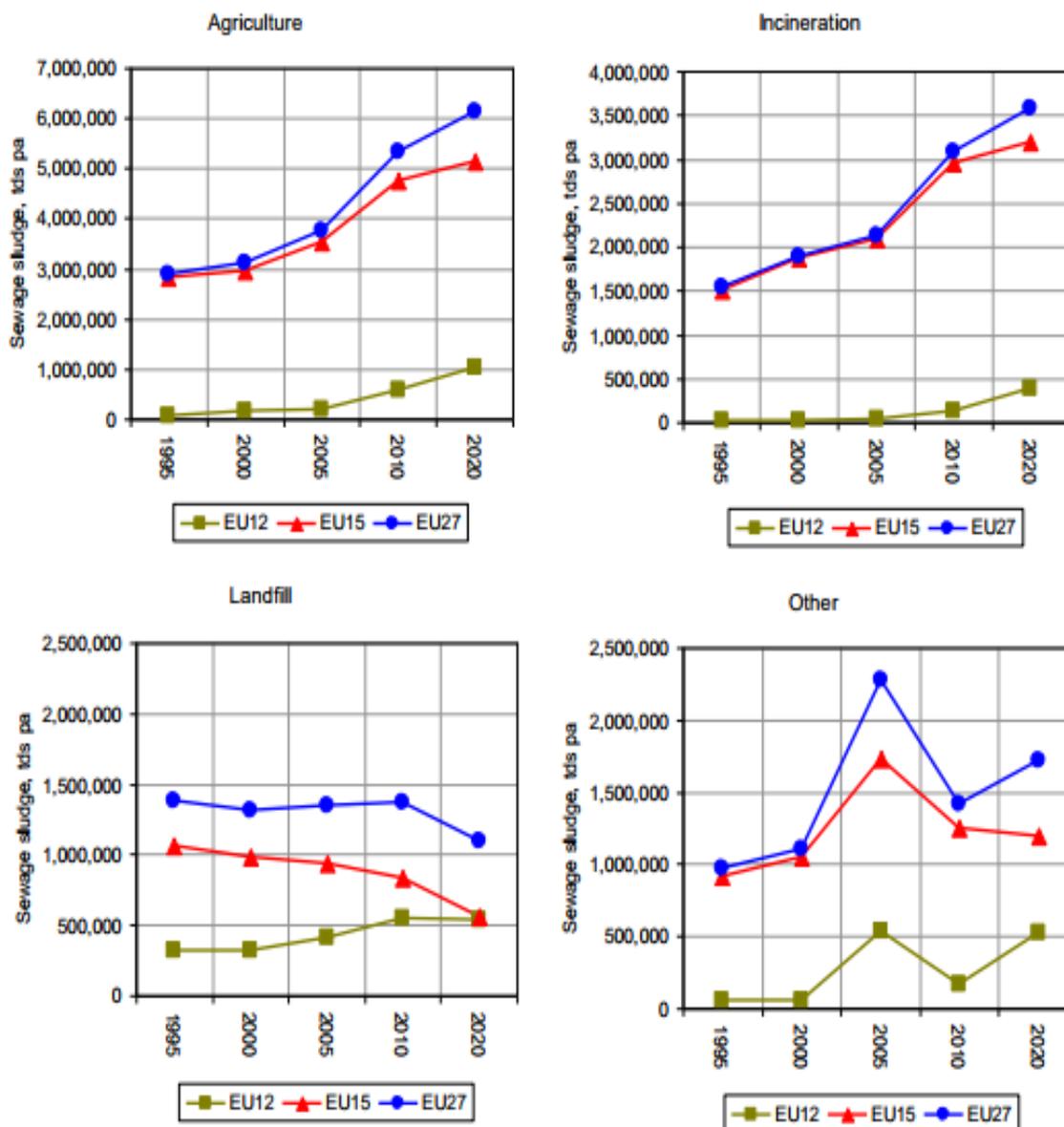
Tabela 2.7 - Produção de lamas urbanas e respetiva solução de destino final (adaptado do portal de estatística europeu, Eurostat, 2017).

Países Europeus	Produção de lamas (10 ³ t)	Destino total (10 ³ t)	Destino final				
			Agricultura	Compostagem	Aterro	Incineração	Outros
Alemanha	1848,9	1844,4	542	293,5	0	1008,8	0
Áustria	266,3	266,3	39,9	74,2	13,6	138,6	-
Bélgica	157,2	107,3	18,5	-	-	88,8	-
Bulgária	59,3	41,8	21,2	5,5	6,6	0	8,4
Chipre	6,5	6,5	2,8	0	0	0	3,8
Croácia	42,1 p	-	-	-	-	-	-
Dinamarca	141	114,9	74	-	1,4	33,8	5,6
Eslováquia	58,71	58,71	1,25	36,83	7,81	3,2	9,62
Eslovénia	26,1	25,7	0	1,9	1,1	13	9,7
Espanha	2756,6	2577,2	1921,7	-	383,9	100,5	171,2
Estónia	21,7	21,7	0,5	14,8	6,5	0	-
Finlândia	141,2	141,2	7,1	92,8	9,7	1,7	0
França	987,2	932,3	683,9	-	40,2	207,1	1,1
Grécia	118,6	118,6	14,2	0	40,3	39,4	24,8
Hungria	161,7	157,7	15,1	90,2	26,3	24,1	2
Irlanda	72,4	72,4	68,3	4,1	0	0	0
Itália	-	-	-	-	-	-	-
Letónia	20,1	18,1	7,5	2,1	0,2	0	8,3
Lituânia	45,1	18,2	6,3	11,9	0	0	0
Luxemburgo	7,7	4,7	3,6	-	0	0,7	0,5
Malta	10,4	10,4	0	0	10,4	0	0
Holanda	346,4	324,6	0	0	0	321,1	3,5
Polónia	533,3	533,3	115	33,3	46,8	56,6	281,6
Portugal	338,8	113,1	101,6	-	11,4	0,1	-
Reino Unido	1136,7	1078,4	844,4	-	4,7	228,9	0,4
República Checa	263,3	263,3	72,4	153,7	13,4	7,7	16,2
Roménia	85,4	48,4	2,2	1,3	43	0,4	1,4
Suécia	207,5	195,9	48,3	66,7	7,1	1,5	72,3

Segundo Kelessidis e Stasinakis (2012) a tendência nos países da União Europeia até 2020 será a valorização agrícola e a valorização energética, na forma de incineração. Nos países nórdicos, particularmente na Finlândia, Suécia, Dinamarca e também na Holanda, a valorização agrícola não deverá ter grande representatividade devido aos limites legais de metais pesados das lamas para utilização na agricultura serem muito restritivos.

Os dados disponíveis sobre Portugal em 2012 mostram uma diferença bastante significativa entre a produção de lamas e o que é encaminhado para destino final. O destino final privilegiado é a aplicação na agricultura. Não há registo de incineração de lamas em Portugal. No Anexo C estão evidenciadas as diferenças entre os valores declarados pelos produtores e os operadores para os anos de 2012 e 2013.

Na Figura 2.3 apresenta-se a evolução de destino final de lamas na EU-12, EU-15 e EU-27 desde 1995 e a evolução prevista até 2020. Os valores reais anteriores 2008 e as previsões até 2020 mostram que a valorização na agricultura e a incineração continuarão no curto prazo a ser as opções privilegiadas e a deposição em aterro será cada vez menor.



tds pa - tonnes dry solids per annum

Figura 2.3 - Principais opções de destino final das lamas de ETAR na EU (Adaptado de <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/index.htm>, Comissão Europeia, 2008).

Nesses são dados relativamente o ano de 2008 da Comissão Europeia (<http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/index.htm>) aponta para que até 2020 nos países que integram a EU-15 haja uma estabilização na produção de lamas. Mas, nos países da EU-12, que integraram mais recentemente a EU-27 manter-se-á o crescimento da produção, muito por efeito do alargamento da rede de saneamento em alguns desses países.

3. ANÁLISE COMPARATIVA DAS CARACTERÍSTICAS DAS LAMAS DE ETAR URBANAS

3.1. Métodos de análise

A caracterização das lamas de ETAR urbana envolve a análise de parâmetros físicos, metais pesados. O ANEXO II do Decreto-lei n.º 276/2009, define os parâmetros, unidades e normas de referência para análise de lama para aplicação na agricultura.

Desses parâmetros a examinar fazem parte:

- Parâmetros agronômicos tais como: matéria seca, matéria orgânica, pH, azoto total, azoto nítrico e amoniacal, fósforo total, potássio total, magnésio total, cálcio total;
- Metais pesados tais como: cádmio, cobre, níquel, chumbo, zinco, mercúrio, crómio.

Na análise devem ser levados em consideração dois pontos importantes: amostragem e método de análise a usar.

— Amostragem:

- a)* As lamas são objeto de amostragem após tratamento e antes da entrega ao utilizador, devendo as amostras ser representativas das lamas produzidas;
- b)* As amostras devem ser recolhidas na época de maior produção de lamas ou após variações significativas da qualidade dos efluentes;
- c)* As amostras devem ser recolhidas em vários locais, a diferentes profundidades e horas, sendo posteriormente homogeneizadas antes de se proceder à sua análise.

— Métodos de análise a usar:

- a)* Os métodos de referência a utilizar na análise das lamas são os constantes das normas de referência (Anexo II do Decreto-lei n.º 276/2009);

b) A análise dos metais pesados (cádmio, cobre, níquel, chumbo, zinco, mercúrio e crômio) é efetuada após digestão com água – régia (ou seja, com uma mistura de ácido nítrico e ácido clorídrico);

- i. O método de referência dos metais pesados para a quantificação é a espectrofotometria de absorção atômica;
- ii. O limite de detecção para cada metal não deve exceder 10% do respectivo valor limite de concentração.

O pH do solo é qualificado de acordo com os intervalos indicadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação do solo de acordo com o pH (adaptado de INIAP, (2006) citado por Lopes, 2016).

Classificação		pH
Ácido	Muito ácido	≤ 4,5
	Ácido	4,6 - 5,5
	Pouco ácido	5,6 - 6,5
Neutro	Neutro	6,6 - 7,5
Alcalino	Pouco alcalino	7,6 - 8,5
	Alcalino	8,6 - 9,5
	Muito alcalino	> 9,5

O interesse em conhecer o pH do solo deve-se especialmente à sua influência decisiva no comportamento dos microrganismos e na disponibilidade dos nutrientes, como se pode observar na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Relação entre a disponibilidade de elementos e microrganismos em função do pH do solo (adaptado de INIAP, 2006 citado por Lopes 2016).

O azoto presente nas lamas de ETAR apresenta-se na forma de azoto mineral e azoto orgânico. A relação entre a quantidade de azoto orgânico e azoto mineral varia bastante com os processos de tratamento a que as lamas são submetidas, conforme mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - - Efeito do processo de tratamento das lamas sobre as formas de azoto nos biossólidos (Dias, 2004).

Processo de Tratamento	Estado físico	Azoto amoniacal % do azoto total	Azoto orgânico % do azoto total
Digestão anaeróbia	Líquido	60	40
Digestão anaeróbia	Líquido	25	75
Digestão anaeróbia e desidratação	Pastoso	25	75
Leito de secagem	Sólido	25	75
Secagem térmica	Sólido	10	90
Compostagem	Sólido	10	90

Segundo Dias (2004), a quantidade de azoto que uma determinada aplicação de biossólidos no solo deverá disponibilizar para as culturas dependerá da quantidade de azoto amoniacal dos biossólidos fornecido ao solo e da quantidade de azoto orgânico mineralizável durante o ciclo vegetativo das culturas.

Na análise das lamas são parâmetros importantes a humidade, teor de sólidos totais e teor de sólidos voláteis.

A humidade (H) é expressa pela Eq. (3.1) onde ($m_{inicial}$) é a massa inicial de lama, e (m_{seca}) é a massa seca.

O teor de sólidos totais, (ST), é determinada pela Eq. (3.2).

O teor de sólidos voláteis (SV) é calculado através da calcinação de amostras de massa, a massa final ($m_{calcinada}$). O teor de SV é obtido através da Eq. (3.3).

$$H [\%] = \frac{m_{inicial} - m_{seca}}{m_{inicial}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$ST [\%] = 100 - H [\%] \quad (3.2)$$

$$SV [\% ST] = \frac{m_{seca} - m_{calcinada}}{m_{seca}} \times 100 \quad (3.3)$$

3.2. Resultados e discussão

Na Tabela 3.3 apresentam-se os resultados da amostragem três tipos de lamas urbanas (classificadas com o código LER 190805), de ETAR localizadas em Portugal Continental, na região centro.

Os resultados permitem evidenciar as variações da lama numa mesma ETAR entre os anos de 2014 e 2016, observando-se variações significativas ao nível do pH e da concentração de metais pesados. Entre as três ETAR verificam-se variações significativas ao nível do azoto total, fósforo total e potássio total. O mesmo acontece com o teor de metais pesados, verificando-se nos anos mais recentes uma clara diminuição, em todas as três ETAR.

Tabela 3.3 - Características e composição das lamas de diferentes ETAR

Características/ Composição	Unidades	ETAR Urbana				
		ETAR 1		ETAR 2	ETAR 3	
		2014 -01	2015-01	2016-01	2016-02	2015-03
Matéria Seca	% (w/w)	19,7	15,9	26,1	30,4	13,6
Matéria Orgânica	% (w/w) m.s.	69,3	67,5	46,2	nd	81,9
pH		8,6	7,7	12	-	6,6
Azoto Total	% (w/w) m.s.	-	579000	40230	38000	15400
Azoto Amoniacal	% (w/w) a.o.	0,0028	0,167	0,104	-	0,102
	% (w/w) m.s.	0,14	1,05	0,4	-	0,75
Fósforo Total	mg/kg m.s.	18000	23000	13000	4700	15000
Potássio Total	mg/kg m.s.	2600	1600	2100	1100	5900
Magnésio Total	mg/kg m.s.	3800	4800	4000	1200	4100
Cálcio Total	mg/kg m.s.	20000	22000	120000	18520	13000
Cádmio	mg/kg m.s.	1,1	1	0,21	<1	0,94
Chumbo	mg/kg m.s.	150	240	58	23,1	29
Zinco	mg/kg m.s.	2000	2400	780	846,1	950
Mercúrio	mg/kg m.s.	1	2,2	0,86	0,16	0,78

n.d. - não determinado.

A análise das lamas das três ETAR foi feita de forma idêntica, conforme é requerido no Decreto-lei nº 276/2009, com o objeto de verificar se possuíam as características que lhes permite serem aplicadas em solos agrícolas, verificando também as quantidades dos nutrientes fertilizantes presentes nas lamas, especialmente o Azoto, Fósforo e Potássio.

A lama da ETAR 2 apresenta um teor de ST superior à lama de ETAR 3 e ETAR 1 (em 2015), devendo ter sido submetidas a um processo de desidratação mais eficaz ou completo.

Segundo Pires (2015), citado por Lopes (2016), para o digestor primário os intervalos de pH típicos variam entre 5,2 e 6,3 e para digestor secundário os valores típicos de pH variam entre 6,7 e 7,5. Para a ETAR 3, o valor de 6,6 (na classificação como neutro), encontra-se na média. Já os valores obtidos na ETAR 1 são altos, entre 7,7 e 12.

Alvarenga et al. (2015) estudaram vários tipos de lamas urbanas, tendo obtido valores de pH compreendidos entre 7,1 e 7,4 para lamas estabilizadas. Segundo estes autores, o valor de pH pode subir para 12 quando são misturadas cinzas, porque estas têm um valor muito elevado de pH (pH = 12,5).

Segundo Tchoubanoglous et al. (2014), a variação de Sólidos Totais nas lamas desidratadas situa-se entre 22 e 35%, quando se aplica a desidratação por centrifugação. Na ETAR 2, os resultados da análise indicam uma concentração de Sólidos Totais de 30,4% e uma baixa humidade, o que é revelador de um processo de desidratação mais eficiente.

Na ETAR 3 as lamas tem maior teor de Sólidos Voláteis, atingindo 81,9%, o que corresponde a um alto teor em Matéria Orgânica (MO), valor que está dentro de intervalo de 60 a 85% considerado aceitável por Tchoubanoglous et al. (2014). Face aos teores elevados de SV registados nas lamas das ETAR 1 e 3 a sua aplicação na agricultura como material corretivo a figura-se bastante favorável.

Relativamente à concentração de metais pesados e compostos orgânicos, existem diferenças nos valores, mas todas as lamas cumprem os valores-limite determinados no Decreto-lei n.º 276/2009. As lamas de ETAR 1 têm elevados teores de Zinco (Zn), mas cumprem o limite indicado e podem ser aplicados nos solos. Zinco e chumbo são geralmente os metais que surgem com níveis mais elevados, limitando a sua aplicação no solo agrícola (Smith, 2009a, citado por Alvarenga et al. 2015).

4. SECAGEM TÉRMICA DE LAMAS DE ETAR: ANÁLISE DE TECNOLOGIAS

4.1. Formas de humidade na lama de ETAR e sua repartição

A lama é um conjunto de matéria orgânica e inorgânica ligada, juntamente com uma elevada percentagem de água: 70-75% é água livre, 20-25% são água em flocos, e 1% na forma capilar e ligada (McGhee, 1991, citado em Werther e Ogada, 1999). Segundo Chen et al. (2002), a humidade na lama pode atingir um valor aproximado de 99%, apresentando-se a água sob diversas formas: água livre, intersticial, de superfície ou por ligação química/intracelular. Os tipos de água e distribuição na lama estão representados a Figura 4.1.

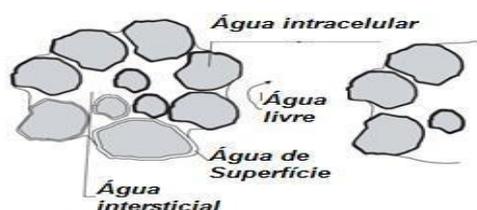


Figura 4.1 – Repartição da água na lama de ETAR (adaptado de Tsang and Vesilind, 1990, citado em Chen et al., 2002).

A água livre, move-se livremente, não está ligada a partículas de lama. Pode ser extraída por sedimentação gravitacional, sistemas mecânicos, por drenagem ou por evaporação. A água intersticial/adsorvida encontra-se dentro da parte sólida. Pode ser removida por forças mecânicas fortes ou pela aplicação de elevadas temperaturas ou seja requer grande quantidade de energia. A água de superfície está ligada nas superfícies das partículas sólidas por adesão e adsorção. A sua remoção requer uma quantidade de energia intermédia às anteriores. A água de ligação química está fortemente ligada às partículas sólidas e a sua remoção exige força mecânica.

Segundo Bennamoun et al., (2013), antes da aplicação da secagem térmica é muito importante proceder a desidratação mecânica das lamas para diminuir o custo desse

processo. Em média, neste processo consegue-se a uma redução de cerca de 5% do teor inicial de humidade do produto.

4.2. Relação da taxa de secagem com a humidade e estado físico da lama de ETAR

A secagem térmica descreve a remoção da água através da evaporação. A taxa de evaporação ou secagem depende do teor de humidade da lama, e segue a evolução que representada na Figura 4.2, para os três tipos de lamas considerados. Segundo esta figura, a secagem térmica apresenta duas fases: a primeira de taxa constante, a segunda de redução da taxa e no final um ligeiro aumento. Ao longo do período de taxa de secagem constante, é extraída a água livre. O período de redução da taxa de secagem corresponde à extração da água intersticial e terceiro período corresponde à remoção da água de superfície. O teor de humidade final retida no interior da lama corresponde à água de ligação química, e esse teor depende do tipo de lamas e condições de secagem.

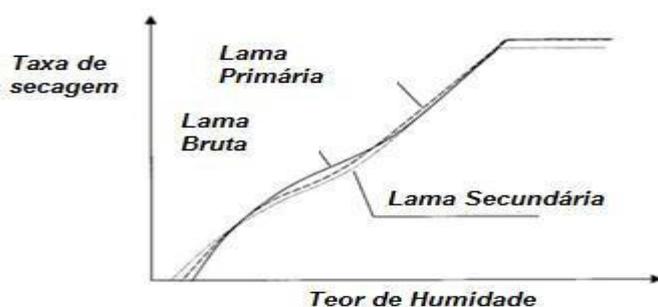


Figura 4.2 - Curvas de secagem para lamas de depuração (Adaptado Werther e Ogada, 1999).

Segundo Rei (2013), sempre que o teor de humidade é máximo, a taxa de evaporação é máxima e constante, correspondendo esse período à remoção da água livre. Após esta ter sido totalmente removida, a taxa de evaporação decresce, sendo removida a água intersticial, e posteriormente a de superfície.

Segundo Werther e Ogada (1999), os fenómenos muito relevantes são as mudanças físicas das lamas durante a secagem. A lama passa por três fases: (1) fase molhada (zona húmida), onde a lama é de fluxo livre e pode ser espalhada facilmente; (2) zona

pegajosa (zona adesiva), onde a lama é pastosa e não flui, e finalmente, a fase granular, onde a lama é frágil na natureza e mistura-se livremente (Figura 4.3).

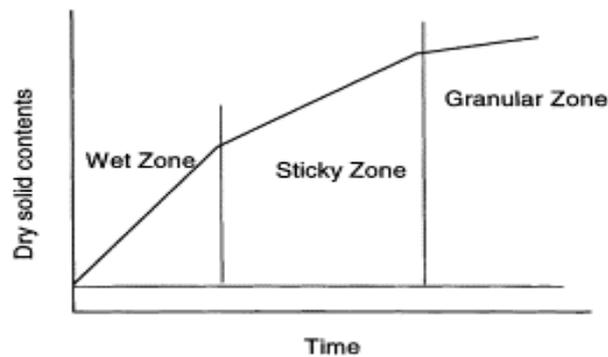


Figura 4.3 - As mudanças físicas durante a secagem de lamas (adaptado de Chen et al., 2002 e Werther e Ogada, 1999).

Segundo (Chen *et al.*, 2002) quando o teor de humidade alcança aos 50%, a lama modifica o seu estado físico, tornando-se numa pasta muito viscosa, com tendência a quebrar. Esta fase é denominada por zona pegajosa, sendo mais difícil manobrá-la na operação de secagem, devendo ser misturada com lama primária para facilitar a operação.

De acordo com Werther e Ogada (1999), nem sempre é possível fazer a secagem das lamas totalmente em uma única unidade por causa da zona adesiva (zona pegajosa). Para responder a este problema, têm sido desenvolvidos dois sentidos de secagem de lamas: (1) semi-secagem (secagem ao fim da zona molhada) e (2) secagem completa. A secagem completa é realizada em duas etapas, usando a técnica de retromistura, onde que as partículas finas de lama seca são pré-recicladas e misturadas com a lama desidratada de modo a atingir um teor de sólido, que vá para além da fase pegajosa (cerca de 60 a 65% em massa de matéria seca).

A curva de secagem é um dos elementos mais relevantes que proporcionam informações sobre o comportamento do produto durante a secagem, bem como a variação da humidade do produto com o tempo de secagem. Pode ainda observar-se fenómenos como encolhimento e fissuras na amostra.

Segundo Kemp *et al.* (2001), citado em Bennamoun *et al.*, (2013), o método mais adequado para a deteção de várias fases que a lama passa (dependente do método de secagem e das condições de operação) é a representação gráfica da taxa de evaporação em função do teor de humidade, conhecida pela curva de Krischer.

Segundo Silva (2015), a secagem a alta temperatura (superiores a 300 °C) deve ser cuidadosamente controlada para garantir que não há formação de dioxinas e compostos furanos. Muito embora a secagem térmica permita alcançar teor de matéria seca de 90 %, as necessidades de energia são muito superiores às da desidratação quando se compara o volume de água extraída, por isso secagem ocorre após uma fase de desidratação. As necessidades energéticas para a secagem podem ser reduzidas se na ETAR estiver disponível uma fonte de energia, por exemplo se houver produção de biogás.

4.3. Métodos de secagem de lamas de ETAR

Os métodos de secagem, quanto a transferência de calor e massa, podem ser organizados em:

- (a) Sistemas de secagem diretos;
- (b) Sistemas de secagem indiretos.

Há ainda sistemas combinados (diretos com indiretos).

De acordo com Farinha (2003), nos secadores diretos o fluido quente está em contacto direto com as lamas (secagem por convecção), enquanto nos secadores indiretos, a lama está separada do fluido por uma superfície intermediária (secagem por condução). Na Tabela 4.1 são apresentados alguns tipos de secadores diretos e indiretos.

Tabela 4.1 - Tipos de secadores diretos e indiretos (Adaptado de Farinha, 2003).

Secadores diretos	Secadores indiretos
Tambor rotativo	Camada fina
Leito fluidizado	Disco rotativo
Tapete	Pás rotativas
Atomização	

Entre os secadores diretos os mais típicos são os secadores de tambor rotativo, de atomização e de tapete. Os sistemas de secagem direta são os mais comuns,

correspondendo a mais de 85% dos secadores industriais (Ficza, 2010). Quanto aos secadores indiretos os mais comuns são: camada fina e disco rotativo.

O sistema de secagem indireta tem a vantagem de produzir quantidades mínimas de vapores com mau odor, sendo por conseguinte mais fáceis de gerir do ponto de vista do impacto junto da população na vizinhança (Hudson et al., 1996, citado em Chen et al., 2002). Como os secadores indiretos operam a temperaturas muito elevadas do que secadores diretos, e a taxa de secagem é normalmente menor do que para os secadores diretos.

Segundo Arlabosse et al. (2012), citado em Bennamoun et al. (2013), podem ser utilizados secadores de convecção, com aquecimento direto ou indireto através dos produtos da combustão de combustíveis fósseis, biogás, biomassa, ou por permutadores de calor ou por uma combinação dos dois equipamentos. Ainda segundo os mesmos autores, o consumo específico de energia muda de um secador para outro e varia de 700 kWh a 1400kWh por tonelada de água evaporada. A taxa de secagem específica varia de 0,2 kg.m⁻²h⁻¹ para um secador de atomização a 30 kg.m⁻²h⁻¹ para um secador de tapete.

Por forma a analisar os sistemas de secagem do ponto de vista do processamento, tecnologia adotada e eficiência são descritos alguns sistemas mais representativos dos métodos de secagem por convecção e por condução. São referidos ainda métodos que combinam a produção de energia térmica para a secagem com a cogeração e sistemas de secagem baseados no aproveitamento da energia.

4.4. Sistemas tecnológicos de secagem de lama de ETAR

4.4.1. Secagem de lama de secador de tambor rotativo

Segundo o Godinho (2009) e Berco (2013), o secador de tambor rotativo consiste num tambor cilíndrico em aço que roda sobre um eixo, com ou sem uma inclinação. A mistura de lama desidratada com lama seca reduz o teor em humidade do material à entrada para 30 a 50%, para ajudar a dispersão. A mistura de lama entra constantemente na tremonha do secador rotativo e contacta com os gases quentes da fornalha (estando estes a uma temperatura entre 260 e 480 °C). A mistura de gases quentes com lamas é conduzida, geralmente em co-corrente, até à zona final de descarga do secador. O transporte longitudinal da lama ao longo do tambor, faz-se pelo movimento de rotação das pás axiais ao longo da

parede interior do secador arrastando e soltando a lama ao longo do secador. Os gases de exaustão saem do secador com uma temperatura variável entre 65 a 105 °C e são conduzidos ao equipamento de tratamento de ar para remoção de partículas e odores. O transporte das lamas podem ser em co-corrente ou em contra-corrente conforme ao fluxo de gases quentes, geralmente a uma velocidade limitada 1,2 a 3,7 m/s. A Figura 4.4 representa um exemplar de secador de tambor rotativo de passagem única.

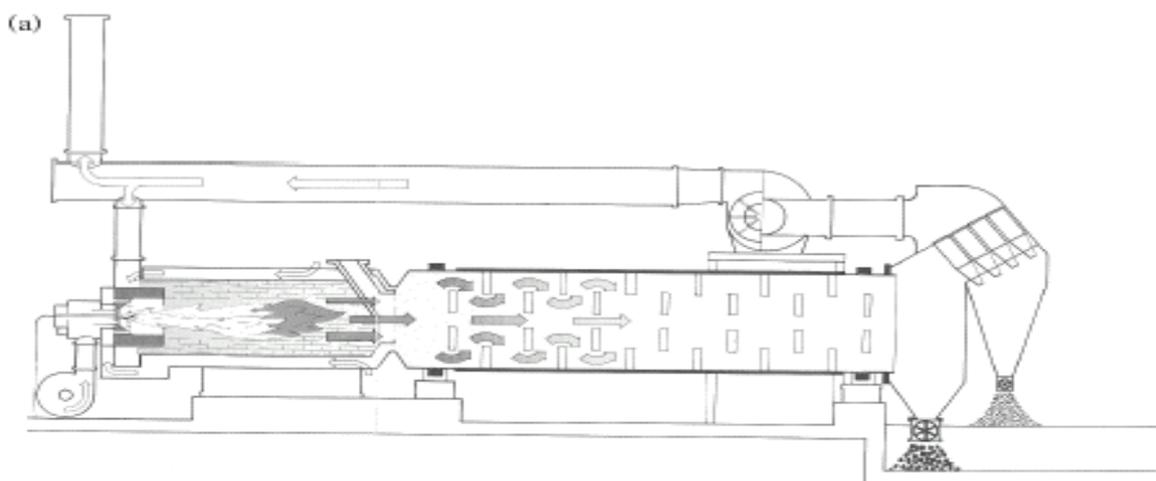


Figura 4.4 - Secadores de tambor rotativo: (a) de passagem única (Cortesia de Vandenbroek International BV) (Chen, 2002).

O secador de lama de tambor rotativo Haarslev, representado na Figura 4.5, é um sistema de secagem de passagem única, com sistema de granulação que gera um grão sem poeira apropriado para aplicação na agricultura e para ser usado como combustível. O sistema tem uma recirculação de gás de processo com um permutador de calor de condensação indireta exclusivo para diminuir o caudal de gases de exaustão enviados para o controle de odor.



Figura 4.5 - Secador tambor rotativa de passagem única (Haarslev, 2017).

O fluxo de ar quente é abastecido por um queimador a gás direto que geralmente atua com biogás e gás natural, e que gera elevadas temperaturas de entrada para aquecimento

superficial rápido e destruição imediata de agentes patogénicos. O secador de tambor rotativo é um secador de calor em cascata de ar quente direto, que seca a lama entre 90 a 95% de sólidos secos e tem um poucas de peças móveis, permitindo um menor desgaste, menor manutenção e uma maior vida útil. A recirculação de gás quente diminui o consumo de energia térmica.

4.4.2. Secadores de leito fluidizado

Segundo o Godinho (2009) e Berco (2013), o secador por leito fluidizado consiste numa câmara vertical estacionária, cujo fundo é perfurado para fazer a passagem dos gases quentes (normalmente o ar). A alimentação do secador com lama é realizada através de um orifício vedado ao ar. Os gases quentes entram de forma forçada na câmara de secagem por ação de compressores.

Este sistema permite uma boa mistura e contacto entre o gás e as partículas sólidas, originando numa elevada transferência de calor entre as fases sólida e gasosa. A lama seca é tirada do secador através de descarregador de superfície da câmara para uma tubagem adaptável, vedada ao ar. Os gases extraídos do processo vão para um separador ciclónico para tratamento ou para equipamento de controlo de poluição do ar.

4.4.2.1. Secador de lama com sistema combinado de leito fluidizado

Há sistemas disponíveis que usam sistema combinado de condução e convecção de calor. São exemplos os secadores de leito fluidizado apresentados na Figura 4.6. A alimentação e retirada da lama húmida do sistema de leito fluidizado, com poucas peças móveis, são feitas continuamente. As superfícies quentes de tubos de óleo térmico são responsáveis pela grande parte de calor usado para evaporar da água retida nas lamas. O ar aquecido de cerca de 85 °C transmite energia e garante que os grânulos de lamas permanecem num estado fluidizado para melhorar a transferência de calor entre o lama e a superfície do tubo quente (Figura 4.6a). Em alternativa por ser usado vapor sobreaquecido como mostra a Figura 4.6b. A lama húmida é alimentada para interior e é suspensa pela ação de sopro do vapor sobreaquecido injetado a partir de uma placa de base perfurada. A Figura 4.6c representa a combinação de secagem de lamas com a incineração de lamas. A secagem é alcançada a partir de uma mistura de lama húmida com areia aquecida num forno rotativo. A lama depois de seca é queimada num leito fluidizado de areia. O gás de combustão aquece

a areia no topo do queimador, e esta combinação vai aumentar eficiência energética e diminuir os odores gerados.

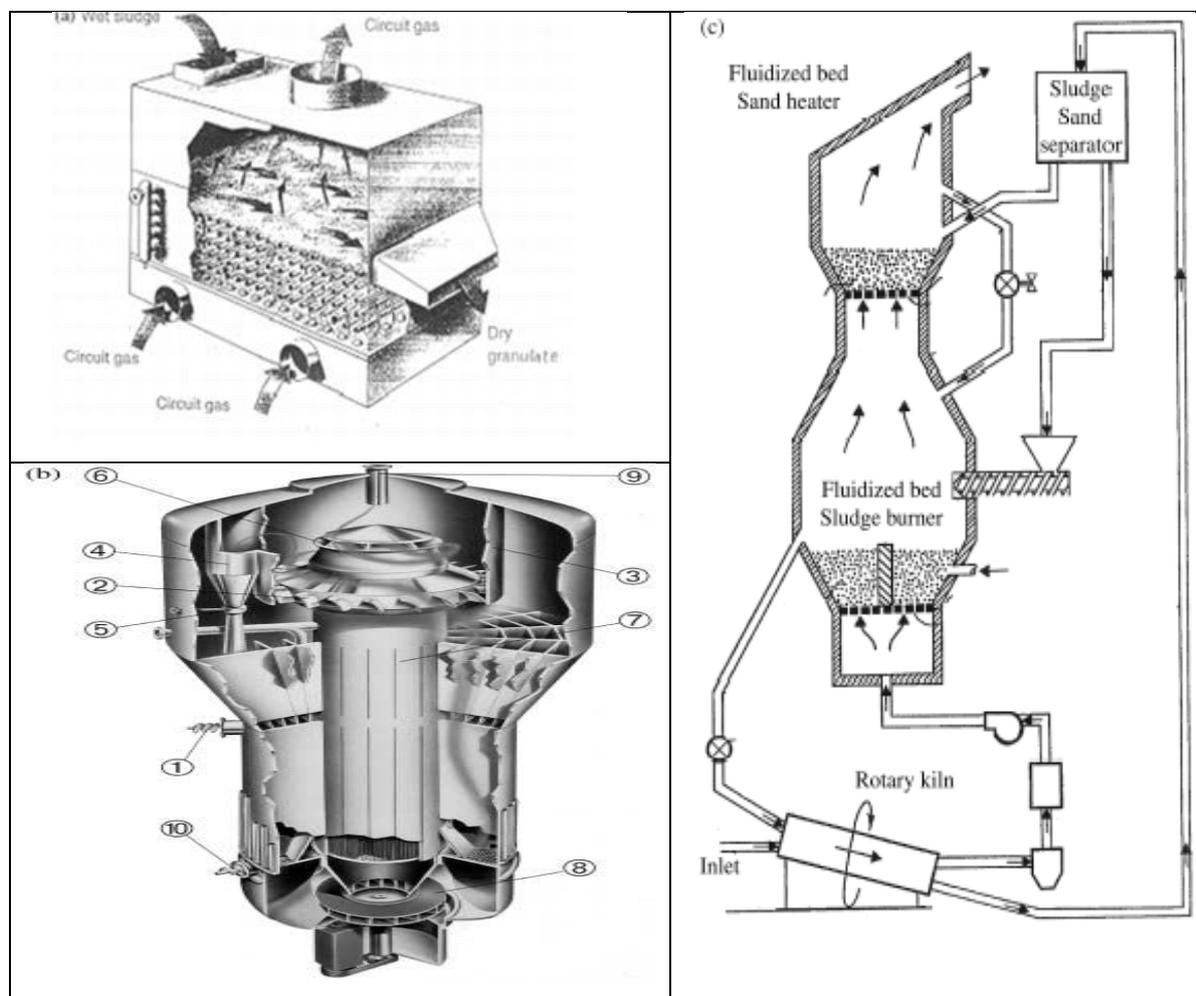


Figura 4.6 -Secadores de leito fluidizado: (a) com tubos de aquecimento; (b) com sobreaquecimento aquecimento a vapor, transportador 1-parafuso, lâmina 2-estacionária, 3-cilindro, ciclone 4-lado, 5-ejector, palhetas 6-estacionárias, 7-superaquecedor, 8-impulsor (Chen, 2002).

4.4.3. Secagem por atomização

O secador por atomização, também designado por secador “spray”, realiza a evaporação da água por secagem rápida com um gás quente. Esse processo de secagem é executado dentro da câmara, e sujeitado a uma corrente de ar quente controlada. Gás aquecido e lamas são misturados no interior do equipamento, realizando-se a secagem por contacto direto. Um ciclone no final separa o pó do vapor de água. O produto é atomizado através de um injetor ou disco na mesma direção ou em direção contrário ao fluxo de ar quente. Esse processo, além de controlar a humidade presente no produto, permite uma

rápida secagem, permitindo secar uma grande quantidade de produtos num curto intervalo de tempo. Mas tem que ter-se em conta que o teor de sólidos à entrada precisa ser baixo para não acontecer entupimento do injetor e possibilitar uma boa pulverização. A evaporação de água na lama varia consoante o equipamento instalado e o local onde se encontra. Na Figura 4.7 apresenta-se um secador de lamas por atomização.



Figura 4.7 - Secador de atomização (Sprayprocess, 2017).

Segundo Chen (2002), neste secador em forma de ciclone, uma corrente de ar aquecida é injetada a alta velocidade no cilindro, de tal forma que ela roda tangencialmente em torno de um eixo central. As lamas são alimentadas ao secador diretamente com o fluxo de ar em espiral, gerando um escoamento turbulento por rampas na parede do ciclone.

4.4.4. Secador de disco horizontal

Este tipo de secador possui uma estrutura cilíndrica em parede dupla, no interior circula um fluido de permuta de calor, vapor sobreaquecido ou óleo térmico. Contém ainda um rotor tubular ao longo do qual os discos ociosos estão ligados. As lâminas e as contra-lâminas existentes no estator e nos discos são responsáveis pelo deslocamento das lamas. O fluido de transferência de calor movimenta-se dentro do estator de parede dupla. A velocidade de rotação do rotor é baixa para proteger o secador de algum tipo de abrasão. Este tipo de secador não permite o movimento de lamas com o alto grau de secagem. Na Figura 4.8 apresenta um secador de disco.

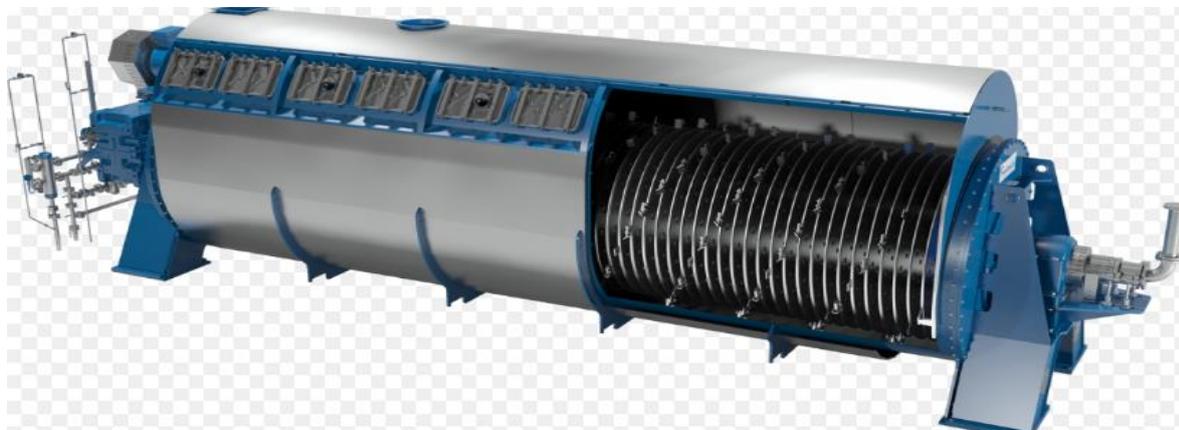


Figura 4.8- Secador de disco (Haarslev,2017).

4.4.5. Secador de discos rotativos

O secador de discos rotativos tem como objetivo aquecer, arrefecer, secar ou esterilizar materiais a baixa temperatura para diversas de diferentes usos. Pelo seu design este tipo de secador permite a auto-limpeza do próprio secador. O calor para a secagem é fornecido de forma indireta através da parede de condução. Na figura 4.9 apresenta-se a configuração de um secador de discos rotativos.



Figura 4.9 - Secador de discos rotativos (Dryingmachineschina, 2017).

No secador de discos rotativos o material é alimentado na câmara de secagem, logo depois o secador inicia a operação aquecendo e agitando a carga. O mecanismo de agitação é particularmente desenhado para aquecer regularmente todos os conteúdos e partir quaisquer aglomerados que possam formar-se. O tempo de secagem está sujeito ao teor de humidade e propriedades específicas da lama. A temperatura do eixo de alimentação, a velocidade de alimentação podem ser ajustadas para o alcançar o processo de secagem desejado. No final da operação, o secador utiliza um dispositivo de descarga do pistão accionado para rápido e eficiente esvaziamento da câmara de secagem. Os discos são

inclinados de maneira que quando a lama entra em contacto com a superfície, os grânulos vão escorregar facilmente. Este tipo de secador é referenciado como tendo elevada eficiência na operação, baixo nível de emissões, baixo consumo de calor, baixo custo de operação e uma vasta capacidade de aplicação.

4.4.6. Secador de lamas por tapete

O secador de lama por tapete consiste em dois ou mais tapetes organizados em cima uns dos outros, equipados com um sistema de tratamento do ar de exaustão. O fluxo de ar sobre as camadas de lamas é responsável pela eficiência secagem das lamas. As fontes de calor usadas para secagem de lama podem ser diversas, particularmente através do calor de exaustão das centrais termoelétricas, fábricas ou ETAR (Liz, 2017).

A tecnologia Andritz de secagem de lamas por tapete promove a granulação da lama desidratada com o produto seco num misturador à entrada do secador. De acordo com Liz (2017), na tecnologia Andritz as lamas húmidas são espalhadas sobre o tapete no secador, a partir de um módulo de alimentação e a distribuição de ar é feita uniformemente sobre as camadas de lamas no tapete no processo de secagem. Esta camada gera um filtro onde o ar flui sobre a camada de lamas, evitando o arrastamento de poeiras. Esta tecnologia funciona com baixa temperatura dos gases de secagem (<150°C) e permite baixo teor de poeiras no sistema, garantindo por isso uma operação segura.

Para a tecnologia Andritz são apontadas como vantagens: (1) uma estrutura simples e modular; (2) permitir a obtenção de grande quantidade de lamas secas de diversas qualidades; (3) ser muito económica, pois utiliza calor a baixa temperatura.

4.4.7. Sistema de secagem de lamas WATROMAT

Os sistemas de secagem WATROMAT são projetados e construídos pela Watropur, sendo um sistema de secagem por baixas temperaturas para secar lamas desidratadas por filtros de banda, centrífugas, filtros de prensa ou outros dispositivos idênticos. O bolo compactado é seco a partir da injeção de ar seco reciclado e quente. O ar saturado que deixa o topo do contentor de lamas é movimentado a partir de compressores de refrigeração, extraindo a humidade, e volta a ser aquecido antes de ser injectado no contentor. As emissões poluentes são baixas pelo facto do sistema ser fechado. Na figura 4.10 é mostrado a imagem e esquema do sistema de secagem de lamas WATROMAT.

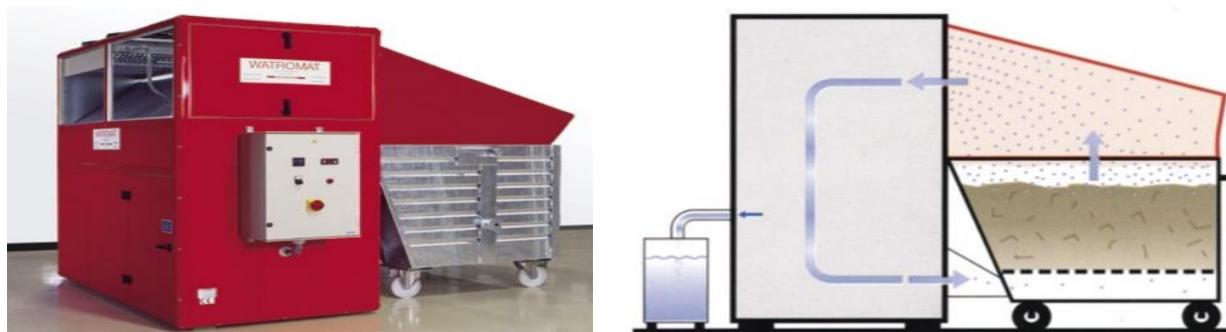


Figura 4.10 - Sistema de secagem de lama WATROMAT (Watropur, 2017).

Entre as características deste sistema são referidas: (1) baixa temperatura de operação (30 °C no máximo), (2) baixo grau de humidade a que as lamas são secas, de 10%; (3) baixa potência eléctrica (330 W/L de água evaporada); (4) uma construção robusta e a ausência de emissões para a atmosfera.

Segundo o fabricante este equipamento permite um rápido retorno do investimento, e o seu custo de operação é 50-70% menos do que os sistemas de secagem térmica convencionais, dispensa tratamento para as emissões de ar, os trabalhadores não precisam de protecção contra poeiras e vapores, são sistemas compactos. A linha do ciclo frigorífico alcança cargas de evaporação entre 2,5 a 1500 L de água por hora.

4.4.8. Sistema de secagem de lama a baixa temperatura (Evaporis LT)

O Evaporis LT é um sistema de secagem de lama a baixas temperaturas. Na figura 4.11 mostra-se um exemplar de secador Evaporis LT.



Figura 4.11 - Secador Evaporis LT (Suez's Degremont, 2017).

O Evaporis LT trabalha por convecção de ar quente (65/80 °C) em túnel fechado. Aceita lamas de ETAR urbanas e industriais. Aplica-se para lamas desidratadas com uma humidade máxima de 75%.

Esta tecnologia permite o controlo de odores e limita as emissões de gases de efeito estufa e permite ainda há recuperação de energia através do aproveitamento de energia de outros sistemas (sistemas de cogeração, energia residual entre outras) possibilitando uma redução de consumo de energia. Algumas vantagens referidas para o sistema Evaporis LT são o baixo custo de manutenção, sistema modular, sistema rápido e automatizado, e redução de consumo de energia primária.

4.4.9. Secagem térmica por turbo-secador (VOMM) com cogeração

A cogeração consiste na produção simultânea de energia elétrica e energia térmica, reservadas para o consumo próprio e não só, através de uma fonte de combustível (gás natural, fuelóleo, gás propano, biomassa ou resíduos industriais). O calor gerado pode ser usado diretamente no processo, como fonte de calor para a secagem térmica ou pode ser recuperado para aplicação em aquecimento de água, aquecimento de espaços entre outros (Godinho, 2009).

Segundo Berco (2013), o turbo-secador de tecnologia VOMM, faz parte dos sistemas de transferência de calor por condução, é um processo com o princípio de funcionamento muito complexo. Para obter uma secagem de 90% de matéria seca, através da secagem térmica a lama é transferida pelo doseador para o secador, de modo controlada e constante.

O turbo-secador VOMM mostrado na Figura 4.12 é constituído por um módulo cilíndrico horizontal com dupla carcaça, e no seu interior gira a turbina e circula o fluido de aquecimento. As lamas inseridas no secador são centrifugadas ao longo da parede quente e prosseguem continuamente em movimento turbulento sob a forma de uma camada fina. Para concluir a desidratação, é inserido um gás quente ao mesmo tempo no secador co-axialmente ao produto. Este secador é composto por um secador de camada fina combinado com secagem direta em ar quente, sendo uma junção de secagem por convecção e secagem por condução. O permutador de aquecimento dos vapores em circulação no circuito fechado é constituído por uma caixa constituída por dois conjuntos de tubos e alhetas onde circula o fluido de aquecimento (óleo térmico, 280 °C) e passa o gás a aquecer antes de ser

reintroduzido no secador. O circuito de óleo térmico é aquecido de duas maneiras complementares: mediante o recuperador de calor dos gases de escape dos motores de combustão interna e a partir das caldeiras de óleo térmico que usam biogás ou gás natural como combustível. As caldeiras possuem uma potência calorífica de 2,9 MW. Um tanque de recolha de óleo térmico do circuito numa posição inferior e uma bomba de transvaze para cada uma das duas linhas, permite a recuperação do óleo sempre que seja necessário executar operações de manutenção.



Figura 4.12 - Instalação integral do turbo-secador VOMM (Fonte: Cortesia ETAR da Guia, citado em Berco, 2013).

De acordo com Berco (2013), na saída de secador existe um ciclone que permite a separação ar húmido e produto desidratado. O produto seco, com 90% de matéria seca, é encaminhado para o aparelho de compactação (peletização). Para preservar uma pressão constante no circuito hidráulico, a água evaporada (vapor) é retirada do circuito fechado a partir de uma válvula de controlo para ser condensada na coluna de condensação. Logo na saída desta coluna, o ar é encaminhado pelo ventilador para a unidade de desodorização.

4.4.10. Secagem térmica integrada com cogeração

A produção simultânea de energia elétrica e energia térmica por cogeração, permite usar o calor a secagem térmica de lamas. Segundo Godinho (2009), no sistema de secagem térmica integrando com cogeração, conseguem-se aproveitar o calor libertado pelo arrefecimento dos moto-geradores (óleo, bloco e intercooler) e calor dos gases de escape. Quando as necessidades elétricas são superiores ou inferiores ao consumo, o excedente ou falta pode ser vendido ou comprado à rede elétrica. No dimensionamento do sistema de

coeração o aspeto determinante neste tipo de projetos é a potência térmica necessária para o processo de secagem. Na Figura 4.13 mostra-se um esquema do processo de funcionamento em coeração.

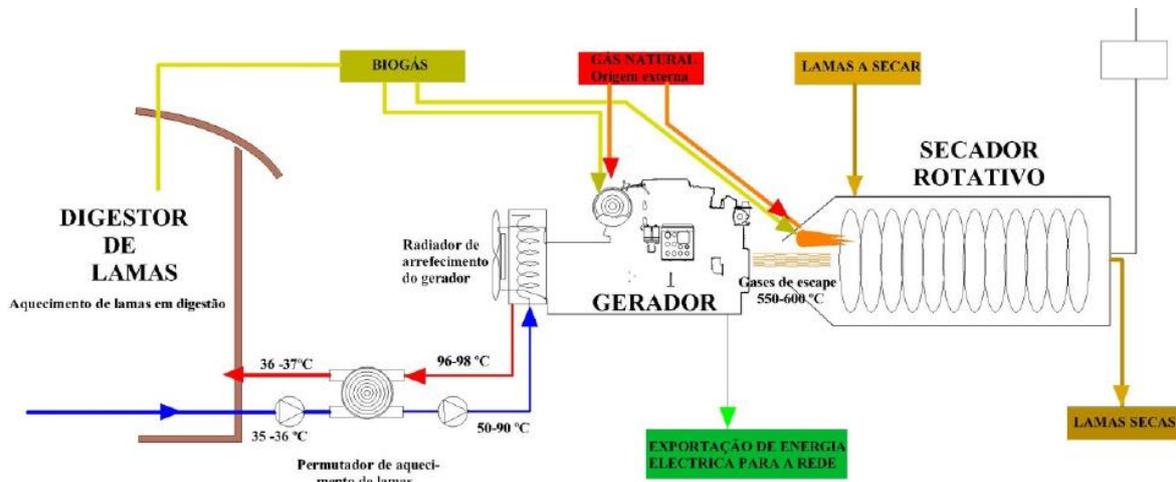


Figura 4.13 - Representação esquemática do processo de secagem térmica com cogeração (Godinho, 2009).

4.4.11. Secagem solar (Héliantis)

A secagem solar térmica Héliantis tem como principal fonte de energia o sol para aquecer e evaporar a água presente na lama e depois expulsá-la por ventilação. O processo de secagem é apoiado pelo revolvimento das lamas feito por uma máquina que varre longitudinalmente o leito de lamas facilitando a desidratação através da renovação da superfície de evaporação. Este sistema transforma lamas desidratadas num produto seco e granulado.

Este sistema de secagem possibilita a redução de 3 a 5 vezes do volume das lamas. O uso de energia solar para secagem de lama faz com que haja uma diminuição no consumo de energia de quase 10 vezes, em relação aos sistemas que usam fontes de energia convencionais. A secagem é realizada em estufa, como mostra a Figura 4.14.

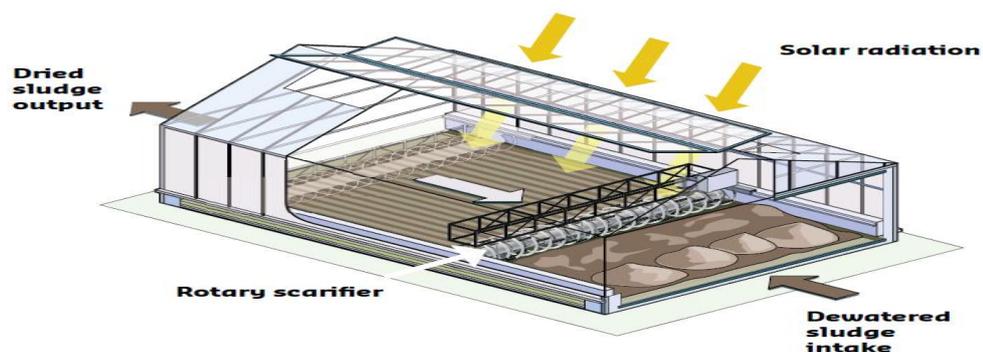


Figura 4.14 - O princípio de funcionamento do secador solar (Fonte: Héliantis, 2017).

A estufa do sistema Héliantis o calor durante o inverno é conservado a partir de uma parede de dupla película no topo e paredes laterais com “bolhas de ar”. A dimensão desta estufa depende do volume e teor de matéria seca das lamas a serem processadas, conteúdo seco desejado do produto final, quantidade de sol recebida no local e capacidade de armazenamento necessária. Nesta estufa a ventilação pode ser de modo natural por convecção do ar devido a diferenças de temperatura, ou por ventilação forçada, ao longo dos períodos de evaporação intensa e renovando também a camada de ar húmido no topo do leito de lamas.

4.5. Estudos laboratoriais de secagem

4.5.1. Secagem por convecção

4.5.1.1. Curva de secagem de lama

Vários estudos de secagem por convecção (Lowp et al., 1995, Deng et al., 2011 Bennamoun et al., 2012, citados em Bennamoun et al., 2013), revelaram que uma curva de secagem de lama típica que pode ser dividida fundamentalmente em duas partes: a taxa de secagem constante e a taxa de secagem reduzida, conforme mostra a Figura 4.15, onde o período da taxa de secagem constante está representado pela linha (AB), correspondente à evaporação da água livre no produto. No período de redução da taxa de secagem, a água evaporada reduz-se com o teor de humidade, primeiro com a evaporação da água intersticial (BC) e depois com a evaporação da água de superfície (CD).

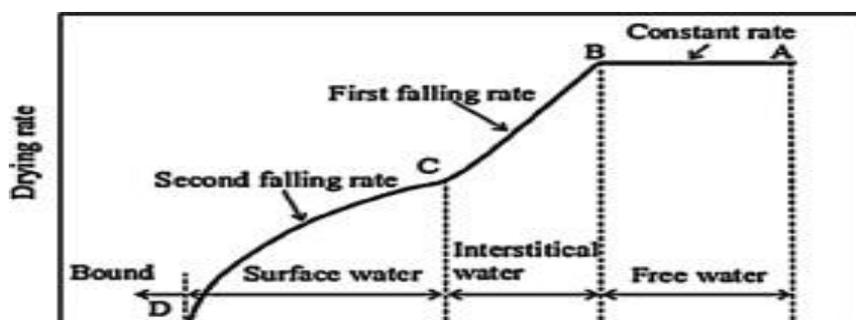
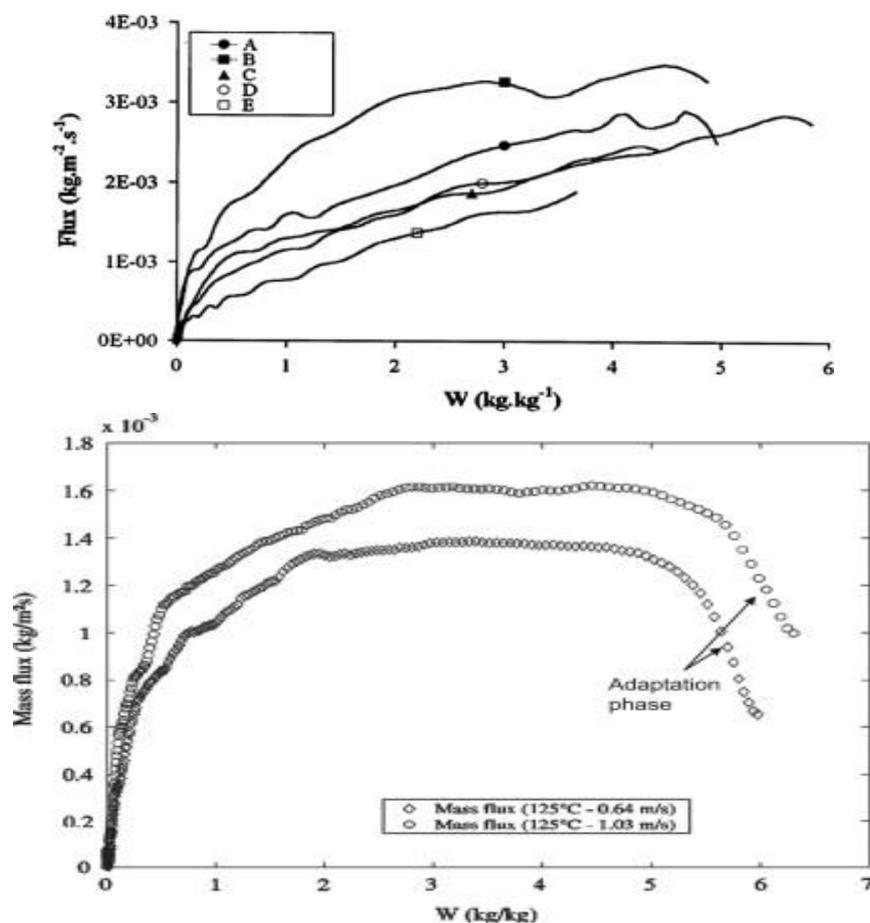


Figura 4.15 - Curva típica de secagem das lamas residual (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).

Geralmente a cinética de secagem inicia-se com um aumento considerável do fluxo de evaporação até alcançar um valor máximo e a temperatura da superfície atingir a

temperatura do bolbo húmido em relação à temperatura e humidade do ar. Na segunda fase, o fluxo de evaporação permanece constante, e corresponde ao período de taxa de secagem constante.

Segundo Léonard et al. (2004), citado em Bennamoun et al. (2013), a duração do período de secagem a taxa constante é influenciado pela origem das lamas, conforme mostra a Figura 4.16, sendo essa fase constante muito curta. Na última fase observa-se um período de redução da taxa de secagem que começa pela diminuição do fluxo de evaporação do valor máximo para zero.

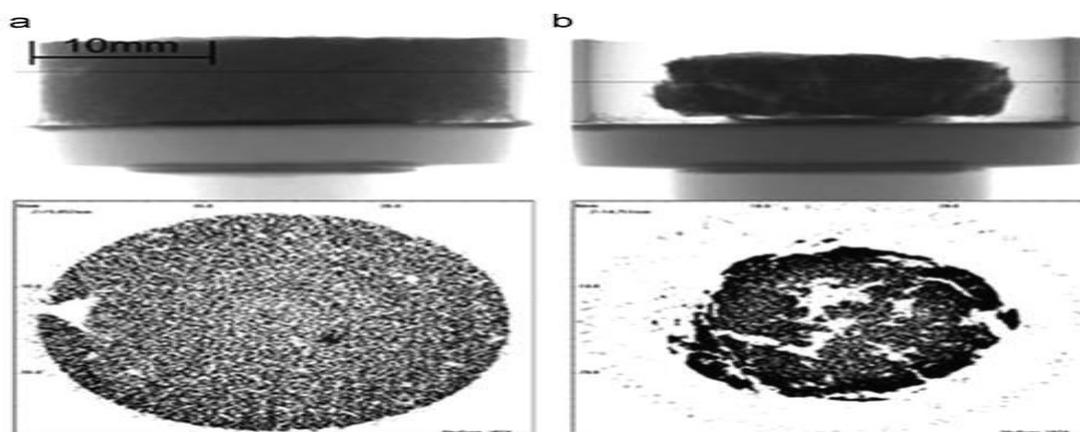


(A) e (B) Lama urbana com respetivamente 8000 e 9000 equivalentes de população, (C) Lama industrial agroalimentar, (D) Lama urbana com 27000 equivalentes de população, (E) Mistura entre lama industrial agroalimentar e lama urbana.

Figura 4.16 - Influência da origem das lamas no seu comportamento durante a secagem por convecção (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).

4.5.1.2. Definição de perfil de humidade e fenómenos que ocorrem durante a secagem por convecção

Durante a secagem de lamas por convecção verifica-se a contração do volume e a formação de fissuras na superfície. A aplicação de técnicas de imagem com câmara de filmar e um scanner de tomografia computadorizada de raios X permitiram visualizar a contração de amostras de lama (Tao et al., 2005, citado em Bennamoun et al., 2013). Na Figura 4.17, com os resultados obtidos ainda pouco nítidos, é perceptível a contração do volume da amostra estuada. Na Figura 4.18 é possível medir a variação da contração durante o processo de secagem, em função do teor de humidade. A redução no volume é de cerca de 70% para o volume inicial total.



Painel esquerdo: vista lateral e digitalização de imagens de reconstrução antes da secagem.
Painel direito: vista lateral e imagens de reconstrução de varredura após 151 min de secagem.
(a) $t = 0$ min e (b) $t = 181$ min.

Figura 4.17 - Observação da contração de volume durante a secagem por convecção das lamas de ETAR (Adaptada de Bennamoun et al., (2013).

Pelas imagens apresentadas é evidente uma diferença no diâmetro do produto antes e depois de 181 minutos de secagem. Os resultados da microtomografia de varrimento raios X demonstram a formação de fissuras pelas zonas brancas que exibem o fluxo de ar dentro do produto (Tao et al., 2005, citado em Bennamoun et al., 2013).

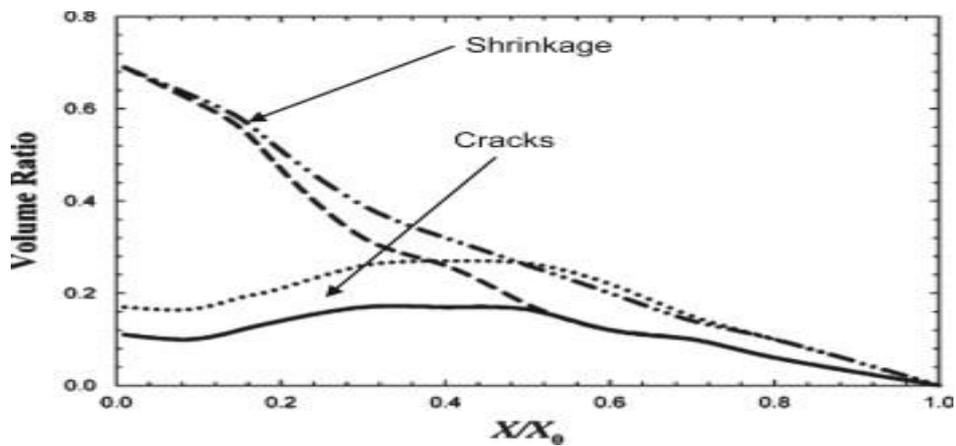


Figura 4.18 - Variação do encolhimento e fissuras durante a secagem por convecção das lamas de águas residuais (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).

Segundo Tao et al., (2005), citado em Bennamoun et al. (2013) as fissuras impostas, não variam muito com um valor máximo alcançado em torno de 30% do volume total. Estes autores, concluíram através de observação numa foto digitalizada de raios-X após 151 min que o contorno da superfície fica mais escuro do que o seu núcleo, levando a formação de uma “pele” na camada superficial.

Léonard et al., 2005 citado em Bennamoun et al., (2013), também utilizou microtomografia de raios X durante a secagem convectiva para observar os fenómenos de contração e fissuras e os resultados obtidos foram são muito semelhantes. Na Figura 4.19 é apresentado um gráfico com os pormenores do processamento de imagem até ter a imagem final de uma amostra com resultados obtidos tendo por referência os resultados apresentados na Figura 4.16.

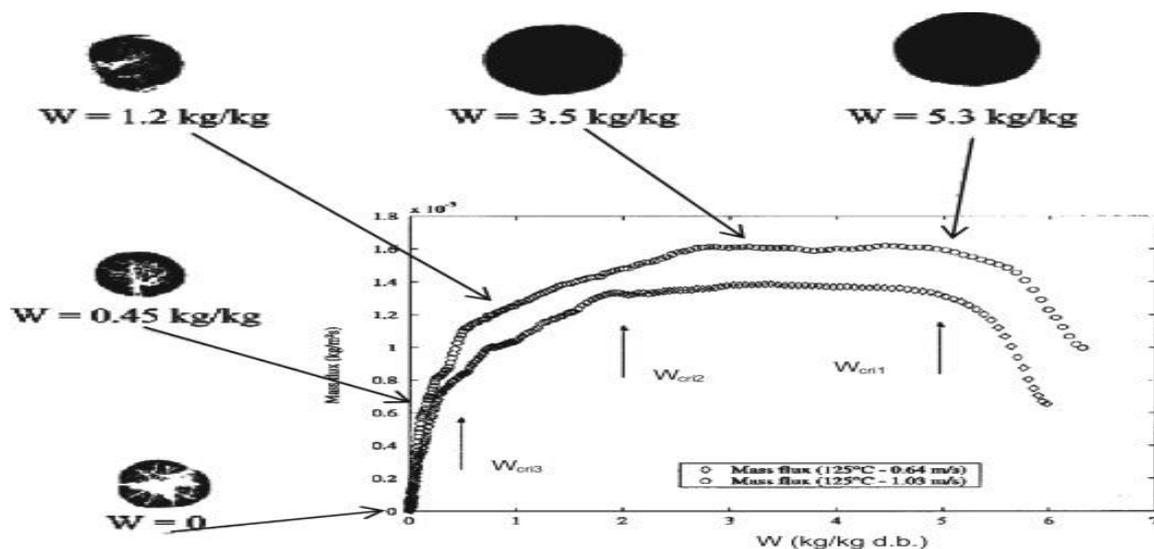


Figura 4.19 - Contração e formação de fissuras durante a secagem por convecção (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).

A Figura 4.19 mostra claramente que a contração se inicia logo no início do processo de secagem, contudo nota-se a redução do volume no período de taxa de secagem constante. E também possível observar que as fissuras (zonas brancas), surgem muito tarde, já no período de redução da taxa de secagem.

4.5.1.3. Odores

Segundo Liu et al., (2012), citado em Bennamoun et al. (2013) as emissões gasosas de lamas de ETAR produzem mau cheiro essencialmente devido à formação de amônia (NH_3).

Segundo Fraikin et al., (2011) citado em Bennamoun et al., (2013), o armazenamento de lama desempenha um papel essencial no comportamento das lamas ao longo da secagem por convecção, pois o tempo necessário para obter um produto seco aumenta de 300 minutos para cerca de 600 min quando o período de armazenamento vai para 20 dias. Este incremento é refletido por uma redução na taxa de secagem como mostra a Figura 4.20. Os mesmo autores estudaram também o efeito do armazenamento nas emissões gasosas, especialmente nas emissões de amônia (NH_3) e de compostos orgânicos voláteis (COV) e observaram que os valores aumentavam com o aumento do tempo de armazenamento.

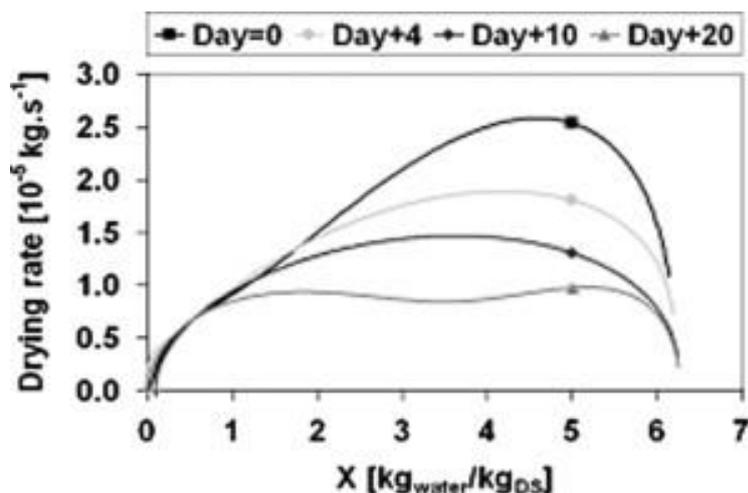


Figura 4.20 - Influência do armazenamento durante o comportamento cinético de secagem das lamas de ETAR (Adaptado de Bennamoun et al., 2013).

4.5.2. Secagem por condução

Segundo Bennamoun et al (2013), a secagem por condução é normalmente feita com óleo térmico ou vapor saturado a 0,85 MPa, através de uma caldeira a combustível fóssil ou biomassa. Na secagem por condução, a agitação mecânica é continuamente utilizada para renovar o contato entre a parede aquecida e as lamas, o que é essencial para manter um alto coeficiente de transferência de calor nas paredes aquecidas (Bennamoun et al., 2013).

4.5.2.1. Curva de secagem de lama

No processo de secagem por condução a lama passa pela fase pastosa, grumosa e depois a fase granular. Na Figura 4.21 apresenta-se as 3 fases, observando também as variações do torque com a redução do conteúdo de humidade ou aumento de tempo.

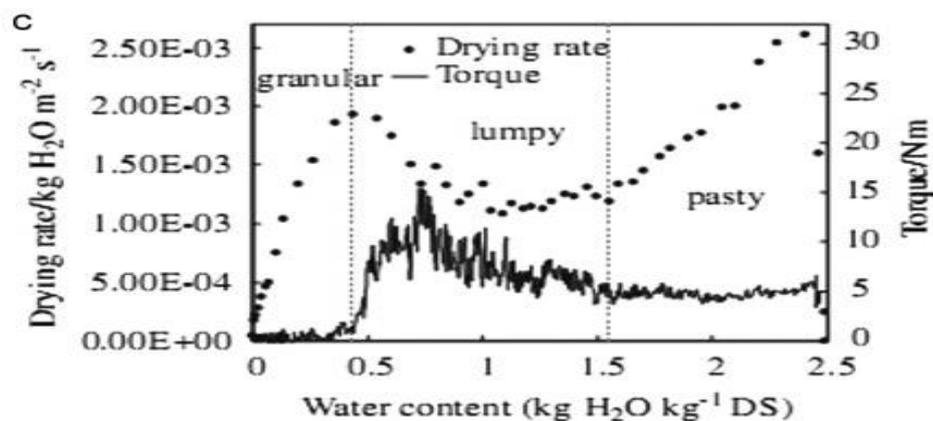


Figura 4.21 Evolução do torque durante a secagem de contacto com agitação para diferentes lamas e diferentes condições de operação (Deng et al., 2009, citado por Bennamoun et al. 2013).

Segundo Ferrasse et al., (2002) citado em Bennamoun et al. (2013), ao inserir o produto no secador, o produto aparenta irregulares e depois, com o aumento da temperatura e da agitação o produto começa a tornar-se viscoso. O torque mantém um valor constante ou sofre uma pequena redução. O produto move-se para a fase pastosa, e nesta fase são registados os valores mais altos das quantidades evaporadas e do coeficiente de transferência de calor, como mostra a Figura 4.21.

Segundo Deng et al. (2009) citado em Bennamoun et al. (2013) o produto é direcionado para a fase grumosa com um pequeno aumento do torque sempre que há uma redução do conteúdo de humidade.

Para Ferrasse et al. (2002), citado em Bennamoun et al. (2013) na fase grumosa observa-se um incremento do torque, que revela a fase de transição entre a fase grumosa e fase granular. O coeficiente de transferência de calor e a água evaporada são quase constantes durante esta fase com um pequeno aumento na fase de transição. A fase granular, é determinada por um baixo valor do torque e um coeficiente de transferência de calor constante.

4.5.3. Secagem solar

De acordo com Kurt (2015), na secagem térmica de lama consegue-se atingir 90% de matéria seca (DS). Num secador solar com efeito de estufa (GSD) a eficiência de secagem situa-se próximo de 70% DS, podendo ser elevada por calor adicional.

Segundo Ritterbusch e Bux (2012), citado em Kurt (2015), a secador solar com efeito de estufa (GSD) é acessível quanto ao seu processo de operação é mais económico e não requer mão-de-obra qualificada. É um processo amigo do ambiente e tem poucas emissões de CO₂, comparativamente aos secadores térmicos convencionais.

Na secagem solar, a ventilação ou o vento são utilizados para tirar o ar dentro da estufa e expulsar o ar saturado. As lamas são postas em camada com uma altura compreendida entre 40 cm e 80 cm.

Segundo Bennamoun (2012), citado em Bennamoun et al. (2013), em determinados sistemas são usados robôs para espalhar, girar, arejar e transportar a lama, para renovar a troca de superfície e impedir a formação de crosta.

De acordo com Bennamoun et al. (2013), para elevar a transferência de calor e massa, são sugeridas diversas soluções, como por exemplo aquecer o chão por meio da injeção de fluidos ou a utilização de bombas de calor.

4.5.3.1. Taxa de secagem

Segundo Bennamoun et al. (2013), a variabilidade das condições operacionais vai influenciar diretamente na secagem solar, que depende totalmente das condições climáticas, em especial temperatura e velocidade do ar, radiação solar.

A Figura 4.22 a e b mostra a variação de cinética de secagem num espaço coberto.

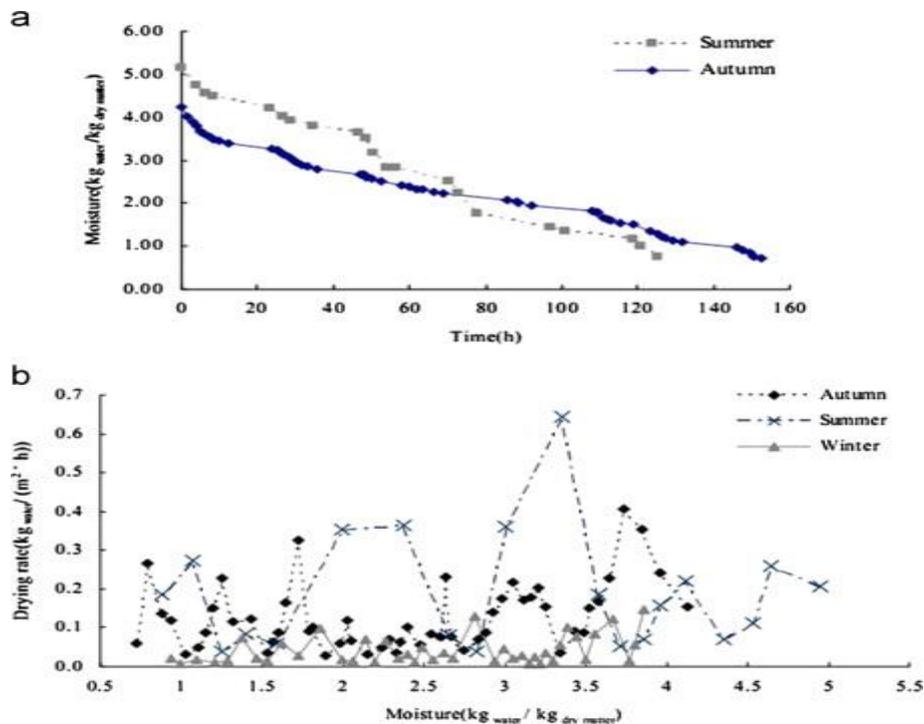


Figura 4.22 - Evolução da taxa de secagem durante a secagem solar (Lei et al.,2009, citado Bennamoun et al., 2013): (a) Teor de humidade, (b) taxa de secagem.

Lei et al. (2009), citado Bennamoun et al. (2013), mostra através da 4.22a influência das estações do na taxa de secagem, com mais radiações e temperaturas no verão do que no outono. No verão há menor tempo de secagem, como era de esperar. A Figura 4.22b apresenta a forma não regular da taxa de secagem e a influência da estação. A elevada taxa de secagem é assinada quando as condições climáticas são favoráveis com altas radiações e temperaturas, enquanto a menor taxa de secagem ocorre durante a noite e no inverno.

4.5.4. Sistemas combinados de condução e convecção de calor utilizados na secagem de lama

Bennamoun et al. (2013) referem com propostas inovadoras para a secagem de lama o uso de óleo usado aquecido, chamado método de fritura por imersão e o uso de vapor sobreaquecido (SHS).

Peregrina et al. (2008), citados em Bennamoun et al. (2013), mostram algumas vantagens do método de secagem por fritura por imersão em relação aos outros métodos de secagem. Quando o produto é posto em contato direto com óleo aquecido, a fase plástica é anulada ao contrário do que acontece durante a secagem por condução. A utilização de altas temperaturas permite higienizar totalmente o produto. O vapor extraído é basicamente água evaporada, o que possibilita uma rápida recuperação por condensação do calor latente. A fritura apresenta baixa resistência térmica, isto é, permite uma secagem mais rápida em relação a métodos de secagem por condução e por convecção.

Alguns autores (Wu et al. (2012), Silva et al. (2005) e Hong et al. (2013), citados em Bennamoun et al. 2013) estudaram a efeito das condições operacionais, relacionadas com a utilização de diferentes tipos de óleos usados, temperatura do óleo usado, o tamanho e o efeito de pressão das lamas.

Segundo Wu et al. (2012), citados em Bennamoun et al. (2013), ao longo da fritura o produto passa principalmente por três fases, conforme mostram as Figura. 4.23 a) e 4.23b).

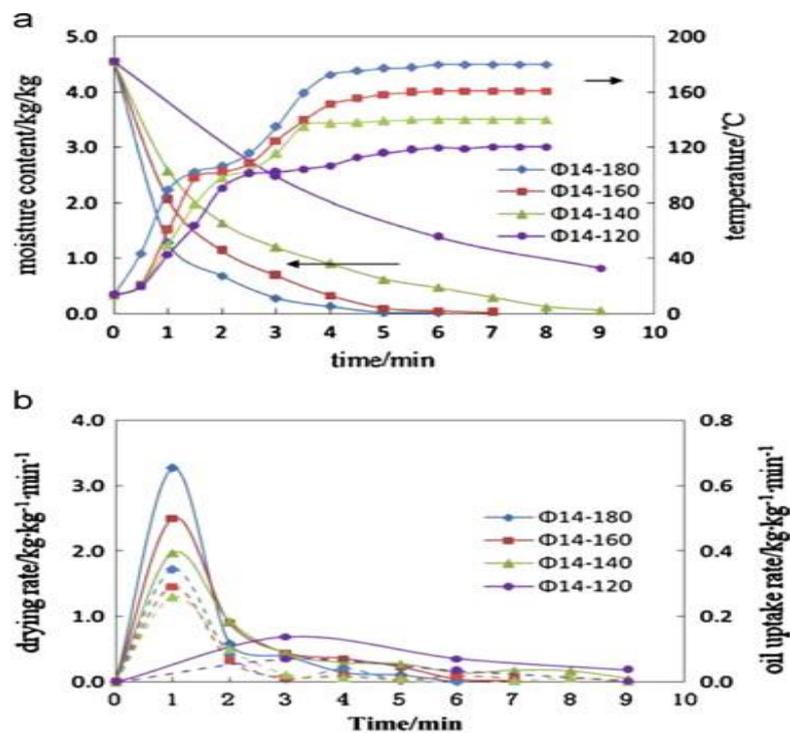


Figura 4.23 - Influência da temperatura do óleo no comportamento de secagem das lamas durante a fritura (Wu et al., 2012). (a) Variação do teor de humidade do produto e da sua temperatura, (b) Taxa de secagem.

Na primeira fase de estágio de aquecimento inicial por óleo, a lama atinge a temperatura ambiente que é de cerca de 100°C. A taxa de evaporação aumenta com o incremento da temperatura da lama até atingir o valor máximo. No entanto, o calor transferido para a lama é usado para o aquecimento. No segundo estágio é chamado de período de taxa de secagem constante. A evaporação máxima é mantida constante por um determinado tempo, a água evaporada durante esta fase pode ser considerada como água livre e o calor é usado essencialmente para a evaporação desta água livre. Ao longo da terceira fase, a temperatura do produto aumenta a partir da temperatura de ebulição da água até atingir a temperatura do óleo, é chamada de fase de secagem. A água evaporada reduz-se até atingir valores bastante baixos (Wu et al. (2012), citados em Bennamoun et al., 2013).

Segundo Mujumdar (1991), citado em Bennamoun et al., 2013, a utilização de vapor superaquecido (SHS), no processo de secagem de lama ainda está pouco explorada, não havendo muito estudos que abordem este assunto

Arlabosse e Blanc (2012), citados em Bennamoun et al. (2013), apresentam um caso estudo sobre uma comparação entre o uso de vapor sobreaquecido e ar quente para a secagem de lamas. Eles comprovaram que, a temperaturas abaixo de 130 °C, a comparação

beneficia o método de secagem por ar quente com uma taxa de secagem mais importante do que vapor superaquecido (SHS), porém essa tendência inverte-se para altas temperaturas, como é mostrado na Figura 4.24.

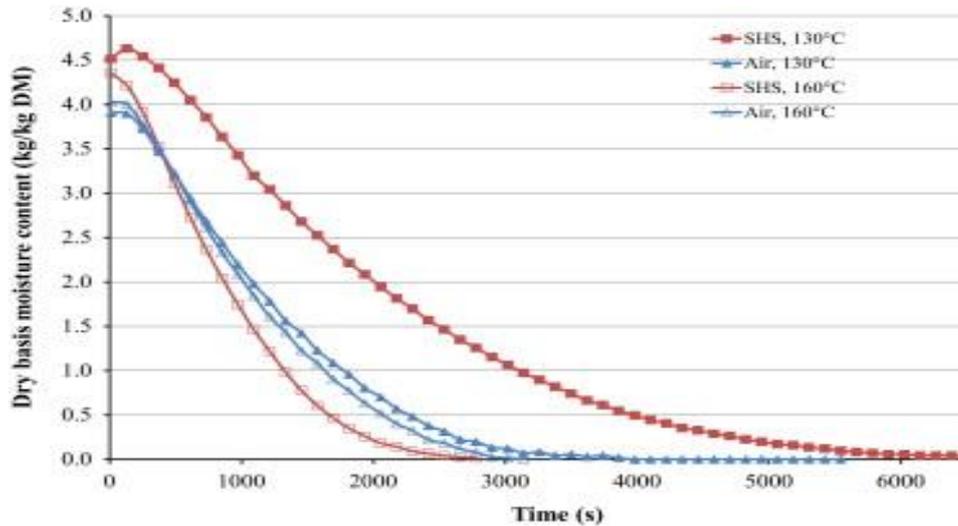


Figura 4.24 - Curvas de secagem obtidas por secagem ao ar quente e uso de vapor superaquecido (Adaptado Arlabosse e Blanc (2012), citados em Bennamoun et al., 2013).

4.6. Análise comparativa entre as técnicas de secagem

Na Tabela 4.2 é feita uma análise comparativa entre os principais sistemas de secagem de lamas de ETAR.

Tabela 4.2 - Vantagens e desvantagens de cada método de secagem (Adaptado de Bennamoun et al. 2013).

Técnica utilizada	Vantagens	Desvantagens	Consumo específico de energia (kWh ^t ⁻¹)	Taxa de secagem específica (kgm ⁻² h ⁻¹)
Secagem convectiva	<ul style="list-style-type: none"> • Design que permite manipulação fácil • Produto seco usado na agricultura 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de secagem relativamente longo • Emissão de maus odores • Emissões gasosas 	<ul style="list-style-type: none"> • Secador de tapete: 700 a 1140 • Secador de tambor: 900 a 1100 • Secadora de atomização: 1200 a 1400 	<ul style="list-style-type: none"> • Secador de tapete: 5 a 30 • Secador de tambor: 3 a 8 • Secadora de atomização: 0,2 a 1
Secagem condutiva	<ul style="list-style-type: none"> • Nenhuma poluição do meio de transmissão de calor • Baixa emissão de odores • Concentração de COV baixa • Redução dos riscos de incêndio e explosão • Produto seco usado em aplicações industriais 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de secagem relativamente longo • A fase pegajosa altera a <i>performance</i> do secador 	<ul style="list-style-type: none"> • Secador de disco: 855 a 955 • Secador de pá: 800 a 885 • Secador de película fina: 800 a 900 	<ul style="list-style-type: none"> • Secador de disco: 7 a 12 • Secador de pás rotativas: 15 a 20 • Secador de película fina: 25 a 35
Secagem solar	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de energia solar gratuita • Lama livre de agentes patogénicos • Produto seco usado na agricultura • Permite secar grande quantidade durante a mesma operação 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende das condições climáticas • Tempo de secagem relativamente longo • Requer grande superfície 	<ul style="list-style-type: none"> • 30 a 200 (em alguns casos até 1000) 	
Fritura	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de secagem curto • Possibilidade de empregar o óleo usado • Lama seco usado para incineração • Confinamento de odor • Não há emissões gasosas • Redução dos riscos de incêndio e explosão 	<ul style="list-style-type: none"> • São necessárias altas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> • 888 	
Secagem de vapor superaquecido	<ul style="list-style-type: none"> • Sem emissão de poeira • Sem emissão volátil • Isento agentes patogénicos • Curto tempo de secagem • Baixo consumo de energia 	<ul style="list-style-type: none"> • São necessárias altas temperaturas 		

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO

Com o incremento da produção de lamas nas ETAR urbanas e industriais devido o aumento dos habitantes e crescimento industrial a gestão de lamas constitui um problema a nível global. Este problema tem-se vindo a acentuar com as exigências da regulamentação ambiental. Tendo em geral as lamas de ETAR mais de 95% de humidade, a redução do teor de água é crucial para a diminuição de custos de tratamento, armazenamento e de transporte das lamas, seja para a sua utilização ou eliminação em aterro.

Neste trabalho foi feita a análise dos diferentes processos de tratamento de águas residuais urbanas, e uma revisão do processo de gestão das lamas. Foi igualmente analisadas as características físico-químicas das lamas em três diferentes ETAR, no por fim fez-se uma análise e comparação dos diferentes tipos de secadores de lamas e dos resultados de estudos experimentais de secagem de lamas.

A secagem de lamas é um processo complexo que depende de vários parâmetros, como as condições de operação aplicadas e os métodos de secagem aplicados. A escolha de um secador que tenha considerado de grande eficiência vai depender das propriedades da lama, do teor de humidade destas e da capacidade funcionalmente da máquina. Há no mercado vários tipos de secadores disponíveis, desde de tecnologias de secagem com baixas emissões, elevada eficiência térmica, e de baixo custo.

Com os resultados dos estudos analisados, pode-se concluir que na aplicação de secagem direto, há três fases: fase de adaptação, fase de secagem constante e fase de taxa decrescente de secagem, e que a origem das lamas vai influenciar na duração da fase de secagem constante. Neste tipo de secagem as lamas apresentam fissuras, sofrem contração e formação de uma pele devido a redução do teor de humidade. Na secagem indireta há três fases de evolução de lama: granular, grumosa e a pastosa. Em secagem solar é difícil identificar as fases de secagem, porque trabalha com situações operacionais variáveis e depende muito do clima. A utilização de sistemas de secagem inovadores com óleo térmico e vapor sobreaquecido revelaram bons resultados, sendo a solução com vapor sobreaquecido a que se afigura poder proporcionar mais benefícios relativamente a outros métodos de secagem.

Propostas de trabalho

Como perspectivas de trabalho futuro, de forma a complementar alguns dos assuntos que foram analisados neste estudo, propõe-se:

- Pesquisa mais abrangente dos tipos dos secadores e resultados da sua aplicação, na perspectiva de poder alcançar indicadores de desempenho comuns que permitam uma avaliação comparativa mais precisa, tornando mais fácil e rigoroso o processo de seleção;

- Desenvolver estudos experimentais com alguns dos secadores existentes no mercado ou construir protótipos laboratoriais que permitam estudar a ação combinada do valor da temperatura de secagem com o grau de agitação das lamas e tempo de residência no secador.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., Morais, M. C. e Cunha-Queda, C., (2015). “Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors”, *Waste Management*, 40, 44-52.
- APA, (2013). *Gestão de lamas de estações de tratamento de águas residuais urbanas (2010-2013)*. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Barbosa, J., (2008). “Valorização de lamas provenientes de Águas Residuais”, Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, perfil Engenharia Sanitária.
- Bennamoun, L., Arlabosse, P., & Léonard, A. (2013). “Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 29 – 43.
- Berco, Valeriu., (2013). “Análise Qualitativa de Lamas de Etar e Competitividade Económica dos processos de tratamento e escoamento: caso da ETAR da Guia”; Instituto Superior de Agronomia – Universidade Técnica de Lisboa; Lisboa.
- Carvalho, M., Antas, A. (2002). “Valorização Agrícola de Lamas de ETAR - Potencial dos Solos Portugueses”. Comunicação apresentada no Seminário “Gestão e Valorização de Lamas de ETA’s e ETAR’s em Portugal”, 27 e 28 de Junho de 2002, Lisboa.
- Chen, G., Yue, P., Mujumdar, A., (2002), “Sludge dewatering and drying”, *Drying Technology*, Volume 20, 883-916.
- Comissão Europeia, (2012), Eurostat, Statistics - Environment and Energy - Environment, Water Statistics - Sewage sludge production and disposal disponível em <http://epp.eurostat.ec.europa.eu> (consultado em 20 de Maio de 2017).
- Decreto-Lei n.º 118/2006, D. R. I Série-A, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 118 pp. 4380-4388.
- Decreto-Lei nº 152/97, de 19 de junho. “Diário da República nº 139/97, Série I-A, páginas 2959-2966. Ministério do Ambiente.

- Decreto-Lei nº 276/2009, de 2 de outubro. “Diário da República nº 192/2009, Série I, páginas 7154-7165. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional
- Dias, José Cardoso Soveral; (2004) Guia de boas práticas - Aplicação de Lamas na Agricultura; Reciclamas; Lisboa; Agosto.
- Directiva do Conselho 86/278/CEE, de 12 de Junho de 1986, relativa à protecção do ambiente, e em especial dos solos, na utilização agrícola das lamas de depuração, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L 181 (1986-07-04), pp. 6-12.
- Dryingmachineschina Secador disco rotativo rotativo <http://dryingmachineschina.com.pt/1-1-hollow-paddle-dryer.html> , consulta em 20 de maio 2017.
- Flaga, A. e Schnotale, J., (2006). “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.
- Farinha, J.A.M., (2003). “Secagem térmica de lamas de ETAR”, Comunicação apresentada no Encontro Gestão e Valorização de Lamas de ETA e ETAR`s em Portugal, Forum Lisboa, Lisboa, 27-28 Junho, 13 p.
- Ficza, I., (2010). “Mathematical Model Of Solar Drying Of Sewage Sludge”. Master's Thesis, Faculty Of Mechanical Engineering, Institute Of Mathematics, Bruno University of Technology, República Checa.
- Godinho, C. A. G., (2009). “Impacte da Revisão da Directiva Valorização de Lamas nos Custos de Tratamento de Águas Residuais”; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade- Nova de Lisboa; Lisboa.
- Haarslev, Secador disco e Tambor rotativo www.haarslev.com consulta em 24 de maio 2017
- Heliantis, Secador solar <http://www.degremont-technologies.com/Heliantis-TM-Solar-Sludge-Drying> consulta em 24 de maio 2017.
- Kelessidis, A. e Stasinakis, A. S., (2012). “Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries”, Waste Management, 32, 1186-1192.
- Kurt, M., Aksoy, A., e Sanin, F. D.,(2015). “Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements”. Water Research, 82, 47–57.

- Liz, J.V., (2017). “Contribuição para o estudo de sistemas de secagem de lamas de ETAR”; Dissertação de Mestre em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra - Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Lopes, J., (2016). “Análise e melhoria dos processos de gestão de lamas de depuração de efluentes líquidos” Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente.
- Mendes, S., (2014). “Valorização de lamas de tratamento de águas residuais urbanas para utilização agrícola”. Instituto Superior De Engenharia De Lisboa, Lisboa.
- Metcalf e Eddy (2003). “Wastewater Engineering: Treatment and Reuse”. McGraw-Hill, New York, USA.
- Monte, M. M., (2010). “Contributo para o estudo da valorização energética de biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais”; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Silva, A. L. F. da., (2015). “Estudo comparativo de sistemas de espessamento de lamas de ETAR. Caso de estudo: Mesa de espessamento versus Tambor rotativo”; Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do Território. Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Viana do Castelo.
- Sousa, R., (2005). “Estratégias de gestão de lamas das estações de tratamento de águas residuais (ETAR). Extrusão de lamas para aplicação da agricultura”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Universidade do Porto, Porto.
- Spray, Secador spray <http://www.sprayprocess.com.br/secador-pulverizacao> , Consulta em 26 de maio de 2017.
- Suez’s , Secador Evaporis LT <https://www.suezwaterhandbook.com/degremont-R-technologies/sludge-treatment/drying/low-temperature-sludge-drying-system-Evaporis-LT> ,Consulta em 22 de maio de 2017.
- Tavares, P., (2007). “Otimização da gestão de lamas de ETAR numa perspetiva regional”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra - Universidade de Coimbra, Coimbra.

Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., (2014). “Metcalf and Eddy Wastewater Engineering: Treatment and Reuse”, 5ª Ed., Mc Graw-Hill.

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 15 maio 2017.

Werther, J., Ogada, T., (1999), Sewage sludge combustion, Progress in Energy and Combustion Sciences, Volume 25: 55-116.

ANEXO A - NORMAS DE REFERÊNCIA PARA A ANÁLISE ÀS LAMAS

Segundo o ANEXO II do Decreto-lei nº 276/2009, estão apresentadas os parâmetros, unidades, e normas de referência para análise de lama para o uso agrícola.

Parâmetros	Unidades	Normas de referência	
		Título	Referência
Amostragem		Qualidade da água — amostragem — parte 13 do guia sobre amostragem de lamas provenientes de estações de tratamento de águas e de águas residuais.	NP EN ISO 5667-13
Matéria seca	%	Caracterização das lamas — determinação do teor em matéria seca e do teor em água.	EN12880
Matéria orgânica	% na matéria seca	Caracterização das lamas — determinação da perda de massa por ignição.	EN12879
pH		Caracterização das lamas — determinação do valor do pH	EN12176
Azoto total	mg/kg de matéria seca	Caracterização das lamas — determinação do azoto Kjeldahl	EN13342
Metais pesados, fósforo, potássio.	mg/kg de matéria seca	Caracterização das lamas — determinação dos elementos metálicos vestigiais e do fósforo — extração por água-régia.	EN13 346
<i>Salmonella</i> spp.	Presente/ausente em 50 g de matéria original.	<i>Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the detection of Salmonella spp.</i>	ISO 6579:2002 (¹) (²)
<i>Escherichia coli</i>	Número de células viáveis/g de matéria original.	<i>Microbiology of food and animal feeding stuffs — Horizontal method for the enumeration of beta-glucuronidase-positive Escherichia coli — part 2: Colony-count technique at 44 degrees C using 5-bromo-4-chloro-3-indolyl beta-D-glucuronide.</i>	ISO 16649-2:2001 (¹) (²) (⁴)

(1) Aplicável até entrada em vigor da respectiva norma europeia.

(2) Considerar ainda: ISO 6579:2002/Cor 1:2004 e ISO 6579:2002/Amd 1:2007. *Annex D: Detection of Salmonella spp. in animal faeces and in environmental samples from the primary production stage.*

(3) Recomenda -se uma toma inicial mínima de 20 g de matéria fresca, diluição 1:5 ou 1:10 em solução estéril de NaCl 0,9 % e agitação a 150 rpm, a 5°C ± 3°C, durante o tempo necessário a que se obtenha a máxima homogeneidade possível.

(4) Métodos a usar em alternativa.

[Remover se necessário para garantir que o próximo Capítulo inicia numa página ímpar]

ANEXO B – LAMAS DE DEPURAÇÃO E OUTRAS DE COMPOSIÇÃO SIMILAR

A Portaria n.º 209/2004, de 3 de março, que aprova a lista europeia de resíduos estabelece os seguintes tipos de lamas passíveis de aplicação na agricultura:

1. Lamas de depuração:

- Lamas provenientes de ETAR domésticas, urbanas e de outras ETAR de composição similar às águas residuais domésticas e urbanas segundo a classificação da Lista Europeia de Resíduos (LER) (**LER 190805**);
- Lamas de fossas sépticas e de outras instalações similares para o tratamento de águas residuais (**LER 200304**);
- Lamas provenientes de ETAR de actividades agro-pecuárias (**LER 020199**).

2. Lamas de composição similar:

- As lamas provenientes do tratamento de efluentes de preparação e processamento de frutos, legumes, cereais, óleos alimentares, cacau, café, chá e tabaco, da produção de conservas, da produção de levedura e extracto de levedura e da preparação e fermentação de melaços, segundo a classificação da **LER 020305**;
- As lamas provenientes do tratamento de efluentes do processamento do açúcar, de acordo com a classificação da **LER 020403**;
- As lamas provenientes do tratamento de efluentes da indústria de lacticínios, nos termos da classificação da **LER 020502**;
- As lamas provenientes do tratamento de efluentes da indústria de panificação, pastelaria e confeitaria, segundo a classificação da **LER 020603**;
- As lamas provenientes do tratamento de efluentes da produção de bebidas alcoólicas e não alcoólicas, excluindo café, chá e cacau, de acordo com a classificação da **LER 020705**;

- As lamas provenientes do tratamento de efluentes da produção e transformação da pasta para papel, papel e cartão, nos termos da classificação da **LER 030311**;

Caso seja efetuada mistura de lamas constituída exclusivamente a partir dos resíduos acima referidos, deve ser utilizado o código **LER 190899** (Outros resíduos não anteriormente especificados).

ANEXO C - ELEMENTOS DE INSTRUÇÃO DO PLANO DE GESTÃO DE LAMAS

Segundo o Anexo III do Decreto-lei n.º 276/2009 de 2 de outubro, o licenciamento da utilização agrícola de lamas tem como base o plano de gestão de lamas (PGL) aprovado pela DRAP as declarações de planeamento das operações (DPO) territorialmente competente.

O **PGL** deve identificar origem das lamas, os processos de tratamento das águas residuais e das lamas, especificar as quantidades para valorizar, analisar e caracterizar do ponto de vista climático e agrário o local que vão ser aplicadas as lamas, caracterizar as explorações onde se quer fazer a aplicação, nomeando limitações associadas ao meio natural, captações de água, albufeiras, zonas habitacionais, áreas de Reserva Ecológica Nacional zonas sensíveis e vulneráveis, cursos, entre outras, saber de todas as actividades pecuária presentes no local de operação e nas explorações onde se pretende fazer a valorização das lamas, descrever as características dos solos e dos sistemas de cultura, e também fazer a descrição e posicionamento das áreas de regadio, de floresta, de sequeiro, e de pastagem no local da intervenção, e as culturas para o local onde se prevê a aplicação de lamas, e identificar o técnico responsável e os intervenientes no espalhamento das lamas, e de todas entidades envolvidas na actividade, bem como medidas preventivas, da maquinaria e instrumentos a utilizar, dos riscos inerentes à aplicação, e descrição do vestuário e outros equipamentos de protecção e de acesso aos primeiros socorros, o plano de vigilância da saúde aos trabalhadores envolvidos.

Quando a **DPO** tem que conter também, a identificação do PGL, reconhecimento do requerente, do técnico responsável pela aplicação e do agricultor do titular da exploração destinatária das lamas, apresentar as parcelas agrícolas de destino, localização, área do terreno e tipo de cultura praticada e analisar as lamas que vão sendo aplicada e dos solos onde se pretende actuação à aplicação, entre outros requisitos.

ANEXO D – DADOS DE 2012 E 2013 DA PRODUÇÃO E DESTINO FINAL DE LAMAS DE ETAR EM PORTUGAL

O Decreto-lei n.º 276/2009, de 12 de junho aplica-se as ETAR (domésticas, urbanas, de atividades agro-pecuárias, de fossas sépticas ou outras de composição similar) que produzam lamas que tenham como destino a valorização agrícola, e sejam submetidas ao cumprimento das disposições estabelecidas neste.

O cumprimento das atividades de valorização agrícola de lamas só pode ser executado por produtores de lamas ou por operadores (Figura C.1) que confirmem dispor de um técnico responsável acreditado nos termos do Art.º 8º do Decreto-Lei n.º 276/2009, de 2 de outubro e que fiquem titulares de alvará para a armazenagem e, ou, tratamento de lamas, emitido ao abrigo do Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, pelas Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) competentes.

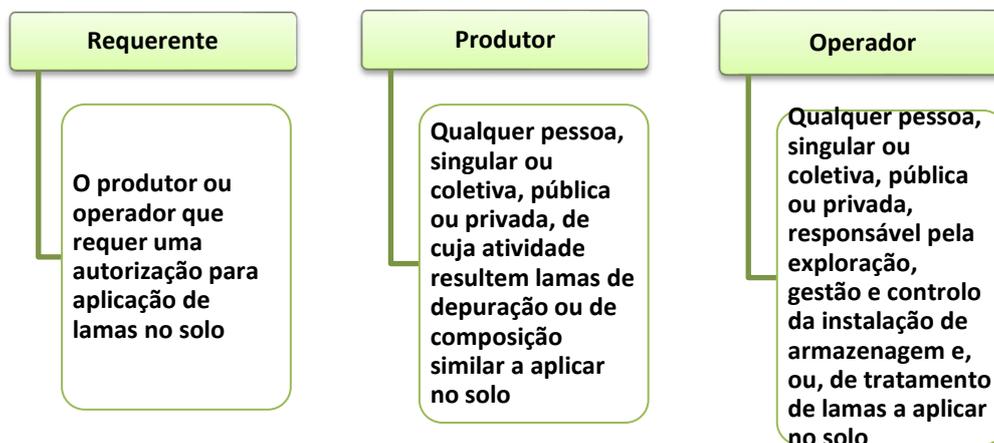


Figura D.1 – Intervenientes no Plano de gestão de lamas (PGL)

Para realizar uma análise da gestão de lamas do tratamento de águas residuais urbanas identificadas com o código (LER 190805) são essenciais os seguintes dados: quantidade de lama produzida, e quantidade de lama recebida e enviada para valorização e eliminação no mesmo período de tempo.

Tendo por referência os documentos internos às Direções Regionais de Agricultura e Pescas (DRAP), apresentados pelos produtores de lamas (B) e pelos operadores de gestão de resíduos (OGR) (representado como C1) que recebem lamas, são apresentados nas tabelas C.1 a C.3 os dados declarados relativos aos anos de 2012 e 2013.

Tabela D.1 - Lamas de depuração declaradas pelos produtores e operadores de resíduos (Fonte: Mapa Integrado de Registo de Resíduos (MIRR))

Ano	Entidade	Total de lamas (t)	Valorização		Eliminação	
			(t)	%	(t)	%
2012	B	462870	428884	93%	33986	7%
	C1	339254	327486	97%	11768	3%
2013	B	393025	371975	95%	21050	5%
	C1	388313	377357	97%	10956	3%

B – Produtores

C1 – Operadores de resíduos

Na Tabela D.1 verifica-se que o valor total de lama declarado pelos produtores é superior ao declarado pelos operadores, tendo lamas com destino desconhecido, sabendo que deveria ser caso contrário, pelo que as quantidades declaradas pelos operadores deveriam ser superiores às dos produtores.

A valorização de lamas é a opção mais preferida, sendo que os operadores valorizam mais de 95 % do total de lamas declarado.

Na Tabela D.2 apresenta-se as operações de valorização identificadas correspondem às OGR R3 (compostagem), R10 (valorização agrícola), R13 (armazenagem prévia a outra operação de valorização) e R12 (tratamento prévio a outra operação de valorização) e a quantidade de lamas enviadas para cada destino, sendo que os destinos mais escolhidos são a valorização agrícola (R10) e o armazenamento para valorização (R13).

Tabela D.2 - Produção e valorização de lamas de depuração (Fonte: MIRR)

Ano	Entidade	Total (t)	R 10		R 13		R 3		Outros R	
			(t)	%	(t)	%	(t)	%	(t)	%
2012	B	428884	115500	27%	223459	52%	88203	21%	1722	0%
	C1	327486	101608	31%	169561	52%	56317	17%	0	0%
2013	B	371975	104511	28%	174138	47%	88474	24%	4852	1%
	C1	377357	97049	26%	196856	52%	83401	22%	51	0%

B – Produtores

C1 – Operadores de resíduos

Pela Tabela D.2 verifica-se que a armazenagem (R13) totalizou mais de 50% das lamas valorizadas em 2013 e em 2012 foi de 47%. Este valor tão elevado é atribuído ao período de tempo necessário para o licenciamento da aplicação na agricultura.

Tanto na valorização agrícola (R10) como na compostagem (R3), os valores totais declarados pelos produtores são superiores aos declarados pelos operadores, pelo que poderemos estar perante uma situação de gestão de lamas onde não se sabe o seu destino. A valorização energética de lamas (R1) não recebe qualquer declaração.

Na Tabela D.3 apresenta-se as operações de eliminação registadas pelos operadores correspondem às operações D15 (armazenagem para eliminação), D1 (deposição em aterro) e outros que integram D9 (tratamento físico químico) e D7 (descarga para mares ou oceanos).

Tabela D.3 - Produção e eliminação de lamas de depuração (Fonte: MIRR)

Ano	Entidade	Total (t)	D1		D15		Outros D	
			(t)	%	(t)	%	(t)	%
2012	B	33986	23271	68%	8459	25%	2254	7%
	C1	11768	11368	97%	260	2%	139	1%
2013	B	21050	20299	96%	538	3%	213	1%
	C1	10956	9907	90%	860	8%	188	2%

B – Produtores

C1 – Operadores de resíduos

Em relação às operações de eliminação de lamas, certifica-se que a quantidade total de lamas declarada pelos produtores e superior a do operadores.

No Artigo 28.º do Decreto-Lei n.º 276/2009 obriga à comunicação anual destas informações, entre outras, para aplicação de lamas em solos agrícolas, e é obrigatória a exibição de uma DPO, que contém as quantidades de lamas aplicadas.

Na Tabela D.3 comparando as quantidades declaradas no MIRR pelos operadores de gestão de resíduos e as quantidades real valorizadas diretamente na agricultura na DPO, nota-se que a uma discrepância entre os valores.

Tabela D.3 - OGR R10 - Quantidades aplicadas (DPO) vs declaradas (MIRR) para valorização direta na agricultura

Ano	Recebido C			DPO
	Total recebido	Direto para R10	Indireto para R10	

Tratamento de águas residuais e gestão de lamas de ETAR: revisão teórica

2012	339254	101608	5566	106390
-------------	--------	--------	------	--------

Valores em toneladas