

Simulação Matemática da Desidratação de Lamas de ETAR em Leitões de Secagem

Eleonora de Carvalho Lampreia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Professora Filipa Maria Santos Ferreira

Engenheiro Pedro Ricardo Neto Póvoa

Júri

Presidente: Professor Rodrigo de Almada Cardoso Proença de Oliveira

Orientador: Professora Filipa Maria Santos Ferreira

Vogal: Professor José Manuel de Saldanha Gonçalves Matos

Julho 2017

Agradecimentos

À Professora Filipa Ferreira e ao Engenheiro Pedro Póvoa, respetivamente orientadora e co-orientador científico da presente dissertação, agradeço toda a disponibilidade e oportunidade de formação científica concedidos.

À Professora Filipa Ferreira, agradeço ainda a solicitude e o incentivo ao longo do trabalho realizado, bem como a contribuição tida, direta e indiretamente, na minha formação profissional, técnica e científica.

Ao Grupo AdP, expresso a minha gratidão pela oportunidade concedida e o apoio prestado. Agradeço em particular a colaboração prestada na preparação e realização das campanhas experimentais por parte da Engenheira Carla Gil, do Engenheiro João Jerónimo, do Nuno Alves e de todos os funcionários e operadores da ETAR da Póvoa da Galega (Águas do Tejo Atlântico - Grupo AdP), que ao longo de todo o trabalho sempre demonstraram uma enorme disponibilidade e simpatia.

Registo ainda o agradecimento ao Engenheiro Osvaldo Moiambo, pelo acompanhamento nas campanhas experimentais e pelos conhecimentos científicos partilhados.

Finalmente, à minha mãe, avó e avô agradeço o estímulo e o apoio incondicional demonstrados ao longo da minha formação pessoal, científica e profissional e ao meu pai o cuidado na revisão do texto. Ao Gonçalo agradeço também o apoio em todos os meus projetos, o companheirismo e a paciência. À Joana, a amizade e incentivo nos momentos mais difíceis ao longo deste trabalho.

Resumo

Na presente dissertação é abordada a problemática da gestão de lamas de ETAR. O aumento da produção deste tipo de resíduo, observado nas últimas décadas nos países desenvolvidos, terá tendência a agravar-se e tomar proporções globais, face ao crescimento espectável dos sistemas de saneamento dos países em desenvolvimento. Neste contexto, é fundamental dispor de instrumentos que permitam avaliar o desempenho dos processos de tratamento de lamas, com vista a uma gestão adequada das mesmas, privilegiando opções que potenciem a redução do seu volume e a sua valorização, numa perspetiva de economia circular.

De entre os métodos de desidratação de lamas, com conseqüente redução de volume, os leitos de secagem destacam-se pela facilidade operacional, reduzidos custos e consumos energéticos associados. No entanto, face à complexidade dos fenómenos de transferência de calor e massa envolvidos na desidratação, existem ainda algumas lacunas na caracterização e avaliação do seu desempenho.

Nesse sentido, é desenvolvido um modelo matemático de simulação dos processos envolvidos na desidratação de lamas em leitos de secagem. Considerando o balanço hídrico de massas e o balanço aproximado de energia associados, o modelo possibilita a obtenção de previsões dos valores de teor de sólidos mediante as condições meteorológicas e as características das lamas a desidratar. Os resultados do modelo são comparados com resultados experimentais, obtidos numa instalação piloto de leitos de secagem de lamas de ETAR, para diferentes condições meteorológicas. Desta forma, os resultados do modelo são considerados, de um modo geral, satisfatórios.

Palavras-chave

Leitos de secagem de lamas, Desidratação de lamas, Modelação, Avaliação de desempenho

Abstract

In this thesis the issue of sewage sludge management is studied. The increase in the production of this type of waste in developed countries, in the last decades, is expected to increase and take on a global scale, considering the growth of sanitation systems in developing countries. In this context, it becomes necessary to develop instruments to evaluate the performance of sludge treatment processes, in order to properly process and manage them. In a circular economy perspective, it should be given priority to treatment options that will reduce the volume and increase the beneficial use of sludge.

Among the sludge dewatering methods, associated to volume reduction, drying beds stand out for being easy to operate, having low capital costs and low energy consumptions. However, due to the complexity of heat and mass transfer phenomena involved in dehydration, there are still some gaps in the characterization and evaluation of its performance.

Therefore, this paper reports the development of a sludge drying bed dewatering processes mathematical model. Through mass and heat balance approaches, the mathematical model is used to predict the solids content of sludge along the dewatering process, given the prevailing meteorological conditions and the initial sludge characteristics. The efficiency of the proposed model was validated under different weather conditions, using data collected in a pilot installation set in wastewater treatment plant. The predictions obtained by the model showed good agreement with experimental work.

Key-words

Sludge drying beds, Sludge dewatering, Modeling, Performance evaluation

Índice

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento e relevância do tema	1
1.2	Objetivos da dissertação	2
1.3	Estrutura da dissertação.....	2
2	PRODUÇÃO, CARACTERÍSTICAS E TRATAMENTO DE LAMAS EM SISTEMAS DE SANEAMENTO	5
2.1	Origem e produção de lamas	5
2.2	Características das lamas	10
2.3	Tratamento de lamas	13
2.3.1	Processo de tratamento aplicáveis	13
2.3.2	Armazenamento, transporte e destino final de lamas de depuração.....	16
3	DESIDRATAÇÃO DE LAMAS EM LEITOS DE SECAGEM	19
3.1	Objetivos e fatores que influenciam a desidratação de lamas.....	19
3.2	Leitos de secagem de lamas.....	23
3.2.1	Descrição geral.....	23
3.2.2	Crítérios de dimensionamento e avaliação de desempenho de leitos de secagem	28
3.2.3	Ciclos de desidratação de lamas: duração e problemas operacionais	32
3.3	Síntese de estudos experimentais realizados em leitos de secagem	34
4	MODELAÇÃO DO PROCESSO DE DESIDRATAÇÃO DE LAMAS EM LEITOS DE SECAGEM.....	39
4.1	Fundamentos teóricos sobre transferência de calor e massa	39
4.2	Desenvolvimento do modelo	41
4.2.1	Considerações gerais.....	41
4.2.2	Balanço hídrico de massas	42
4.2.3	Balanço de energia térmica.....	45
4.2.4	Estimativa do teor de sólidos	46
5	CASO DE ESTUDO: INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAÇÃO DOS LEITOS DE SECAGEM.....	49
5.1	Instalação experimental	49
5.1.1	ETAR da Póvoa da Galega	49
5.1.2	Montagem da instalação piloto.....	49
5.2	Metodologia adotada.....	51
5.2.1	Recolha de amostras e medição de parâmetros em campo.....	51
5.2.2	Análise laboratorial das amostras	54
5.3	Resultados experimentais obtidos	57
5.3.1	Dados meteorológicos.....	57

5.3.2	Evolução do processo de desidratação das lamas, em cada ciclo.....	59
5.4	Modelação do desempenho dos leitos de secagem	70
5.4.1	Considerações gerais.....	70
5.4.2	Balanço de massas	70
5.4.3	Balanço energético.....	71
5.5	Análise comparativa dos resultados experimentais e obtidos por modelação	74
6	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO	78
	ANEXOS.....	A
	Anexo I - Unidades dos parâmetros e valores das constantes consideradas	B
	Anexo II - ETAR da Póvoa da Galega (estruturas de desidratação de lamas e localização da instalação piloto).....	C
	Anexo III - Resultados da modelação aplicada ao leito A do 3.º ciclo	D
	Anexo IV - Evolução do aspeto das lamas em cada leito, ao longo de cada ciclo.....	F

Lista de quadros

Quadro 1- Volume de lamas produzidas no tratamento de águas residuais. Adaptado de Andreoli <i>et al.</i> (2007).....	7
Quadro 2 - Descrição e intervalo de valores indicados das principais características das lamas. Adaptado de Andreoli <i>et al.</i> (2007) e Metcalf & Eddy (2003).....	12
Quadro 3 - Principais operações/processos e objetivos de cada etapa de tratamento de lamas. Adaptado de European Comission (2001) e Metcalf & Eddy (2003)	14
Quadro 4 - Intervalo de valores de taxa de carregamento de sólidos em leitos de secagem, para diferentes tipos de lama. Adaptado de Metcalf & Eddy (2003)	29
Quadro 5 - Intervalo de valores de área equivalente de leitos de secagem, para diferentes tipos de lama. Adaptado de Metcalf & Eddy (2003).....	29
Quadro 6 - Principais problemas operacionais que afetam a duração do ciclo de desidratação das lamas em leitos de secagem.....	33
Quadro 7 - Características iniciais das camadas de lamas depositadas em cada leito, em cada ciclo.	59
Quadro 8 - Valores dos parâmetros analisados nas amostras de escorrências do 1.º ciclo.....	61
Quadro 9 - Valores dos parâmetros analisados nas amostras de escorrências do 2.º ciclo.....	64
Quadro 10 - Características finais das camadas de lamas desidratadas em cada leito, em cada ciclo.	69

Lista de Figuras

Figura 1- Distribuição dos sólidos nas ARU. Adaptado de EPA (1997) e Sperling (2007).....	5
Figura 2 - Esquemática das etapas da linha de tratamento da fase líquida de uma ETAR e origem dos subprodutos sólidos.....	7
Figura 3 - Percentagem de utilização de sistemas de saneamento melhorado nos diversos países do mundo, em 2002 (UNESCO, 2006).....	9
Figura 4 - Representação qualitativa da taxa de remoção de água ao longo do processo de desidratação das lamas. Adaptado de Bennamoun (2012).....	20
Figura 5 - Representação gráfica da relação entre a remoção das diferentes frações de água presentes nas lamas, o teor de humidade, as características mecânicas das lamas, e redução de volume correspondente. Adaptado de Melo (2006).....	21
Figura 6 - Perfil esquemático de um leito de secagem de lamas convencional.	24
Figura 7 - Planta esquemática de um conjunto de leitos de secagem de lamas convencionais. Adaptado de Metcalf & Eddy (2003)	24
Figura 8- Espessura da camada de lamas, teor de sólidos e precipitação sobre as lamas ao longo do processo de drenagem. Adaptado de Mortara (2011)	26
Figura 9 - Representação esquemática do balanço hídrico de massas associado à desidratação de lamas em leitos de secagem.....	43
Figura 10 - Representação esquemática do balanço de energia térmica associado ao processo de desidratação de lamas em leitos de secagem	45
Figura 11 - Fluxograma esquemático do modelo de simulação desenvolvido.....	47
Figura 12 - Montagem dos leitos de secagem da instalação piloto e pormenor da torneira e recipiente de recolha e armazenamento da água drenada	49
Figura 13 - Materiais constituintes das diferentes camadas do meio de enchimento: a) brita grossa, b) seixo fino, c) areia, d) rede de proteção do orifício de drenagem.....	50
Figura 14 - Localização e pormenor da estação meteorológica portátil WS-GP1.....	50
Figura 15 - Carregamento do leito de secagem de lamas.....	51
Figura 16 - Recipientes de recolha das amostras de lamas e escorrências: a) frascos de vidro b) frasco de plástico c) saco de plástico.....	52
Figura 17 - Materiais utilizados para medição de parâmetros em campo: a) sonda YSI MPS b) tiras de medição de pH c) termómetro FANTAST	53
Figura 18 - Etapas do procedimento de análise de TS das lamas no LabAmbi.....	55
Figura 19 - Etapas do procedimento de análise de TS das lamas no Laboratório da Malveira	55
Figura 20 - Etapas do procedimento de análise de teor de sólido suspensos totais das escorrências no Laboratório da Malveira.....	55
Figura 21 - Etapas do procedimento de análise de carência química de oxigénio das escorrências no Laboratório da Malveira e no LabAmb	56
Figura 22 - Dados meteorológicos medidos ao longo do 1.º ciclo: a) valores médios diários da temperatura do ar (T_{ar}), da temperatura das lamas de cada leito (T_{sl}) e da radiação solar (R_{solar}) b)	

valores médios diários da humidade relativa do ar (HR) e valores acumulados da precipitação em cada dia (P)	58
Figura 23 - Dados meteorológicos medidos ao longo do 2.º ciclo: a) valores médios diários da temperatura do ar (T_{ar}), da temperatura das lamelas de cada leito (T_{sl}) e da radiação solar (R_{solar}) b) valores médios diários da humidade relativa do ar (HR) e valores acumulados da precipitação em cada dia (P)	58
Figura 24 - Dados meteorológicos medidos ao longo do 3.º ciclo: a) valores médios diários da temperatura do ar (T_{ar}), da temperatura das lamelas de cada leito (T_{sl}) e da radiação solar (R_{solar}) b) valores médios diários da humidade relativa do ar (HR) e valores acumulados da precipitação em cada dia (P)	58
Figura 25 - Evolução dos valores de TS e espessura da camada de lamelas no interior dos leitos de secagem piloto ao longo do 1.º ciclo: a) leito A, b) leito B	59
Figura 26 - Massa líquida drenada, acumulada ao longo do 1.º ciclo	60
Figura 27 - Leito A: a) saída de lamelas pelo sistema de drenagem após distorção acidental da parede do leito b) saída normal de escorrências, após retoma da forma inicial da parede do leito	61
Figura 28 - Evolução dos valores de TS e espessura da camada de lamelas no interior dos leitos de secagem piloto ao longo do 2.º ciclo: a) Leito A, b) leito C	62
Figura 29 - Camada de água acumulada no interior do leito de secagem piloto, no 35.º dia do 2.º ciclo	63
Figura 30 - Massa de água drenada acumulada ao longo do 2.º ciclo	64
Figura 31 - Evolução dos valores de TS e espessura da camada de lamelas no interior do leito de secagem A, ao longo do 3.º ciclo	65
Figura 32 - Massa de água drenada acumulada ao longo do 3.º ciclo	66
Figura 33 - Torrões formados pela fissuração e retração horizontal da camada de lamelas. a) 1.º ciclo; b) 3.º ciclo	66
Figura 34 - Evolução dos valores de teor de sólidos totais (TS) no interior dos leitos de secagem piloto ao longo dos vários ciclos, nos diferentes leitos	67
Figura 35 - Diferente aspeto entre a zona da camada de lamelas sem sombra e a zona sombreada ...	68
Figura 36 - Representação gráfica do balanço total de massas em cada ciclo	70
Figura 37 - Representação gráfica da aplicação das equações de transferência de calor ao longo dos diferentes ciclos, em cada leito: a) 1.º ciclo - leito A, b) 1.º ciclo - leito B, c) 2.º ciclo - leito A, d) 3.º ciclo - leito A	71
Figura 38 - Evolução dos valores de teor de sólidos totais (TS) das lamelas obtidos pelo modelo, ao longo dos vários ciclos, nos diferentes leitos	73
Figura 39 - Valores de teor de sólidos obtidos experimentalmente e previstos pela modelação: a) 1.º ciclo - leito A, b) 2.º ciclo - leito A, c) 3.º ciclo - leito A, d) 1.º ciclo - leito B	75

Lista de abreviaturas e símbolos

A_{sl} - Área da superfície de lamas

$C_{sólidos}$ - Concentração de sólidos

e_0 - Espessura inicial da camada de lamas aplicada

e_{sl} - Espessura inicial da camada de lamas

H_{fg} - Entalpia de vaporização

L_c - Comprimento característico

$m_{água}$ - Massa de água presente nas lamas

$m_{águadrenada}$ - Massa de água drenada das lamas

$m_{águaevaporada}$ - Massa de água evaporada da superfície de lamas

$m_{águaprecipitada}$ - Massa de água precipitada sobre o leite

m_{lamas} - Massa de lamas

m_{ST} - Massa de sólidos presentes nas lamas

P_{sl} - Perímetro da superfície de lamas

$Q_{absorção}$ - Taxa de energia absorvida (radiação) por um corpo

$Q_{convecção}$ - Taxa de energia transferida por convecção

$Q_{emissão}$ - Taxa de energia emitida (radiação) por um corpo

$Q_{evaporação}$ - Taxa de energia transferida por evaporação

$Q_{radiação}$ - Taxa de energia transferida por radiação

R_{solar} - Radiação solar incidente na superfície das lamas

t_{00} - Número de horas decorridas desde as 00h00

T_{ar} - Temperatura do ar

$T_{céu}$ - Temperatura equivalente do céu

T_{orv} - Temperatura de ponto de orvalho

T_{sl} - Temperatura da superfície das lamas

α_{sl} - Absortividade da superfície de lamas

ϵ_{atm} - Emissividade da atmosfera

ϵ_{sl} - Emissividade da superfície de lamas

ρ_0 - Massa volúmica da água

ρ_{lamas} - Massa volúmica das lamas

$\rho_{parcialv}$ - Pressão parcial do vapor de água presente no ar

ρ_v - Pressão de saturação, ou pressão de vapor, do vapor de água

α - Absortividade de um corpo

β - Coeficiente de expansão térmica por unidade de volume

ϵ - Emissividade de um corpo

ϑ - Viscosidade cinemática do fluido

σ - Constante de Stefan-Boltzmann

AdP - Águas de Portugal

AOX - Compostos orgânicos halogenados
APDA - Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas
AR - Águas residuais
ARU - Águas residuais urbanas
ATA - Águas do tejo Atlântico
CEAR - Comissões Especializada das Águas Residuais
CQO - Carência química de oxigénio
Cu - Cobre
D - Massa de água acumulada nos reservatórios de armazenamento de escorrências
ETAR - Estação de tratamento de águas residuais
g - Aceleração da gravidade na Terra
Gr - Número de Grashof
h - Coeficiente de transferência de calor
Hg - Mercúrio
HR - Humidade relativa do ar
IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera
k - Condutividade térmica de um fluído
LabAmb - Laboratório de ambiente do Instituto Superior Técnico
LabIST - Laboratório de análises do Instituto Superior Técnico
N - Azoto
Ni - Níquel
NMP - Número mais provável
Nu - Número de Nusselt
OD - Oxigénio dissolvido
P - Precipitação
PAH - Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
PALOP - Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa
Pb - Chumbo
PCB - Policlorobifenilos
PCDD/PCDF - Dioxinas/Furanos
PENSAAR 2020 - Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais 2020
Pr - Número de Prandtl
Ra - Número de Rayleigh
RSU - Resíduos sólidos urbanos
SD - Sólidos dissolvidos
SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SSF - Sólidos suspensos fixos
SST - Sólidos suspensos totais
SSV - Sólidos suspensos voláteis

T - Temperatura

t - Tempo

TH - Teor de humidade

TS - Teor de sólidos

US EPA - United States Environmental Protection Agency

Zn - Zinco

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e relevância do tema

As lamas de ETAR constituem um subproduto do tratamento de águas residuais. Com o aumento, durante o século XX, da construção de sistemas de drenagem e estações de tratamento, a produção deste tipo de resíduo aumentou significativamente. Face ao crescimento expectável dos sistemas de saneamento dos países em desenvolvimento, este aumento terá, nos próximos anos, tendência a agravar-se. De acordo com a European Commission (2008) e as Nações Unidas (2015), a problemática associada à produção e gestão de lamas fecais e de ETAR representa, possivelmente, um dos maiores desafios com que a engenharia sanitária se depara na atualidade.

Apesar dos potenciais inconvenientes associados às lamas, este subproduto não deve, numa perspetiva de economia circular, ser encarado como um resíduo a eliminar, uma vez que apresenta elevado potencial de valorização (PENSAAR 2020). É, por isso, fundamental dispor de instrumentos que permitam avaliar o desempenho dos processos de tratamento de lamas, com vista a uma gestão adequada das mesmas.

A par da higienização e estabilização da matéria orgânica, um dos principais objetivos do tratamento de lamas, com vista à sua valorização, consiste na redução do seu volume, tendo em conta o aumento de produção previsto. A desidratação das lamas produzidas constitui, assim, uma etapa essencial do processo de tratamento de lamas, possibilitando uma redução considerável do volume de lamas produzido, bem como a sua transformação num produto manuseável e fácil de transportar.

De entre os métodos de desidratação de lamas, os leitos de secagem afiguram-se como uma das técnicas mais eficazes, associada a custos reduzidos e simplicidade operacional. Os leitos de secagem têm sido utilizados para desidratação das lamas produzidas em estações de tratamento de águas para abastecimento e de águas residuais, em particular na Europa e nos EUA, desde o início do século XX. Desde então, este tem sido o método de desidratação de lamas mais utilizado em todo mundo, apresentando particular interesse para os países em desenvolvimento, face às condições climáticas normalmente associadas a essas regiões.

No entanto, e apesar de, recentemente, terem sido aplicados esforços notáveis no sentido de melhor caracterizar este método de desidratação, os critérios de dimensionamento existentes são ainda insuficientes e pouco definidos.

O processo de desidratação de lamas em leitos de secagem envolve fenómenos complexos de transferência de calor e massa, em simultâneo, pelo que é fundamental procurar compreender as reações físicas que controlam a drenagem e evaporação da água presente nas lamas, bem como os parâmetros que influenciam estes fenómenos.

No presente trabalho, foi desenvolvido um modelo de simulação destes processos através de uma aproximação do balanço hídrico de massas e do balanço energético que lhes estão associados. O

modelo desenvolvido pretende estimar a eficiência deste processo, prevendo valores de teor de sólidos ao longo dos ciclos de secagem de lamas. Foram, para isso, consideradas as condições meteorológicas, as dimensões dos leitos e as características das lamas a desidratar. Para efeitos de calibração do modelo desenvolvido, foram ainda realizados ensaios experimentais, numa instalação piloto de leitos de secagem de lamas, na ETAR da Póvoa da Galega. A instalação piloto incluiu ainda a montagem de uma estação meteorológica portátil. Entre setembro de 2016 e outubro de 2017, foram efetuados três ciclos de desidratação de lamas, diferindo entre eles nas condições meteorológicas registadas na espessura das camadas introduzidas no interior dos leitos e no valor de teor de sólidos inicial das lamas.

1.2 Objetivos da dissertação

A presente dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático de descrição do processo de desidratação natural das lamas em leitos de secagem, baseado no balanço hídrico de massas e no balanço energético associados a este processo, com vista à previsão dos valores de teor de sólidos das lamas ao longo tempo.

O trabalho desenvolvido inclui também uma análise do desempenho dos leitos de secagem de lamas produzidas em ETAR urbanas, com base em campanhas experimentais realizadas no decorrer de diversos ciclos de desidratação de lamas em leitos de secagem integrados numa instalação piloto, na ETAR da Póvoa da Galega. Os resultados experimentais assim obtidos são utilizados para calibração e verificação do modelo desenvolvido.

O estudo realizado, enquadra-se num projeto de investigação mais abrangente, cujo objetivo é a procura de soluções aplicáveis em países em vias de desenvolvimento, em particular no continente africano, nos quais o saneamento de cerca de 80% da população urbana é efetuado a seco, em latrinas ou fossas sépticas, com significativa produção de lamas fecais.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente documento é composto pelos capítulos 1 a 6 e anexos. Para além deste primeiro capítulo, em que é introduzida a temática em análise e os principais objetivos do trabalho desenvolvido, no capítulo 2 é descrita a problemática associada às lamas, fazendo referência aos processos em que têm origem e às tendências associadas à sua produção e gestão, a nível mundial. São também sucintamente descritas as características das lamas, bem como os processos de tratamento a que são usualmente sujeitas.

No capítulo 3 são fornecidas bases necessárias à compreensão do processo de desidratação natural das lamas de depuração e, em particular, da aplicabilidade dos leitos de secagem ao mesmo. São ainda referenciados alguns trabalhos desenvolvidos anteriormente a este, cujos ensaios experimentais e modelos matemáticos desenvolvidos contribuem também para a melhor definição dos critérios de dimensionamento e avaliação de desempenho dos leitos de secagem de lamas.

O modelo desenvolvido é apresentado no capítulo 4, em que são definidas as equações de balanço hídrico e energético em que se baseia, bem como os valores das constantes consideradas.

No capítulo 5 é apresentado o caso de estudo, incluindo a descrição dos procedimentos experimentais aplicados e apresentação dos resultados obtidos experimentalmente. É também feita a aplicação do modelo desenvolvido aos ciclos de desidratação realizados e são comparados os resultados assim obtidos e os determinados experimentalmente. Por fim, é feita a comparação entre estes resultados e a identificação dos aspetos a ter em conta, tanto no procedimento experimental como a nível da modelação, em trabalhos futuros.

No capítulo 6 são sintetizadas as conclusões inferidas acerca do desempenho dos leitos de secagem no processo de desidratação natural de lamas e da aplicabilidade do modelo matemático desenvolvido. São ainda identificados alguns aspetos a ter em conta, tanto no procedimento experimental como a nível da modelação, em trabalhos futuros.

2 PRODUÇÃO, CARACTERÍSTICAS E TRATAMENTO DE LAMAS EM SISTEMAS DE SANEAMENTO

2.1 Origem e produção de lamas

Em países desenvolvidos, servidos por sistemas de saneamento convencionais, a concepção de um sistema de tratamento de águas residuais é determinado por diversos fatores como as características quantitativas e qualitativas do afluente, a localização do sistema e os objetivos de qualidade que se pretendem impor. As características das águas residuais variam em função da sua origem, da localização geográfica e respetivo clima, da situação socioeconómica e dos hábitos das populações. As águas afluentes às ETAR resultam da combinação de efluentes oriundos de núcleos residenciais, estabelecimentos comerciais e industriais, e águas superficiais, subterrâneas e pluviais, pelo que se podem designar águas residuais urbanas.

Regra geral, as ARU apresentam uma relação de cerca de 99,9% de água para 0,1% de sólidos (Sperling, 2007). Na Figura 1 esquematiza-se a distribuição percentual dos sólidos das ARU. Como se observa nesta figura, as AR são compostas por cerca de 75% de sólidos orgânicos, representados pela fração volátil, e 25% de sólidos inorgânicos. Os sólidos suspensos totais podem ainda ser divididos em sedimentáveis e coloidais, representando cerca de 65% e 35% de SST, respetivamente.

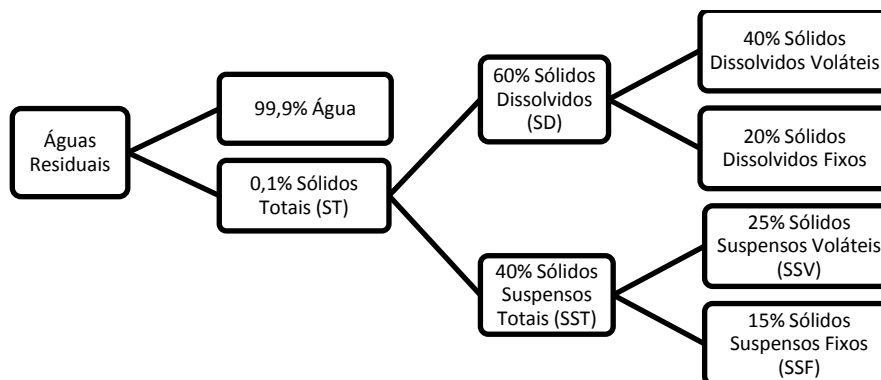


Figura 1- Distribuição dos sólidos nas ARU. Adaptado de EPA (1997) e Sperling (2007)

É nesta pequena fração sólida das AR que se encontram os componentes, orgânicos e inorgânicos, cuja concentração é necessária reduzir para que se cumpram os valores definidos na legislação em vigor (Decreto-Lei152/97 de 19 de junho, 1997).

Assim, o tratamento das AR que afluem às ETAR visa, sobretudo, separar a matéria sólida e reduzir a carga orgânica associada, através de operações físicas e processos químicos e/ou biológicos para que possam ser descarregadas no meio recetor sem riscos para o ambiente e saúde pública.

O funcionamento da ETAR compreende, então, o tratamento de uma fase líquida, na qual a matéria orgânica e mineral, suspensa e dissolvida, vai sendo progressivamente removida, e o tratamento de uma fase sólida, correspondente à estabilização dessa matéria.

O tratamento do afluente líquido integra, normalmente, um conjunto de processos e operações unitários de tratamento preliminar, tratamento primário e tratamento secundário, ou biológico, podendo ainda incluir processos adicionais de tratamento terciário.

No tratamento preliminar, ou pré-tratamento, predominam as operações físicas, com o objetivo de remover os sólidos de maiores dimensões, as areias, os óleos e as gorduras, de forma a proteger os órgãos, tubagens e equipamentos a jusante.

O tratamento primário envolve a decantação das partículas sólidas em suspensão, normalmente em operações físicas, embora possam ser adicionados produtos químicos, melhorando a capacidade de sedimentação e aumentando a eficiência dos processos. A massa de sólidos sedimentados acumulada no fundo do decantador constitui a denominada lama primária.

O tratamento secundário, também designado tratamento biológico, visa a remoção da matéria orgânica biodegradável, nomeadamente compostos orgânicos solúveis e coloidais e sólidos em suspensão, através de processos bioquímicos, caracterizados pela ação de microrganismos que se desenvolvem em condições ambientais adequadas. Estes processos podem ser aeróbios ou anaeróbios, conforme ocorram com ou sem a presença de oxigénio, respetivamente. Em ambos os casos, as águas residuais são misturadas com os microrganismos, que utilizam a matéria orgânica presente, degradando-a, no seu metabolismo. Esta população microbiana pode desenvolver-se dispersa no reator (sistemas de biomassa suspensa) ou fixa a um material de suporte inerte, como areia, pedra ou plástico (sistemas de biomassa fixa) (Metcalf & Eddy 2003).

Aos processos biológicos está ainda, normalmente, associado um decantador secundário, onde os sólidos coloidais em suspensão, incorporados em flocos durante os processos biológicos, são removidos, obtendo-se assim um efluente clarificado, estabilizado e com baixo teor em matéria orgânica e sólidos suspensos. A massa de sólidos acumulada no fundo do decantador constitui as lamas secundárias.

A linha de tratamento da fase líquida de uma ETAR pode ainda ser complementada por uma etapa de tratamento terciário, que se destina à remoção de poluentes específicos (tóxicos ou não biodegradáveis) ou de nutrientes que permaneçam nas águas residuais após o tratamento secundário. Nesta etapa são produzidas as lamas terciárias, por vezes denominadas lamas químicas.

Os constituintes removidos no tratamento da fase líquida da AR incluem os sólidos gradados, as areias, as escumas, e as lamas.

O diagrama da Figura 2 esquematiza a sequência das várias etapas do tratamento da fase líquida de uma ETAR, indicando as origens dos subprodutos sólidos referidos.

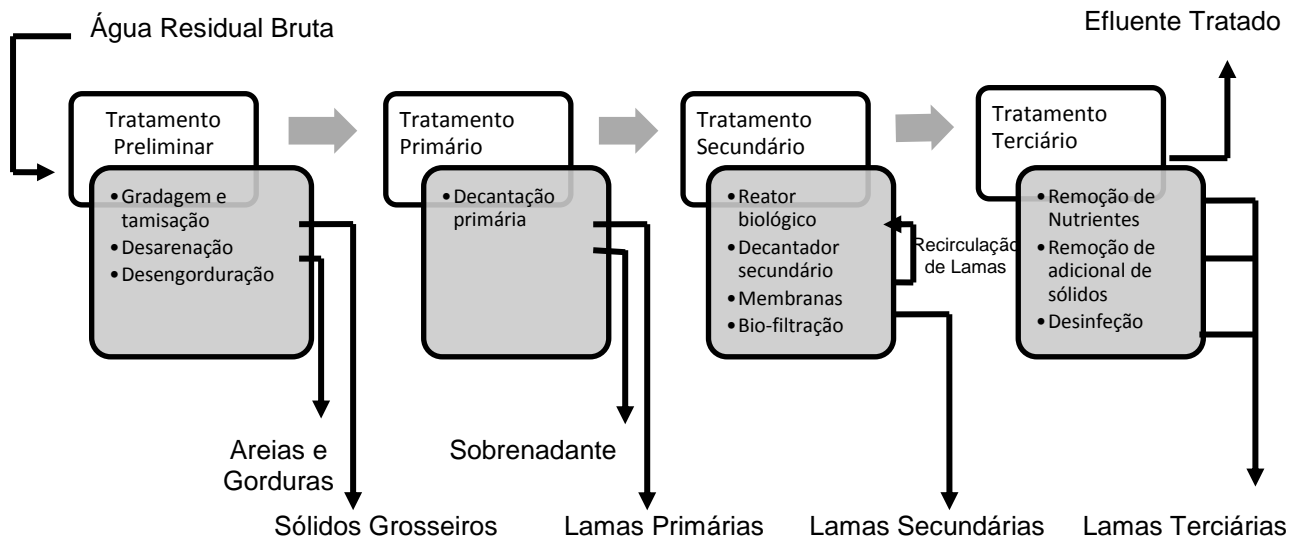


Figura 2 - Esquemática das etapas da linha de tratamento da fase líquida de uma ETAR e origem dos subprodutos sólidos

Pode então dizer-se que do tratamento da fase líquida de uma ETAR resultam fundamentalmente dois "produtos":

- Um efluente líquido, com concentrações reduzidas de poluentes, cuja descarga nos meios hídricos apresenta um impacto ambiental aceitável;
- Um produto semissólido, as lamas, que resulta da acumulação das substâncias poluentes da água residual e necessita, por isso, de tratamento antes de ser encaminhado para um destino final.

As características e a quantidade das lamas produzidas variam com a composição e volume da AR tratada, e com os processos e operações de tratamento aplicados na fase líquida. Genericamente, quanto maior for o nível de tratamento adotado na fase líquida, maior será a produção de lamas. No tratamento primário de AR, o volume de lamas produzido pode representar entre 0,25% a 0,35% do volume de AR tratada. No tratamento secundário da fase líquida, a produção de lama aumenta para cerca de 1,5% a 2% do volume de águas a tratar (Mackenzie, 2010). No Quadro 1 é apresentada a gama de volumes de lama tipicamente produzidos nos processos e operações unitários de tratamento da fase líquida mais comuns.

Quadro 1- Volume de lamas produzidas no tratamento de águas residuais. Adaptado de Andreoli *et al.* (2007)

Nível de tratamento	Operação/processo unitário	Volume de lama
		$\text{l.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$
Primário	Decantador primário convencional	0,6 - 2,2
	Lamas ativadas	3,1 - 8,2
Secundário	Arejamento prolongado	3,3 - 5,6
	Leitos percoladores	1,4 - 5,2
	Lagoas de estabilização	0,08 - 0,45

Com o aumento da população mundial, o desenvolvimento de novas tecnologias e as crescentes exigências ambientais das últimas décadas, têm-se verificado o desenvolvimento dos sistemas de saneamento e o aumento do número de ETAR. Como consequência, a produção de lamas, a nível mundial, tem vindo a aumentar significativamente.

A par deste aumento de produção, têm sido implementados, nos vários países, legislações e regulamentos mais exigentes no que respeita ao tratamento das lamas de ETAR, consequência da transposição da Diretiva n.º 86/278/CEE, de 12 de Junho, para o direito interno de cada estado-membro, com o objetivo de minimizar impactos sanitários e ambientais adversos.

No caso de Portugal, entre 2010 e 2012 a produção de lamas aumentou cerca de 122 mil toneladas. Segundo a Comissão Europeia (2017), as previsões apontam para que sejam produzidas, no ano de 2020, aproximadamente 750 mil toneladas de lamas, cerca de 4,6 vezes superior à quantidade de lamas produzidas em 2010 (162,68 mil toneladas). Em 2015, num debate acerca da Estratégia Nacional para o Sector das Lamas em Portugal organizado pela Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas (APDA), o coordenador da Comissão Especializada de Águas Residuais (CEAR), afirmou que a estimativa da produção de lamas de ETAR para esse ano, em Portugal, era de 450 mil toneladas (2,8 vezes superior à quantidade de lamas produzidas em 2010).

Embora, como referido acima, as lamas de depuração representem apenas 1 a 2% do volume total de AR tratadas, a sua gestão é altamente complexa e o custo associado atinge normalmente 40 a 50% dos custos totais de operação das ETAR (Turovskiy e Mathai, 2006).

O conceito de lamas de depuração, de acordo com a definição apresentada no Decreto-Lei n.º 276/2009 de 2 de outubro, que transpõe a diretiva supracitada para o direito interno português, pressupõe a existência de AR, uma vez que as lamas são entendidas como um produto proveniente do seu tratamento.

Nos países em desenvolvimento, ou subdesenvolvidos, o saneamento de uma parte muito significativa da população é efetuado a seco. Por esta razão, nestes países não se verifica a proporção água/sólidos evidenciada na Figura 1, sendo muito reduzida a percentagem de água associada aos sistemas de saneamento.

Para além disso, na maioria destes países o acesso a sistemas de saneamento melhorado é diminuto, como ilustra o mapa da Figura 3. Com efeito, verifica-se que na maioria dos países da África Subsaariana, em algumas zonas da Ásia e na Bolívia, menos de metade da população dispõe de sistemas de saneamento melhorado. Em Moçambique, país que apresenta, de entre os PALOP, as piores estatísticas em termos de condições de saneamento, apenas 31% da população urbana é servida por saneamento melhorado. No meio rural só 9% da população tem acesso a este tipo de instalações (Pinto *et al.*, 2014).

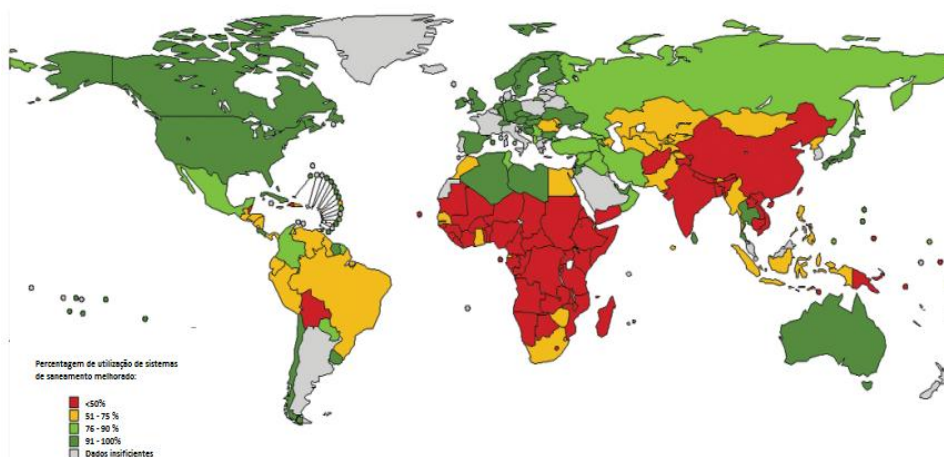


Figura 3 - Percentagem de utilização de sistemas de saneamento melhorado nos diversos países do mundo, em 2002 (UNESCO, 2006)

Na procura de soluções de saneamento ajustadas à realidade destes países, foram, em muitos casos, concebidas, nas últimas décadas, soluções de saneamento locais de baixo custo, supostamente provisórias, em que a coleta, reserva, tratamento e destino final de efluentes e/ou excreta ocorrem maioritariamente na própria origem ou junto da mesma. Têm sido também implementadas soluções "pseudo-locais", em que os efluentes são recolhidos e transportados até ao local adequado para receber tratamento complementar e, posteriormente, descarregados. É o caso geral das fossas sépticas e de algumas latrinas em zonas urbanas de elevada densidade, que necessitam de ser esvaziadas periodicamente.

Apesar do suposto carácter provisório, este é o tipo de sistema de saneamento mais utilizado em países em desenvolvimento, especialmente na África Subsaariana, onde 65 a 100% do saneamento em áreas urbanas é garantido por sistemas deste tipo (Hazel, 2015). As lamas provenientes destes sistemas de saneamento são denominadas lamas fecais e podem ser tratadas em conjunto com as lamas resultantes do tratamento de AR (co-tratamento) ou tratadas (i.e. estabilizadas e desidratadas) de forma separada.

A gestão de lamas nos países em desenvolvimento integra, assim, questões económicas, técnicas e socioculturais muito diferentes da usual abordagem dos países desenvolvidos. De acordo com Moiambo *et al.* (2016), face à descentralização das soluções de saneamento adotadas, nestes países a gestão de lamas fecais integra as etapas de captação e armazenamento, esvaziamento e transporte e tratamento e disposição final. No entanto, este autor alerta para o facto de o tratamento das lamas ser ainda insuficiente, sendo diariamente depositadas em contentores destinados RSU ou utilizadas na agricultura sem qualquer tratamento prévio. Para que os sistemas de gestão definidos sejam realmente vantajosos, é, então, necessário o estabelecimento de uma cadeia de serviços integrada e dinâmica. O mesmo autor sugere ainda que as soluções a considerar devem apresentar baixos custos de investimento e operacionais, um nível de mecanização reduzido e a mínima necessidade de energia externa, bem como ser compatíveis com os meios de captação e transporte disponíveis.

Perante o paradigma mundial descrito, considerando a elevada densidade populacional destes países, o aumento da produção de lamas terá, naturalmente, tendência a agravar-se nos próximos anos, com o desenvolvimento dos sistemas de saneamento e gestão de lamas. Este aumento está a criar um problema ambiental cada vez maior, sendo o destino final das lamas produzidas nas várias etapas do tratamento das AR e nos sistemas de saneamento locais e pseudo-locais uma preocupação que tem vindo a aumentar.

O atual contexto político-ambiental assenta na necessidade crescente da consideração de soluções que promovam o desenvolvimento sustentável e a gestão integrada do ciclo de vida dos produtos, advertindo particularmente para a questão da valorização dos subprodutos gerados. As lamas não devem, por isso, ser encaradas como um resíduo, mas antes como um recurso, devendo, ser explorada a sua reutilização, sempre que viável, melhorando a eficiência económica e ambiental do ciclo urbano da água (PENSAAR 2020). No entanto, a variabilidade das características e quantidades exigem a consideração de diferentes tipos de estratégias e, apesar de existirem diversas opções de valorização possíveis, nem todas as soluções são tecnicamente viáveis, com relações custo-benefício vantajosas ou isentas de implicações ambientais.

Diante estas considerações, é imprescindível a adoção de uma abordagem integrada de todo o sistema de processamento de lamas, visando simultaneamente a redução do seu volume, a estabilização da matéria orgânica e, sempre que possível, a sua valorização orgânica e/ou energética.

A gestão das lamas é, assim, uma atividade altamente complexa e dispendiosa que, se negligenciada, pode prejudicar as vantagens ambientais e sanitárias esperadas nos sistemas de tratamento. A problemática associada às lamas representa, possivelmente, um dos maiores desafios com que a engenharia sanitária se depara na atualidade (Nações Unidas 2005).

Embora a aplicação dos leitos de secagem e da modelação desenvolvida no decorrer deste trabalho tenha também interesse num contexto de lamas fecais, em particular nos países em desenvolvimento, a presente dissertação é especialmente dedicada à sua aplicação a lamas de depuração, produzidas em ETAR urbanas. Por esta razão, nos capítulos que se seguem, sempre que se utilizar o termo genérico "lamas", faz-se referência às lamas produzidas em ETAR.

2.2 Características das lamas

Durante o tratamento de AR em ETAR, são produzidas lamas, que resultam essencialmente da acumulação dos produtos em suspensão no afluente e do crescimento de microrganismos durante o tratamento da fase líquida.

As características (físicas, químicas e microbiológicas) e quantidades das lamas produzidas variam em função da composição e quantidade das águas residuais de que provêm e dos processos e operações de tratamento definidos na linha de tratamento do afluente líquido. Estas características alteram-se, ainda, ao longo da linha de tratamento da fase sólida.

Assim, a composição das lamas varia de ETAR para ETAR e, na mesma estação de tratamento, pode apresentar alterações sazonais, refletindo a variabilidade das características e quantidades das águas residuais afluentes à ETAR ao longo do tempo (descargas industriais pontuais, caudais de tempestade, etc.).

Em termos genéricos, pode dizer-se que as lamas são um produto semissólido com elevado teor de humidade e matéria orgânica (Metcalf & Eddy 2003). Apresentam também quantidades consideráveis de nutrientes e microrganismos patogénicos. Na sua composição, podem ainda ser encontradas concentrações vestigiais, mas que não devem ser desprezadas, de metais pesados e outros compostos tóxicos. Do ponto de vista mecânico, assemelham-se a um fluido não-newtoniano com propriedades reológicas, (Turovskiy e Mathai, 2006).

No Quadro 2, descrevem-se sucintamente as principais características das lamas. Neste quadro são ainda indicados os intervalos de valores tipicamente observados nas lamas, correspondentes a cada parâmetro/característica ou aos respetivos indicadores. A variação destes valores está relacionada com as diferentes características das AR e os diferentes processos de tratamento da linha de fase líquida de que provêm as lamas primárias e secundárias.

Na secção anterior, foram indicadas as diferentes origens das lamas de depuração num sistema de tratamento convencional de águas residuais. Genericamente, podem então obter-se numa ETAR lamas primárias, recolhidas no decantador primário, lamas secundárias ou biológicas, resultantes dos processos de tratamento biológico, normalmente removidas após a decantação secundária, e terciárias ou químicas, consequentes dos processos de tratamento terciário.

As lamas primárias são muitas vezes misturadas com as secundárias, sendo processadas conjuntamente. À combinação destes dois tipos de lamas é normalmente dada a designação de lamas mistas.

Quadro 2 - Descrição e intervalo de valores indicados das principais características das lamas. Adaptado de Andreoli *et al.* (2007) e Metcalf & Eddy (2003)

Parâmetro	Descrição	Valores ⁽¹⁾		
Teor de sólidos	Percentagem de sólidos totais presentes nas lamas - razão entre a massa de sólidos e a massa total de lamas. A matéria sólida pode estar presente nas lamas sob a forma dissolvida ou encontrar-se em suspensão. Tanto os sólidos suspensos como os dissolvidos podem ainda ser divididos em sólidos inorgânicos, ou fixos, e sólidos orgânicos, ou voláteis (Andreoli et al, 2007)	Lamas primárias	5 - 9 %	
		Lamas secundárias	0,8- 2 %	
Matéria orgânica	Do total de sólidos existentes nas lamas, suspensos e dissolvidos, provenientes do tratamento de águas residuais convencional, aproximadamente 70% são orgânicos, ou voláteis, sendo os restantes 30% constituídos por matéria inorgânica (Sousa, 2005). A razão entre os SV e os ST constitui um indicador da fração orgânica da matéria existente nas lamas, e, conseqüentemente, do nível de estabilização das mesmas. Esta fração orgânica é geralmente constituída por sólidos solúveis, como hidrocarbonetos, aminoácidos e pequenas porções de proteínas e lípidos, existindo apenas um pequeno teor em lenhina e celulose na sua composição (European Comission, 2001). Os sólidos orgânicos presentes nas lamas provêm, essencialmente, da matéria fecal humana, cabelos, fibras celulares, resíduos de alimentos e produtos de higiene, óleos e gorduras, presentes nas águas residuais que afluem à ETAR.	Lamas primárias ⁽²⁾	60 - 80 %TS	
		Lamas secundárias ⁽²⁾	59 - 88 %TS	
Densidade e massa volúmica	A densidade, ou massa volúmica relativa, representa a razão entre a massa volúmica das lamas e a massa volúmica de um material de referência, no caso a água. A densidade dos sólidos presentes nas lamas representa a razão entre a massa volúmica dos sólidos secos totais e a massa volúmica da água	Lamas primárias	sólidos	1,14 - 1,18
			lamas	1,003 - 1,010
		Lamas secundárias	sólidos	0,55 - 0,8
			lamas	1,001 - 1,010
Concentração de sólidos	A concentração de sólidos nas lamas, expressa em unidades de massa de sólidos por unidade de volume de lamas, corresponde ao produto do TS das lamas, em %, pela massa volúmica das mesmas	Lamas primárias	20,06 - 60,6 kgST.m ⁻³	
		Lamas secundárias	6 - 61,2 kgST.m ⁻³	
Nutrientes	O azoto e o fósforo, são os nutrientes que se encontram em maior concentração nas lamas. As concentrações de nutrientes e a forma química em que se encontram variam significativamente com o tipo de tratamento das águas residuais, com o tratamento da própria lama e com a solubilidade dos elementos. Em ETAR que incluam, na linha de fase líquida, tratamento terciário específico para remoção deste nutriente, a sua concentração nas lamas será, naturalmente, superior. Uma vez que é na fração líquida das lamas que se encontra a maior quantidade destes nutrientes pelo que a sua concentração sofre uma grande redução após os processos de espessamento e desidratação, em que parte dessa fração é removida	Lamas primárias	Azoto	1,5 - 4 %TS
			Fósforo	0,8 - 2,8 %TS
		Lamas secundárias	Azoto	2,4 - 5 %TS
			Fósforo	2,8 - 11 %TS
Metais pesados	Embora as AR domésticas apresentem normalmente reduzidas concentrações de metais pesados, a sua mistura com as águas pluviais, em particular escorrências sobre pavimentos rodoviários, e com as águas residuais industriais, leva a que as ARU que afluem às ETAR apresentem quantidades não desprezáveis desses elementos. Ao longo do tratamento da fase líquida, os metais pesados são removidos do afluente, ficando retidos nas lamas. Em determinadas concentrações, a sua presença pode constituir um entrave à valorização das lamas, nomeadamente à sua aplicação no solo, uma vez que podem afetar o processo de crescimento das plantas, deteriorar as propriedades do solo, inibir a atividade benéfica dos microrganismos e prejudicar gravemente o equilíbrio ambiental e saúde humana	Cd	1 - 3410 mg.kg ⁻¹	
		Cr	10 - 99000 mg.kg ⁻¹	
		Cu	84 - 17000 mg.kg ⁻¹	
		Hg	0,6 - 56 mg.kg ⁻¹	
		Ni	2 - 5300 mg.kg ⁻¹	
		Pb	13 - 96000 mg.kg ⁻¹	
		Zn	101 - 49000 mg.kg ⁻¹	
Contaminantes químicos orgânicos	Estes compostos podem ter origens diversas, desde simples resíduos domésticos a produtos farmacêuticos complexos. Nas lamas, onde apresentam, naturalmente, concentrações superiores às observadas no afluente líquido de que derivam (Barbosa, 2008). Os compostos orgânicos tóxicos comumente encontrados são os pesticidas organoclorados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), os compostos orgânicos halogenados (AOX), as dioxinas e os furanos (PCDD/F) e os policlorobifenilos (PCB).			

⁽¹⁾ Os valores apresentados correspondem a lamas não tratadas

⁽²⁾ Os valores apresentados correspondem à razão entre os SV e os ST.

2.3 Tratamento de lamas

Face à composição descrita, para que o seu armazenamento, transporte e destino final sejam técnica e economicamente viáveis, as lamas devem ser sujeitas a um tratamento adequado e cuidadosamente definido, tendo em conta a complexidade e os custos associados à sua gestão. A seleção dos processos e operações que compõem a linha de tratamento de lamas deve, então, ser função de um conjunto de critérios que integram considerações técnicas e económicas, nomeadamente: a natureza da lama a tratar, a legislação aplicável, o contexto local, o teor final de sólidos e o grau de estabilização pretendidos, de acordo com o destino final definido, e os custos de investimento e exploração associados (Mano, 1997).

2.3.1 Processo de tratamento aplicáveis

Os principais objetivos do tratamento de lamas são, assim:

- A redução do seu volume, através da diminuição do teor de humidade, à qual está naturalmente associada a diminuição dos custos de armazenamento e transporte. A redução da quantidade de água nas lamas possibilita ainda o aumento do seu poder calorífico, mais-valia no caso de se pretender a sua valorização energética;
- A redução da sua capacidade de fermentação, contribuindo para a minimização da libertação de odores desagradáveis e da quantidade de microrganismos patogénicos presente. Esta estabilização das lamas permite reduzir os efeitos ambientais adversos e os riscos para a saúde pública associados à sua deposição ou valorização.

Regra geral, de forma a atingir estes objetivos, uma linha de tratamento convencional de lamas de ETAR compreende uma etapa de tratamento preliminar, a que se segue o espessamento das lamas, a sua estabilização e a desidratação, por vezes precedida pelo seu condicionamento. Adicionalmente, podem estar previstas as etapas de secagem e/ou desinfeção das lamas.

No Quadro 3 definem-se os principais objetivos e os processos e operações mais utilizados em cada uma destas etapas, bem como as principais vantagens associadas.

Constituindo a desidratação de lamas em leitos de secagem o objeto de estudo principal da presente dissertação, no capítulo 3 são descritos com maior pormenor os objetivos e os fatores que influenciam este processo.

Quadro 3 - Principais operações/processos e objetivos de cada etapa de tratamento de lamas. Adaptado de European Commission (2001) e Metcalf & Eddy (2003)

Operação/Processo de tratamento unitário	Objetivo	Principais vantagens	TS(%) ⁽¹⁾	
Tratamento preliminar				
Trituração	Desintegração parcial do material filamentosos e de maiores dimensões	Diminuição do risco de obstrução, entupimento ou envolvimento dos equipamentos a jusante	(2)	
Gradagem	Remoção dos sólidos de maiores dimensões, areias e materiais fibrosos remanescentes			
Homogeneização	Mistura e uniformização das lamas. Nalgumas estações de tratamento a homogeneização das lamas pode ocorrer apenas após o seu espessamento	Facilitamento do tratamento posterior, aumentando a eficiência dos processos subsequentes, em particular da desidratação		
Armazenamento	Reserva e atenuação de flutuações de na produção de lamas nos processos de tratamento da fase líquida	Uniformização do caudal de lamas a tratar ao longo do tempo e possível acumulação em situações de inoperacionalidade dos restantes processos de tratamento		
Espessamento				
Espessamento gravítico	Aumento da concentração de sólidos das lamas, através da remoção de parte da fração líquida, com consequente diminuição do seu volume e obtenção da densidade, estrutura e TS adequados aos processos subsequentes	Simplicidade do método	2 - 10	
		Dispensa de adição de reagentes químicos		
		Custos de operação reduzidos		
Espessamento por flotação de ar dissolvido		Eficiência elevada em lamas primárias	3 - 6	
		Equipamento compacto, com capacidade de retenção de odores		
Espessamento por Centrifugas		Possibilidade de operação automática	Equipamento compacto, com capacidade de retenção de odores	3 - 8
	Possibilidade de operação automática			
	Custo de investimento relativamente reduzido			
	Boa relação área necessária/eficiência			
Estabilização				
Compostagem ⁽³⁾	Redução da quantidade de microrganismos patogénicos presentes nas lamas, eliminação de odores ofensivos e inibição, redução ou eliminação do potencial de putrefação, através da digestão da matéria orgânica ou da inibição das reações biológicas	Aumento do valor de TS das lamas	2 - 5	
Estabilização alcalina ⁽³⁾		Aumento do valor de pH das lamas para valores favoráveis à aplicação em solos		
		Facilidade operacional		
		Custos de operação reduzidos		
Digestão anaeróbia		Robustez do método		Aplicabilidade alargada a pequenos e grandes sistemas (desde fossas sépticas domésticas a ETAR urbanas)
		Produção de biogás reaproveitável		
		Facilidade operacional		
Digestão aeróbia		Custos de implantação reduzidos		Obtenção de um produto final (lamas estabilizadas) inodoro e com elevado poder fertilizante
	Produção de um sobrenadante clarificado			

Quadro 3 - Principais operações/processos e objetivos de cada etapa de tratamento de lamas. Adaptado de European Commission (2001) e Metcalf & Eddy (2003) (cont.)

Operação/Processo de tratamento unitário	Objetivo	Principais vantagens	TS(%) ⁽¹⁾
Condicionamento			
Condicionamento químico	Melhoria da estrutura e das características de separação das fases sólida e líquida das lamas	Promove o aumento do valor de TS das lamas	. ⁽⁴⁾
Condicionamento térmico		Promove a desinfecção das lamas e a diminuição do potencial de putrefação e da libertação de odores desagradáveis	
Desidratação			
Centrífugas	Remoção adicional de água e, conseqüentemente, do volume das lamas	Todas as acima indicadas	10 - 35
Filtros banda		Possibilidade de instalação em série de forma a realizar o espessamento numa 1ª fase e a desidratação na seguinte	
Filtros prensa		Custos de investimento e operação relativamente baixos	15 - 30
		Produção de um filtrado relativamente clarificado	
Lagoas de secagem	Reduzida necessidade de condicionantes química, comparativamente aos filtros banda	20 - 50	
	Produção de um filtrado clarificado		
Leitos de secagem	Elevado grau de estabilização da matéria orgânica	25 - 30	
	Reduzida necessidade de manutenção		
	Custos de investimento reduzidos, onde há disponibilidade de terreno		
	Consumo energético reduzido ou nulo		
	Consumo de condicionantes químicos reduzidos ou nulo	30 - 40	
	Custos de investimento reduzidos, onde há disponibilidade de área		
	Consumo energético reduzido ou nulo		
	Consumo de condicionantes químicos reduzido ou nulo		
		Facilidade operacional e dispensa de operadores especializados e exclusivos	
		Reduzida sensibilidade à variação das características das lamas	
Desinfecção			
Desinfecção química	Redução adicional de organismos patogénicos	Obtenção de um produto final higienizado	. ⁽⁵⁾
Secagem térmica			
Direta	Redução adicional de volume	Elevado grau de estabilização da matéria orgânica	90 - 95
Indireta		Aumento do poder calorífico das lamas	

⁽¹⁾Valores indicados em Metcalf & Eddy (2003)

⁽²⁾ Sendo prévios ao tratamento de lamas propriamente dito, o valor de TS das lamas após estes processos não é normalmente caracterizado

⁽³⁾ Esta operação de estabilização ocorre normalmente após a desidratação das lamas, pelo que os valores de TS obtidos após a sua aplicação podem ser bastante superiores aos indicados

⁽⁴⁾ Uma vez que o objetivo do condicionamento é a correção das propriedades das lamas, com vista a melhor eficiência dos processos subsequentes, não faz sentido caracterizar valores de TS obtidos nesta etapa

⁽⁵⁾ O valor de TS das lamas após estes processos não é normalmente caracterizado

2.3.2 Armazenamento, transporte e destino final de lamas de depuração

A otimização de um sistema de tratamento de lamas de ETAR engloba não só o correto dimensionamento das operações unitárias que compõem a linha de tratamento como o planeamento das etapas que intermedeiam o tratamento e o destino final pretendido.

Habitualmente, após a sua desidratação, as lamas são armazenadas em silos, tanques ou leiras, consoante a consistência obtida, onde aguardam transporte para o destino final pretendido. Dentro das estações de tratamento, o transporte das lamas pode ser feito de forma mecânica, por bombagem, tapetes rolantes e pequenos veículos (tratores/bobcats), ou manual, com recurso a pá e carro de mão, dependendo do seu valor de TS. Para longas distâncias, podem equacionar-se o transporte por camião, o transporte ferroviário ou, para distâncias intermédias, a bombagem. O transporte das lamas, sobretudo a longas distâncias, representa uma fração significativa dos custos de operação das estações de tratamento, pelo que esta etapa deve ser alvo de um planeamento cuidado. A escolha do sistema de transporte mais adequado está dependente da quantidade, características e consistência das lamas a transportar, da extensão e flexibilidade do percurso, da disponibilidade de meios de transporte nesse percurso e da vida útil do local de destino final das lamas.

Tendo em conta o paradigma mundial retratado, a definição do destino final adequado afigura-se como uma das principais preocupações no processo de gestão de lamas. Numa perspetiva de economia circular, em que se enquadra o nexus água-energia, a consideração de soluções com vista à criação de valor a partir das lamas tratadas impõe-se como uma prioridade incontornável devendo ser privilegiadas em detrimento da sua eliminação, que apenas deve ser considerada quando as características das lamas inviabilizem a sua valorização (Andreoli *et al.*, 2007).

Os impactos ambientais relativos a cada opção de destino final podem ser mais ou menos complexos, dependendo da quantidade de lama, das suas características e da frequência, duração e extensão da sua aplicação. Nesse sentido, tem sido redigida e implementada legislação diversa, com o objetivo de regulamentar e definir limites de poluentes para cada possibilidade de disposição final ou valorização das lamas.

A reutilização como fertilizante agrícola, tirando partido do teor de matéria orgânica e nutrientes já apontado, é a forma mais comum de valorização das lamas. A aplicação de lamas nos solos agrícolas melhora as suas propriedades físicas, estrutura e capacidade de retenção de água e minerais. O valor agrícola das lamas é geralmente avaliado com base no seu teor em nutrientes (Metcalf & Eddy, 2003). A principal limitação à sua aplicação como fertilizante nos solos agrícolas prende-se com a eventual presença de microrganismos patogénicos, elementos metálicos e contaminantes químicos orgânicos, pelo que, para que esta opção seja viável, as lamas têm de ser estabilizadas. Os valores limite de concentração de metais pesados aceitáveis nas lamas de depuração, esta matéria encontra-se já regulamentada na maioria dos países desenvolvidos e nalguns países em desenvolvimento. Os problemas normalmente associados à aplicação indevida

das lamas nos solos agrícolas são a ocorrência de lixiviados contaminados, com consequente contaminação das águas subterrâneas, a absorção de patogênicos e contaminantes pelas plantas e a volatilização dos mesmos, permitindo consequentemente que entrem e se acumulem na cadeia alimentar.

Do ponto de vista dos custos associados, a aplicação agrícola tem sido e ainda se mantém como o destino final de valor mais baixo, embora possa existir um sentimento de desconfiança quanto à aplicação de lamas de ETAR na agricultura, devido aos potenciais problemas acima referidos (PENSAAR 2020). A valorização agrícola das lamas é, assim, condicionada por diversos fatores, que incluem, para além das próprias características, as propriedades dos solos, a extensão de terreno a receber lamas, os custos de transporte e aplicação e a profundidade do nível freático. A existência de mão de obra, o tipo de cultura praticada e a sua aptidão para receber lamas também devem ser tidos em conta.

As lamas podem também ser utilizadas nos solos como corretivos de outras propriedades, uma vez que a aplicação de lamas nos solos promove a infiltração, reduzindo o escoamento superficial, diminuindo o potencial de erosão. A recuperação de taludes, o encerramento de pedreiras, a reparação de fendas no solo e o recobrimento de aterros sanitários constituem assim também alternativas de valorização das lamas de depuração (Sousa, 2005).

Outras possibilidades existentes para valorização das lamas, menos comuns que as anteriores abordagens de aplicação nos solos, são a sua integração como matéria prima no processo de fabrico de alguns materiais de construção cerâmicos e a sua utilização como combustíveis, tomando partido do seu poder calorífico.

A incineração das lamas é um processo que consiste na volatilização e destruição, a altas temperaturas, dos compostos orgânicos presentes nas lamas, depois de desidratadas. Embora apresentada pela maioria dos autores como uma opção de destino final para as lamas, a incineração não o será na íntegra, uma vez que deste processo resultam ainda alguns resíduos, como as cinzas e os efluentes gasosos, que carecem de tratamento.

A deposição em aterro é uma opção de destino final de lamas que deve apenas ser considerada quando as suas características não sejam adequadas para uma das opções acima descritas. Nas palavras de Rasquilha (2010), "esta é uma prática que se encontra condenada em toda a Europa (...) pois cada vez existem mais limites legislativos quanto à descarga de materiais, recicláveis ou valorizáveis por estas vias, nomeadamente as lamas de estações de tratamento de águas residuais". Para além de impossibilitar o aproveitamento dos constituintes das lamas tratadas, a deposição das lamas em aterro representa um risco de contaminação das águas subterrâneas, por ocorrência de lixiviados, bem como libertação de odores desagradáveis, consequência do desenvolvimento de condições anaeróbias e sépticas.

Por fim, a descarga de lamas nos recursos hídricos foi proibida, na Europa, há já quase duas décadas, de acordo com a Diretiva do Conselho nº 91/271CEE de 21 de maio, 1991.

Nas últimas décadas tem-se, assim, assistido a uma consideração crescente da importância do correto planeamento e gestão das ETAR em função do destino final pretendido para as lamas, dando preferência às opções que permitem a sua valorização. No entanto, na maior parte dos países em desenvolvimento, este aspeto tem sido negligenciado, pelo que têm sido muitas vezes adotados destinos finais inadequados, reduzindo consideravelmente os benefícios esperados dos sistemas de saneamento.

Embora a reutilização de lamas na agricultura seja já uma prática em muitos destes países, é ainda uma atividade pouco controlada, podendo representar sérios riscos ambientais e de saúde pública. É, por isso, fundamental que se desenvolvam, nestes países, estratégias de gestão dos sistemas de processamento de lamas (Hazel, 2015). Estes sistemas devem ser simultaneamente eficazes no seu tratamento, baratos e simples, do ponto de vista operacional, por forma a tornar viável a sua manutenção a médio-longo prazo. De acordo com estes requisitos, os leitos de secagem apresentam-se como um processo robusto e fiável, baseado em processos naturais, conforme se descreve no capítulo seguinte.

3 DESIDRATAÇÃO DE LAMAS EM LEITOS DE SECAGEM

3.1 Objetivos e fatores que influenciam a desidratação de lamas

Como indica o Quadro 3, apresentado no capítulo anterior, a desidratação de lamas consiste essencialmente na remoção de uma maior fração da água presente nas lamas, com vista a uma redução de volume superior à obtida através do processo anterior de espessamento (Turovskiy e Mathai, 2006).

Face ao elevado teor de água das lamas produzidas, a desidratação apresenta-se como uma etapa vantajosa, ou mesmo indispensável, seja qual for o destino final previsto para as lamas, possibilitando, para além dos objetivos supracitados, de acordo com Metcalf & Eddy (2003):

- A redução substancial dos custos inerentes ao armazenamento, transporte e disposição final, consequência da redução de volume e de peso associadas à remoção de água;
- A melhoria das condições de manuseamento e transporte das lamas uma vez que o comportamento mecânico das lamas é altamente influenciado pelo seu TH;
- O aumento do poder calorífico das lamas, sendo necessária menos energia para o seu aquecimento, o que constitui uma vantagem, caso se pretenda a sua inceneração ou valorização energética;
- A redução da necessidade de adição de reagentes nos processos de tratamento subsequentes, mais valia caso se preveja a compostagem das lamas;
- A redução do potencial de putrefação das lamas, libertação de odores e proliferação de insetos, consequência da diminuição do TH das lamas;
- A redução da produção de lixiviados, quando as lamas são depositadas em aterro.

As lamas podem ser desidratadas através de processos naturais, baseados nos fenómenos de evaporação e percolação, ou por sistemas mecânicos, em dispositivos que requerem energia externa e promovem a filtração, compressão, separação centrífuga e compactação.

Comparativamente, os processos naturais, mais simples e baratos, requerem mais tempo e maior disponibilidade de área, enquanto os sistemas mecânicos, mais caros, são mais compactos e sofisticados, tanto do ponto de vista operacional como de manutenção (Sperling, 2007). Com efeito, enquanto nos processos mecânicos as lamas são desidratadas em algumas horas, a desidratação por processos naturais pode levar dias, ou mesmo meses (Carneiro, 2007). Os processos naturais de desidratação de lamas mais utilizados são as lagoas e os leitos de secagem.

A seleção do método de desidratação mais adequado deve ser função do tipo e quantidade de lamas a ser desidratado, do espaço disponível e da adequabilidade das lamas desidratadas face ao destino final pretendido (Turovskiy e Mathai, 2006).

Para uma melhor compreensão dos processos de separação das fases sólida e líquida, importa distinguir as diferentes formas de ligação entre a água e as partículas sólidas presentes nas lamas.

Segundo Spellman (2003), de acordo com as forças intermoleculares responsáveis por esta ligação e a facilidade de separação das partículas sólidas, a água presente nas lamas pode ser classificada como:

- Água livre: fração de água que não está ligada às partículas sólidas das lamas, circulando livremente e sem interação com as mesmas, sendo facilmente removida por forças gravíticas, em processos de decantação ou filtração simples. Esta fração representa habitualmente cerca de 75% do volume de lamas não tratadas;
- Água intersticial: a fração de água que existe entre as partículas sólidas, mantendo-se nos seus interstícios através de forças de capilaridade, representando cerca de 20% do volume de lamas não tratadas. Pode ser removida mediante a aplicação de forças mecânicas, por mudanças de fase ou através de processos de floculação;
- Água adsorvida ou de superfície: fração de água que cobre as superfícies das partículas sólidas, fortemente ligada a estas por forças adsorventes, sem possibilidade de se mover livremente. Representa apenas 2% do volume de lamas não tratadas. Pode também ser removida mediante aplicação de forças mecânicas;
- Água intracelular: fração de água contida no interior das células, representando cerca de 2,5% do volume de lamas brutas. Para a sua remoção é necessária a destruição da estrutura celular, através de processos térmicos, com alteração do estado de agregação das moléculas de água, ou seja, mudança de fase (congelamento ou vaporização), ou combustão.

Em virtude das diferentes facilidades de remoção das frações de água acima descritas, ao longo do processo de desidratação das lamas a velocidade de remoção de água é também variável. Este fenómeno é evidenciado na Figura 4, que apresenta, qualitativamente, as diferentes taxas de desidratação associadas à remoção das frações de água livre, intersticial, adsorvida e intracelular.

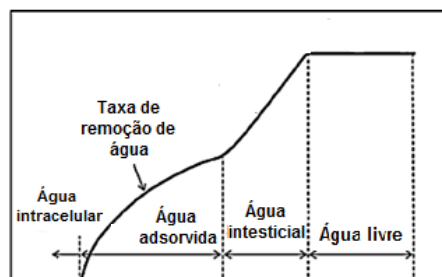


Figura 4 - Representação qualitativa da taxa de remoção de água ao longo do processo de desidratação das lamas. Adaptado de Bennamoun (2012)

De acordo com esta figura, após a remoção, a uma velocidade mais ou menos constante, da água livre presente nas lamas, fácil de remover, ocorre uma primeira queda na taxa de desidratação das lamas, associada à remoção da água intersticial, mais complexa devido à sua aderência, entre os sólidos, por forças capilares. A segunda queda na taxa de remoção de água das lamas, menos acentuada, está associada à remoção da água adsorvida, ou de superfície, que se distingue da intersticial por não serem necessárias forças mecânicas tão elevadas para a sua remoção. O último

troço da curva, novamente em queda acentuada, mas num intervalo mais curto, corresponde à remoção da água intracelular.

A redução de volume e a alteração do comportamento mecânico das lammas, facilitando as condições de manuseamento das mesmas, foram já apontados como parte dos principais objetivos da desidratação de lammas. A Figura 5 ilustra a relação entre a remoção das frações de água supracitadas, o TH e as propriedades mecânicas das lammas, evidenciando a redução de volume que ocorre com a diminuição da quantidade de água nas lammas, considerando lammas com TH inicial de 90%.

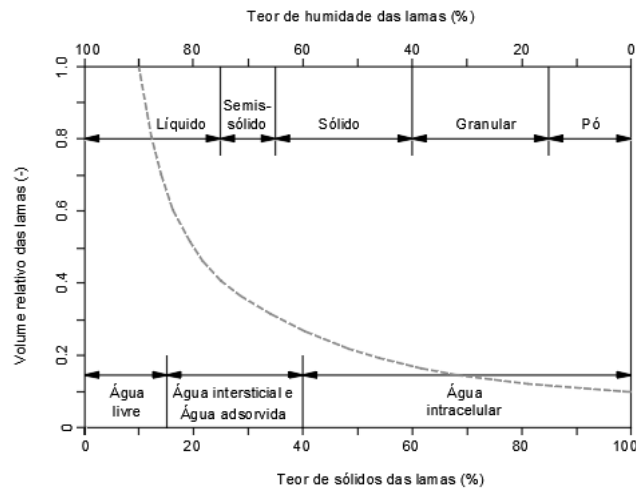


Figura 5 - Representação gráfica da relação entre a remoção de diferentes frações de água presentes nas lammas, o teor de umidade, as características mecânicas das lammas e a redução de volume correspondente.

Adaptado de Melo (2006)

Como se observa nesta figura, à medida que o TH diminui, as lammas deixam de ser líquidas, tornando-se pastosas e adquirindo as características de um semissólido para uma percentagem de água abaixo de 75%. A esta redução de humidade de cerca de apenas 15% pode corresponder uma redução do volume das lammas superior a 50%. Para um TH entre 40 e 65%, as lammas apresentam já uma consistência sólida, podendo ser consideradas como um sólido granular para percentagens de água inferiores. Nos casos em que o TH seja reduzido para valores menores, na ordem dos 15%, as lammas têm tendência a desintegrar-se, formando um pó fino. Para estes valores, as lammas podem apresentar um volume correspondente a cerca de 10% do volume inicial, o que demonstra a enorme vantagem existente na desidratação, no que respeita à diminuição do volume de lammas a processar em tratamentos adicionais, armazenar ou transportar para destino final.

O processo de desidratação é influenciado pelas características associadas às lammas a desidratar. Parte dessas características estão associadas a propriedades que são intrínsecas à matéria que constitui as lammas. Por outro lado, os fatores que influenciam a desidratação são também função dos processos de tratamento da fase sólida que antecedem esta etapa e dos processos de tratamento da linha de fase líquida em que têm origem. Em seguida, são descritos os principais fatores que afetam a capacidade de desidratação das lammas. Embora alguns destes fatores afetem igualmente os processos de desidratação naturais e mecânicos, constituindo os leitos de secagem de lammas,

principal objeto de estudo da presente dissertação, um processo natural, nesta secção são feitas considerações particularmente afetas a este tipo de desidratação.

O TS inicial das lamas tem uma influência direta nos processos de remoção de água das mesmas. Embora a concentração inicial de sólidos nas lamas possa não ter grande influência no o TS final das lamas, isto é, após a desidratação, vários estudos experimentais têm mostrado que pode afetar as taxas de remoção de água e, conseqüentemente, o tempo de desidratação. Em WEF (1998), citado em Mortara (2011), são relatados, para um mesmo TS final, tempos totais de drenagem duas vezes superiores para lamas com concentração de sólidos de 38 g.l^{-1} , relativamente a lamas com concentração de sólidos de $7,6 \text{ g.l}^{-1}$. De facto, quanto menor a concentração de sólidos, para um mesmo volume de lamas, maior a fração de água livre, cuja remoção é, como foi referido, relativamente fácil. Assim, lamas com concentrações de sólidos inferiores apresentarão, desde o início do processo de desidratação, um decaimento mais acelerado no TH, relativamente a lamas mais concentradas. A concentração de sólidos influencia ainda a viscosidade das lamas.

A distribuição granulométrica das partículas sólidas presentes nas lamas, influenciada, entre outros fatores, pelo grau de agitação aplicado às lamas nos processos de tratamento da fase líquida em que têm origem, nos próprios processos de tratamento de lamas ou, ainda, no seu transporte até ao local de desidratação, influencia também a remoção de água das lamas. Quanto maior for a percentagem de finos, ou quanto menor for o diâmetro médio das partículas, maior a sua área superficial, proporcionalmente ao seu volume e, logo, maior a fração de água adsorvida nas lamas, o que dificulta a sua desidratação. Para além disso, lamas que apresentam uma maior percentagem de partículas pertencentes ao mesmo intervalo de diâmetros, terão maior tendência a colmatar os meios filtrantes dos equipamentos de desidratação, ao contrário de lamas com uma granulometria mais homogénea (Mortara, 2011). A distribuição granulométrica das partículas das lamas deve, por isso, ser considerada na definição das dosagens de condicionantes e da porosidade dos meios filtrantes.

É, por isso, aconselhável que as lamas sejam espessadas previamente à sua deposição sobre estes meios, de forma a não só apresentarem um TS inicial adequado a este processo, como a reduzir a percentagem de partículas finas presentes nas lamas, que podem ser arrastadas no movimento de percolação da água, colmatando-os (Ifeanyi, 2008). No entanto, deve garantir-se que, após o espessamento, as lamas apresentem ainda uma fluidez que permita a sua bombagem para as estruturas onde se efetua a desidratação e distribuição uniforme nas mesmas.

A forma das partículas e a estrutura dos flocos em que se agregam, são também determinantes no processo de desidratação. Lamas com flocos de estrutura compacta e rígida são mais facilmente desidratadas, comparativamente a lamas compostas por flocos biológicos pouco densos. Por esta razão, as lamas primárias são mais facilmente desidratadas que as secundárias (Mortara, 2011).

As lamas apresentam, previamente à sua desidratação, uma textura semissólida, apresentando, por isso, características reológicas, assemelhando-se a um fluido não-newtoniano com propriedades tixotrópicas. A viscosidade, uma das características reológicas das lamas, influencia amplamente os

processos de desidratação de lamas. Quanto menor for a sua viscosidade, mais fácil é a remoção das suas frações de água. As propriedades tixotrópicas das lamas traduzem-se no facto de, após cessarem as tensões aplicadas, as lamas não retomarem as características, em termos de forma e viscosidade, prévias à aplicação de tensões, o que significa que o efeito prejudicial da destruição de flocos, provocado por alguns processos de tratamento antecedentes, na desidratação das lamas, não é reversível após o repouso das mesmas.

Para além disso, a carga elétrica das partículas, responsável pelas forças de repulsão entre elas, que impedem a sua aglomeração em flocos maiores e mais densos, influencia a afinidade das partículas para com as moléculas de água. Evidentemente, quanto menor for a afinidade das partículas sólidas para com a água, mais fácil será a desidratação das lamas.

O processo de desidratação é ainda influenciado pela compressibilidade dos sólidos presentes nas lamas na medida em que, se as partículas forem pouco compressíveis, a pressão instalada entre elas aquando da compressão das lamas, causada pelo seu próprio peso quando disposta em camadas nas estruturas de desidratação, promove a remoção da fração de água intersticial entre elas, acelerando o processo de desidratação.

Também a temperatura é, obviamente, um fator preponderante na desidratação das lamas, uma vez que afeta a tensão superficial da água, influenciando o movimento das suas moléculas e, conseqüentemente, a facilidade de remoção da mesma. À semelhança da concentração, a temperatura influencia a viscosidade das lamas.

O grau de estabilização das lamas, influencia a remoção da água presente nas lamas, na medida em que afeta a estrutura dos flocos formados pelas partículas sólidas. Segundo Samudiu (1993), citado em Mortara (2011), em lamas que não tenham sido estabilizadas, a fissuração das lamas, responsável pelo aumento da área de exposição, apresenta uma expressão reduzida, pelo que não se beneficia do aumento da taxa de evaporação que daí decorreria, nos processos de desidratação naturais. O processo através do qual as lamas são estabilizadas tem também influência na sua desidratação. Lamas estabilizadas por processos aeróbios são mais facilmente desidratadas do que lamas que tenham sido estabilizadas anaerobiamente, para o mesmo grau de estabilização, uma vez que, nas últimas, a fração de água livre é, habitualmente, menor.

3.2 Leitos de secagem de lamas

3.2.1 Descrição geral

A desidratação de lamas em leitos de secagem, constitui uma das técnicas naturais mais utilizadas na separação das fases sólida e líquida das lamas.

Os leitos de secagem convencionais assumem o formato de tanques retangulares pouco profundos, normalmente construídos em betão, embora as paredes laterais possam por vezes ser constituídas por muros de terra, coberta ou não de vegetação, placas de madeira tratada ou alvenaria. A base dos tanques apresenta uma ligeira inclinação e, no seu interior, é colocado um meio de enchimento

poroso, ou meio filtrante, composto por camadas horizontais sobrepostas de areia e brita com diferentes granulometrias, que envolve um sistema de drenagem constituído por um conjunto de tubos perfurados.

A Figura 6 e a Figura 7 representam, respetivamente, um perfil e uma planta esquemáticos os leitos de secagem convencionais, indicando as espessuras e granulometrias recomendadas por Turovskiy & Mathai (2006) para as diferentes camadas do meio de enchimento.

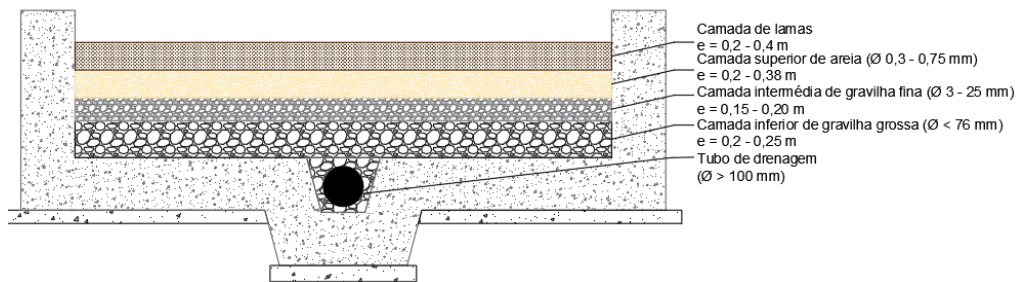


Figura 6 - Perfil esquemático de um leito de secagem de lamas convencional.

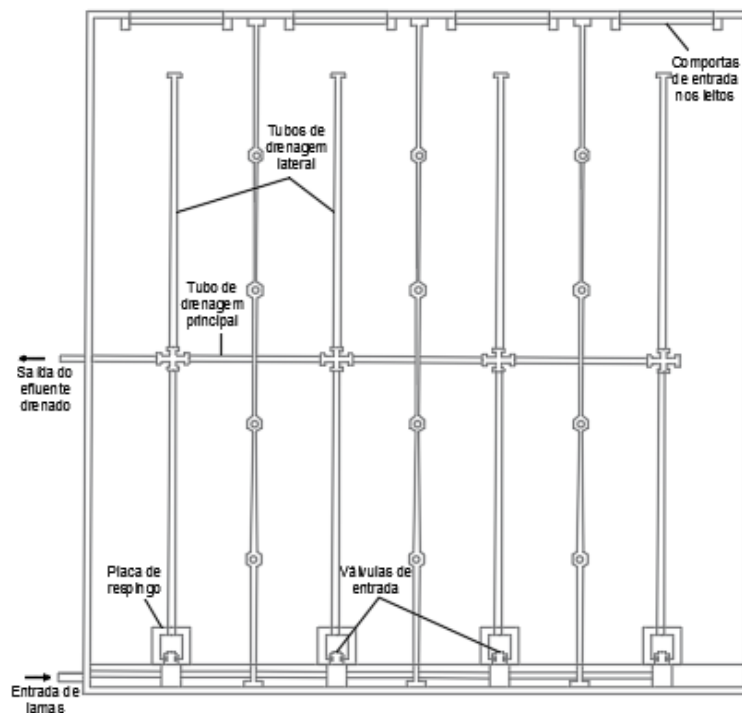


Figura 7 - Planta esquemática de um conjunto de leitos de secagem de lamas convencionais. Adaptado de Metcalf & Eddy (2003)

As estações de tratamento dispõem, habitualmente, de mais do que um leito de secagem, alimentados de forma descontínua, sendo as lamas sequencialmente encaminhadas para os vários leitos, onde permanecem, sem alimentação adicional, até que se atinja o nível de desidratação pretendido.

Assim, em cada leito, as lamas são depositadas sobre a camada superior do meio de enchimento e, numa fase inicial, a sua desidratação ocorre fundamentalmente por percolação da água livre, através

da própria massa de sólidos em suspensão e das várias camadas que a suportam, que é recolhida pelo sistema de drenagem. De acordo com Andreoli *et al.* (2007), devido ao elevado teor de gases nas lammas, nomeadamente dióxido de carbono e/ou metano, decorrente das pressões hidráulicas a que são submetidas durante os processos de estabilização, quando estas são depositadas nos leitos, os sólidos presentes são arrastados para a superfície, formando-se uma camada líquida relativamente clarificada sobre a camada superior de areia. Assim, inicialmente, esta água percola facilmente através do meio de enchimento. À medida que a fração de água livre das lammas é removida, diminuindo, conseqüentemente, a carga hidráulica sobre o meio de enchimento, e que as partículas sólidas se depositam sobre o meio de enchimento, colmatando parte dos vazios existentes, a drenagem torna-se gradualmente mais lenta e as lammas adotam um aspeto pastoso. Nos casos em que a drenagem ocorre rapidamente, isto é, toda a água drenável presente nas lammas é removida num curto espaço de tempo, no final do processo de desidratação as lammas apresentam valores de TS uniformes, em toda a camada aplicada. Pelo contrário, quando se verifica uma drenagem mais lenta, as lammas desidratadas apresentam alguma variação dos valores do TS em diferentes profundidades da espessura de lammas, verificando-se a formação de uma crosta superficial, melhor desidratada, sobre uma camada mais húmida. Segundo Aisse *et al.* (1999) e van Handel e Lettinga (1994), citados em Soares *et al.* (2001), a drenagem de água, nos leitos de secagem de lammas, ocorre até um TS nas lammas de 20%, independentemente do TS inicial, da taxa de carregamento e do tempo de exposição das lammas no leito.

A remoção adicional de água das lammas, com conseqüente aumento do TS, ocorre por evaporação através da superfície de contacto entre as lammas e o ar envolvente, até que seja alcançado o valor pretendido. O processo de evaporação é condicionado pelas condições meteorológicas, particularmente pela temperatura, radiação solar e humidade relativa do ar (Mortara, 2011). Este fenómeno depende também das características da lama, nomeadamente em termos das frações de água presentes, após a remoção da maior parte da água livre por percolação, e da espessura da camada de lammas aplicada, que condiciona a sua exposição à radiação e temperatura ambiente. A remoção de água através da sua evaporação ocorre, naturalmente, de forma mais lenta, quando comparada com a remoção por drenagem.

Também a precipitação é, notoriamente, um fator que afeta o processo de desidratação das lammas em leitos de secagem, uma vez que se traduz num aumento da quantidade de água presente nas lammas. No entanto, o impacto da precipitação não será, à partida, uniforme ao longo do processo de desidratação das lammas. Numa fase inicial, a ocorrência de eventos pluviosos sobre as lammas está associada a um aumento do seu TH e, conseqüentemente, a um retrocesso no processo de desidratação. Contudo, se a precipitação ocorrer numa fase mais avançada do processo, quando as lammas apresentam já uma superfície fissurada, em particular se estas fissuras forem profundas, a água precipitada é rapidamente escoada por entre elas, sendo removida pelos sistemas drenagem, sem influência significativa no TH das lammas. Na Figura 8, é evidenciada a não uniformidade da influência da ocorrência de precipitação no TS e espessura da camada de lammas, ao longo do processo de desidratação em leitos de secagem. Note-se que na primeira metade do tempo de

desidratação decorrido ocorre uma diminuição do valor de TS e o aumento da espessura da camada de lamas na sequência de fenómenos pluviosos, ao passo que nos últimos dias a ocorrência de precipitação parece não afetar, ou afetar pouco, a evolução desses valores.

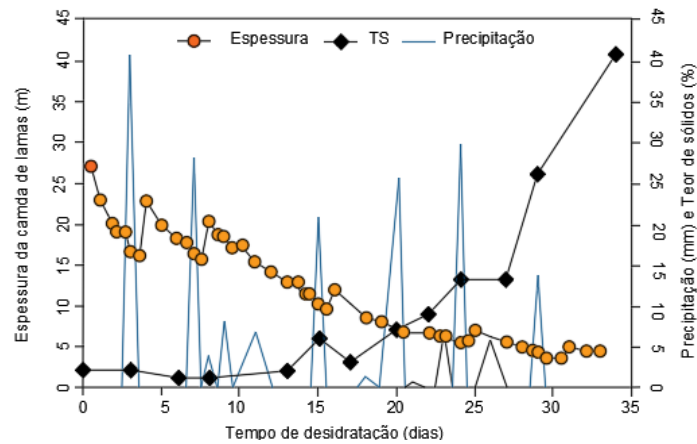


Figura 8- Espessura da camada de lamas, teor de sólidos e precipitação sobre as lamas ao longo do processo de drenagem. Adaptado de Mortara (2011)

Em climas temperados, é expectável que a eficiência deste processo sofra variações significativas ao longo do ano, decorrentes da sazonalidade das condições meteorológicas que lhes está associada. Por esta razão, quando se pretende utilizar os leitos de secagem de lamas de forma contínua ao longo do ano, independentemente da ocorrência de precipitação, podem ser utilizadas coberturas sobre os leitos. Esta opção possibilita também a minimização da libertação de odores e proliferação de insetos, pelo que Metcalf & Eddy (2003) recomendam a sua utilização nos casos em que a estação de tratamento se encontre localizada a menos de 100 m de populações. No entanto, apesar das evidentes vantagens da aplicação destas estruturas a leitos de secagem em regiões de clima temperado ou frio, o clima quente e seco associado à maioria dos países em desenvolvimento e os custos associados à sua construção não justificam, normalmente, a utilização de cobertura nos leitos.

Embora esta não seja uma prática corrente quando se consideram leitos de secagem para desidratação das lamas, estas são, por vezes, sujeitas a processos de condicionamento, com adição de cloreto de alumínio ou polielectrólitos com o objetivo de melhorar a sua drenabilidade. Estes condicionadores interferem nas ligações entre as moléculas de água e as partículas sólidas das lamas, aumentando a fração de água livre, passível de ser drenada nos primeiros dias do ciclo de desidratação. Desta forma, é diminuída a fração de água a remover por evaporação e, conseqüentemente, o tempo necessário para desidratação das lamas, uma vez que, como já foi referido, a duração deste fenómeno é superior à associada à drenagem. A adição de condicionadores deve ser feita por injeção aquando da bombagem das lamas para os leitos (Mortara, 2011).

O líquido proveniente da drenagem da fração de água livre presente nas lamas, e da precipitação sobre o leito, caso não exista cobertura, deve, à semelhança dos efluentes produzidos nos demais processos de tratamento de lamas, ser reconduzido à linha de tratamento da fase líquida, embora a

sua qualidade, em termos de sólidos e matéria orgânica presentes, melhora ao longo do processo de desidratação.

A desidratação das lamas em leitos de secagem é acompanhada por uma redução significativa do seu volume, em particular durante a remoção de água por drenagem, associada a uma redução de 50 a 80% do volume de lamas inicial (Hazel, 2015).

Como consequência da maior exposição solar, a superfície superior das lamas, em contacto com o ar, é mais rapidamente desidratada, formando uma camada seca e dura, que, no início do processo, bloqueia a penetração da radiação e a evaporação da água presente nas camadas inferiores, dificultando a sua desidratação. Segundo Bennamoun (2012), à medida que o processo de desidratação de lamas evolui observa-se a formação de gretas/fissuras na superfície da camada de lamas. Este autor refere que, ao contrário da redução de volume, que tem maior expressão no início do processo, durante os fenómenos de percolação, a formação de gretas ocorre sobretudo a partir de valores de TS mais elevados. As gretas formadas são fruto da resistência à contração, associada à redução de volume, que a camada de lamas oferece. Este fenómeno permite, assim, a exposição da superfície inferior da camada de lamas, favorecendo a evaporação da água aí presente. Turovsky e Mathai (2006) referem, à semelhança de Samudio (1993), citado em Mortara (2011), que a adequada de estabilização das lamas promove uma maior fissuração da camada introduzida nos leitos, formando-se, no fim do ciclo de desidratação, "torrões" de lamas de menores dimensões. No caso de lamas pouco estabilizadas, em particular se apresentarem elevado teor de gordura, os torrões formados apresentam maiores dimensões, em consequência da menor extensão das fissuras formadas.

As lamas desidratadas através deste método apresentam normalmente uma cor negra ou castanho-escura.

O processo de desidratação em leitos de secagem, ocorre até que seja atingido o valor de humidade de equilíbrio nas lamas. Assim, apesar de a maioria dos autores aconselhar a remoção das lamas dos leitos de secagem quando se atinge um TS de cerca de 30%, pelas razões que serão discutidas adiante, de acordo com European Union (2001) este método de desidratação possibilita a obtenção de valores de TS até cerca de 40%, nos países de clima temperado. Estes valores podem reduzir-se, no caso dos países nórdicos, para cerca de 10%. Segundo Metcalf & Eddy (2003), sob condições meteorológicas favoráveis, em climas temperados através da desidratação em leitos de secagem é possível atingir um valor de 40% de TS nas lamas num período de 10 a 15 dias. Já Davis (2010) sugere que, se as condições meteorológicas forem apenas razoáveis, podem ser necessários 30 a 60 dias de permanência das lamas nos leitos para que se atinja aquele valor. Em países mais quentes e secos, este método de desidratação possibilitará, naturalmente, a obtenção de valores de TS nas lamas superiores aos referidos, para o mesmo período de tempo, uma vez que a humidade relativa do ar apresenta, nessas regiões, valores bastante inferiores aos registados em zonas de clima temperado, pelo que o valor da humidade de equilíbrio nas lamas será, à partida, também inferior.

Embora a degradação de matéria orgânica, durante a desidratação de lamas em leitos de secagem, não seja significativa, este processo pode promover uma redução considerável de microrganismos patogênicos nas lamas, por ação da radiação solar. Para além disto, a diminuição da quantidade de água nas lamas inviabiliza a sobrevivência de alguns microrganismos cuja água constitui o meio de locomoção e reprodução. No entanto, as lamas desidratadas em leitos de secagem devem ser analisadas e caracterizadas quanto à presença destes agentes, bem como de outros parâmetros relevantes (metais pesados, compostos orgânicos tóxicos, etc.) sempre que se pretenda a sua reutilização.

Os leitos de secagem constituem, assim, um processo simples e eficaz de desidratação das lamas, apresentando as vantagens descritas no Quadro 3. Em termos de desvantagens, podem apontar-se a elevada necessidade de área para implementação dos leitos, a vulnerabilidade do processo face às condições meteorológicas e suas alterações e o potencial de libertação de odores e proliferação de insetos associados.

3.2.2 Critérios de dimensionamento e avaliação de desempenho de leitos de secagem

Apesar de, recentemente, terem sido aplicados esforços notáveis no sentido de melhor caracterizar o processo de desidratação de lamas em leitos de secagem e os fenómenos e variáveis que nele inferem, os critérios de dimensionamento definidos são ainda insuficientes. Os projetos de leitos de secagem têm, por isso, sido desenvolvidos com base em critérios e intervalos de valores referidos na literatura como aceitáveis, mas meramente indicativos, obtidos em ensaios realizados em estações de tratamento existentes, com localização, clima e tipo de lamas específicos. Os valores assim definidos não devem ser diretamente aplicados ao dimensionamento de leitos de secagem em qualquer contexto, sem que pelo menos se proceda à sua análise e adaptação às características de cada projeto em particular, bem como a ensaios realizados no local onde se preveja a implantação dos leitos, em lamas com características muito semelhantes às que se pretendam aí desidratar através deste método.

O desempenho dos leitos de secagem na desidratação de lamas, que se traduz basicamente na duração do ciclo de secagem e TS obtido nas lamas desidratadas, depende fundamentalmente do clima característico do local de implantação e das características das lamas a desidratar, nomeadamente em termos de TS e grau de estabilização. Estes fatores, que têm muitas vezes sido negligenciados, devem, por isso, ser considerados na definição das dimensões dos leitos e da espessura de lamas a aplicar, bem como das características do meio de enchimento e do sistema de drenagem. Na determinação das dimensões dos leitos, devem também ser avaliados os fatores económicos relativos à disponibilidade área e custo da mesma. Adicionalmente, podem ser tidos em conta fatores como o condicionamento das lamas e a existência de cobertura.

Nesta secção, são apresentadas algumas considerações acerca dos fatores e parâmetros referentes ao dimensionamento e desempenho dos leitos de secagem de lamas.

a) Taxa de carregamento de sólidos

A taxa de carregamento de sólidos traduz basicamente a massa de sólidos a aplicar nos leitos, por unidade de área, num determinado intervalo de tempo, sendo função da concentração inicial de sólidos e do caudal de lamas a desidratar. Através deste parâmetro relacionam-se a área superficial do leito de secagem e a altura da camada de lamas aplicada sobre o meio de enchimento, permitindo a determinação de pares destes valores. Embora não exista, ainda, um método definido para a consideração dos diferentes fatores meteorológicos na definição da taxa de carregamento de leitos de secagem, estes devem ser tidos em conta, assim como as características das lamas a desidratar.

De acordo com Hazel (2015), em climas quentes e secos é usual a aplicação de taxas de carregamento de sólidos num intervalo de 100 a 200 kgST.m⁻².ano⁻¹. Em climas temperados, é aconselhada a aplicação de taxas de valor inferior a 150 kgST.m⁻².ano⁻¹. Ainda relativamente aos locais de clima temperado, no Quadro 4 apresentam-se os intervalos de valores sugeridos por Metcalf & Eddy (2003) para as taxas de carregamento de diferentes tipos de lamas.

Quadro 4 - Intervalo de valores de taxa de carregamento de sólidos em leitos de secagem, para diferentes tipos de lama. Adaptado de Metcalf & Eddy (2003)

Tipo de lamas	Taxa de carregamento de sólidos
	(kgST.m ⁻² .ano ⁻¹)
Primárias, estabilizadas	120 - 150
Primárias + Biológicas, estabilizadas	60 - 120
Primárias + Químicas, estabilizadas	100 - 160

b) Área do leito de secagem

No Quadro 5 são apresentados os intervalos de valores indicados por Metcalf & Eddy (2003) para a área equivalente de leitos de secagem de lamas por habitante para diferentes tipos de lamas produzidos em ETAR domésticas.

Quadro 5 - Intervalo de valores de área equivalente de leitos de secagem, para diferentes tipos de lama. Adaptado de Metcalf & Eddy (2003)

Tipo de lamas	Área equivalente
	(m ² .hab ⁻¹)
Primárias, estabilizadas	0,10
Primárias + Biológicas, estabilizadas	0,12 - 0,23
Primárias + Químicas, estabilizadas	0,19 - 0,23

Estes autores propõem ainda que os leitos apresentem cerca de 6 m de largura por 6 a 30 m de comprimento, ou um outro tamanho conveniente, de acordo com as características e disponibilidade de área do local, de forma a que 1 ou 2 leitos sejam cheios num ciclo normal de carregamento, embora Davis (2010) refira que a prática atual nos Estados Unidos é de que os leitos sejam construídos em células com 4 a 20 m de largura por 15 a 60 m de comprimento. Segundo este autor, na definição da largura dos leitos deve também ser tido em conta o método de remoção das lamas desidratadas dos leitos. Em particular, no caso de métodos de remoção mecânicos, deve atender-se

à dimensão do equipamento, assegurando-se a sua adequada movimentação no interior do leito. Relativamente às dimensões dos leitos, Davis (2010) sugere ainda que as paredes laterais devem ser verticais, com 1 a 1,5 m de altura. Mortara (2011) acrescenta que as paredes verticais dos leitos devem apresentar um bordo livre, acima da altura máxima da camada de lamas aplicada, de 0,10 a 0,25 m e que, caso tenham sido adicionados polímeros às lamas, o comprimento dos leitos não deve ser superior a 20 m, de forma a evitar uma má distribuição das lamas e manter uniforme a espessura da camada aplicada.

Andreoli *et al* (2007) sugere uma expressão para a determinação da área de leitos necessária em que é considerada a influência da precipitação, no caso de leitos descobertos. Essa expressão é, no entanto, omissa relativamente a outras condições meteorológicas que condicionam a evaporação da água presente nas lamas.

c) Espessura da camada de lamas

A espessura da camada de lamas a aplicar nos leitos de secagem interrelaciona-se com a taxa de carregamento e a área do leito. Assim, uma vez definida a taxa de carregamento pretendida, pode determinar-se a espessura da camada a aplicar, em função da área do leito e do TS das lamas a desidratar. Por outro lado, podem aplicar-se camadas com diferentes espessuras, em diferentes ciclos, num mesmo leito, obtendo-se diferentes taxas de carregamento. Desta forma, é possível atender às diferentes condições meteorológicas que se fazem sentir ao longo do ano, bem como a diferentes características das lamas produzidas na estação de tratamento.

De acordo com Metcalf & Eddy (2003), e a maioria dos restantes autores, devem ser aplicadas camadas de lamas com espessuras entre 0,20 e 0,30 m, em cada ciclo. Já Turovskiy & Mathai (2006), sugerem que se podem aplicar camadas com uma espessura máxima de 0,40 m, mediante condições meteorológicas e características das lamas favoráveis ao processo de desidratação. Estes autores propõem ainda que a espessura das lamas seja definida, em função da área do leito, de forma a obter taxas de carregamento de 10 a 15 kgST.m⁻²ciclo⁻¹.

Comparativamente a climas frios ou temperados, em locais de clima quente e seco será, à partida, possível aplicar camadas com espessuras mais elevadas, para um mesmo TS final, num mesmo intervalo de tempo.

A espessura da camada de lamas a aplicar nos leitos de secagem deve, então, ser determinada tendo em vista um equilíbrio entre a quantidade de lamas a desidratar e a duração dos ciclos de secagem: maiores espessuras possibilitam a desidratação de maiores quantidades de lamas, mas implicam uma maior duração de cada ciclo e, conseqüentemente, menor número de ciclos por ano. Se, por um lado, com um menor número de ciclos se diminuem os trabalhos de aplicação e remoção das lamas, por outro, a permanência das lamas nos leitos por um período de tempo demasiado longo pode ser prejudicial à manutenção e operacionalidade dos leitos, como será explicitado adiante.

Vários estudos têm permitido concluir que, a um aumento de 10 cm da espessura da camada de lamas aplicada pode corresponder uma duplicação do tempo de desidratação das lamas.

Face ao exposto, para uma correta definição da espessura da camada de lamas a aplicar nos leitos devem ainda considerar-se, à semelhança do que foi descrito relativamente aos restantes parâmetros, as características das lamas a desidratar e as condições meteorológicas.

d) Número de leitos

O número de leitos de secagem é definido em função da quantidade de lamas a desidratar. Uma vez definidas a área e espessura necessárias para desidratar a quantidade de lamas produzida na ETAR, o número de leitos deve ser computado em função das dimensões pretendidas para cada leito. Adicionalmente, deve ser considerado pelo menos um leito de secagem extraordinário, de forma a atender eventuais problemas operacionais que impeçam o funcionamento de um dos leitos restantes, minimizando-se, assim, interrupções ou perturbações do normal decorrer dos ciclos.

e) Meio de enchimento

Para além de funcionar como suporte da camada de lamas a aplicar, o meio de enchimento tem um efeito filtrante das lamas, promovendo a percolação da água por entre os vazios existentes, ficando os sólidos das lamas retidos à superfície.

Deve ser assegurada a adequada granulometria das diferentes camadas, de acordo com os valores indicados na Figura 6, de maneira a minimizar os riscos de colmatação do meio de enchimento pelas partículas sólidas das lamas. Em relação a este aspeto, é particularmente importante a definição de um coeficiente de uniformidade e diâmetro efetivo da camada superior de areia que maximizem a retenção das partículas sólidas, evitando que estas preencham os vazios das camadas inferiores do meio de enchimento, o que diminuiria o volume útil, a condutividade hidráulica do meio e, conseqüentemente, a velocidade de percolação da água.

De forma a minimizar a colmatação do meio de enchimento, é, ainda, recomendada a substituição periódica da camada de areia. Ainda relativamente a esta camada, embora maiores espessuras promovam uma maior retenção de sólidos e a diminuição da frequência de substituição e/ou reposição de areia, o processo de drenagem da água presente nas lamas torna-se mais lento em camadas de espessura elevada (Turovskiy & Mathai, 2006).

Por vezes é ainda colocada uma camada de suporte, em tijoleira ou outro material semelhante, entre a camada de lamas e a camada superior de areia. A existência desta camada facilita a operação de remoção das lamas, minimizando a remoção de parte da camada de areia durante essa operação e promove uma melhor distribuição das lamas pela área do leito (Andreoli *et al.*, 2007).

f) Sistema de drenagem

O sistema de drenagem dos leitos de secagem de lamas visa essencialmente a remoção do efluente líquido, percolado através do meio de enchimento, proveniente da água presente nas lamas e da precipitação sobre o leito e a sua condução à linha de fase líquida da ETAR, para tratamento subsequente. Assim, este sistema deve recolher uniformemente o efluente percolado ao longo de toda a extensão do leito. Para o efeito, é habitualmente constituído por tubos transversais, que alimentam um tubo longitudinal principal (Figura 7), perfurados ou abertos, em plástico ou grés vitrificado, envolvidos pela camada inferior de brita, cujo declive mínimo de 1%, na direção do tubo principal, deve ser assegurado pelo fundo do leito, que deve ser corretamente nivelado aquando da sua construção, por forma a evitar depressões ou percursos preferenciais para a o efluente líquido. Os tubos de drenagem não devem apresentar diâmetros inferiores a 100 mm e devem ser espaçados de 2,5 a 6 m (Metcalf & Eddy, 2003). Após o assentamento do sistema de drenagem, não deve ser permitida a circulação de cargas pesadas sobre os leitos de secagem.

3.2.3 Ciclos de desidratação de lamas: duração e problemas operacionais

A duração de um ciclo de desidratação de lamas em leitos de secagem compreende os tempos necessários para preparação do leito e carregamento das lamas a desidratar, desidratação, por drenagem e evaporação da água presente nas lamas, e remoção das lamas desidratadas.

A preparação do leito de secagem, inclui os trabalhos de limpeza e remoção de detritos remanescentes no meio de enchimento e nivelamento da camada superior de areia. A duração desta fase do ciclo de secagem, está dependente da quantidade de mão de obra disponível, uma vez que estes trabalhos são, habitualmente, realizados manualmente. As lamas são então bombeadas para o interior dos leitos. A velocidade de aplicação das lamas é controlada por válvulas existentes em cada leito, e as tubagens de alimentação devem ser construídas em ferro fundido ou plástico resistente. As tubagens devem ser limpas periodicamente e, em climas frios, deve precaver-se a possibilidade de congelamento das lamas no seu interior. Alternativamente, as lamas podem ser aplicadas através de canais abertos, por gravidade, controlados por comportas à entrada dos leitos. Sob as torneiras de alimentação de cada leito, deve ser colocada uma pequena laje de betão (placa de respingo), como indica a Figura 7, que facilite o espalhamento das lamas pelo leito e evite a erosão da camada de areia do meio de enchimento. Para um melhor controlo da espessura da camada de lamas aplicada, a saída do sistema de drenagem deve, quando possível, ser encerrada durante o tempo de aplicação das lamas.

O tempo de desidratação das lamas nos leitos de secagem depende, uma vez mais, das características das lamas a desidratar e das condições meteorológicas nesse período, bem como da espessura da camada de lamas aplicada, da existência ou não de cobertura e, como é evidente, do TS pretendido para a as lamas desidratadas. Uma vez que o processo de evaporação é francamente mais moroso que o processo de drenagem, o tempo de desidratação das lamas é essencialmente condicionado pela quantidade de água a remover por evaporação. Segundo Ifeanyi (2008), o tempo de retenção das lamas em leitos de secagem pode variar entre 10 dias e várias semanas, em função

das condicionantes acima referidas, podendo ser reduzido mediante a adição de condicionantes às lamas. Nas estações do ano mais pluviosas, a duração dos ciclos de desidratação será, naturalmente, superior, pelo que, no dimensionamento dos leitos de secagem, deve ser considerada uma área adicional dos leitos, por forma a ter em conta este fator.

Uma vez que os leitos de secagem são operados em regime de batelada, isto é, são alimentados de forma descontínua, é fundamental que, antes de se iniciar um novo ciclo de secagem de lamas, se removam as lamas desidratadas no ciclo anterior. Não existem, atualmente, critérios completamente definidos acerca do momento ideal para remoção das lamas. Regra geral, lamas são retiradas dos leitos de secagem quando a sua textura é compatível com os métodos de remoção disponíveis, permitindo o seu transporte sem dificuldades, em função dos condicionalismos operacionais existentes e do destino final previsto. De acordo com Strande *et al.* (2014), a partir de um valor de TS de 25% as lamas podem ser facilmente removidas dos leitos. Andreoli *et al.* (2007) acrescenta que as lamas não devem permanecer nos leitos para valores de TS superiores a 35 %, uma vez que a permanência prolongada das lamas nos leitos promove o crescimento de vegetação que, para além de transparecer uma planificação operacional deficiente, atrapalha, de forma considerável, a sua remoção. Esta dificuldade de remoção tende ainda a agravar-se para valores de TS muito elevados, para os quais as lamas adquirem uma textura granular, desagregando-se. Em pequenas estações de tratamento, as lamas são normalmente removidas manualmente, com recurso a pás e carros de mão. Em estações de tratamento médias a grandes, podem ser utilizados meios mecânicos para remoção das lamas, como pequenos tratores ou veículos do tipo *bobcat*, desde que sejam tomadas precauções relativamente à preservação do meio de enchimento e sistema de drenagem, como camadas de suporte em tijoleira ou betão sobre a camada superior de areia, por onde estes veículos possam circular. Em ambos os casos deve ser previsto um percurso asfaltado, com fundações adequadas, que possibilite a aproximação de um camião para receber as lamas descarregadas do leito, sem que a disposição e estabilidade das camadas do meio de enchimento e do sistema de drenagem sejam afetados. No Quadro 6 exemplificam-se alguns dos principais problemas operacionais que podem afetar a duração do ciclo de desidratação das lamas em leitos de secagem, bem como sugestões de solução para esses problemas.

Quadro 6 - Principais problemas operacionais que afetam a duração do ciclo de desidratação das lamas em leitos de secagem.

Problema detetado	Possível solução
Espessura excessiva da camada de lamas aplicada	Remover as lamas desidratadas e limpar o leito. Aplicar uma camada de lamas fina e medir a redução da sua espessura após 3 dias de desidratação. Aplicar sobre esta camada o dobro da espessura reduzida.
Aplicação de lamas sem limpeza adequada do leito	Remover a lama aplicada após a sua desidratação. Limpar cuidadosamente a camada superficial de areia e substituir os 0,12-0,15 m superiores.
Colmatção do meio de enchimento	Introduzir água limpa em contracorrente no leito, isto é, da base para o topo. Drenar corretamente toda a água de limpeza, para impedir congelamento nos vazios e aplicar a nova camada de lamas. Se necessário substituir todo ou partes do meio de enchimento.
Área de leito insuficiente	Potenciar a drenagem através da aplicação de condicionadores químicos
Condições meteorológicas adversas	Proteger o leito através de cobertura, total ou parcial.
Colmatção das aberturas dos tubos de drenagem	Remover o meio de enchimento e aplicar jatos de água no interior dos tubos.
Lama desidratada poeirenta	Reduzir o tempo de permanência das lamas nos leitos, remover as lamas após se atingirem valores de teor de sólidos de 30-40%

3.3 Síntese de estudos experimentais realizados em leitos de secagem

Recentemente, têm sido desenvolvidos, por alguns autores, trabalhos experimentais com recurso a ensaios de campo e modelação matemática, na procura de um melhor entendimento acerca dos fenómenos envolvidos no processo de desidratação de lamas em leitos de secagem e de, assim, se poderem indicar critérios de dimensionamento mais definidos, de aplicação mais alargada e que considerem os diversos fatores acima descritos, em particular a influência das condições meteorológicas, neste processo de desidratação.

Em Brasília, no Brasil, Soares *et al.* (2001) realizaram ensaios de campo em leitos de secagem à escala piloto, constituídos por vasos plásticos, perfurados na base, no interior dos quais foi colocada uma manta geotêxtil. Os leitos foram colocados ao ar livre e, no interior de cada vaso, foram colocadas camadas de lamas provenientes de reatores UASB, com 0,17 m de espessura. Estas lamas apresentavam um valor de TS de cerca de 5% e foram mantidas nos leitos piloto até atingirem valores superiores a 90%, o que se verificou após um período de 15 dias. A radiação solar foi medida por um radiómetro instalado no local e foram realizadas periodicamente análises do TS das lamas. Adicionalmente, foi analisada a qualidade do efluente drenado, tendo os autores concluído que deve ser sujeito a tratamento previamente à sua descarga nos meios hídricos naturais. Estes autores verificaram que, imediatamente após o carregamento dos leitos, a água foi removida essencialmente por percolação. Finalizado este processo, verificou-se um abrandamento na velocidade de desidratação das lamas nos leitos e a estratificação da camada de lamas aplicadas, com valores de TS superiores na camada superficial e lamas mais húmidas na zona inferior. Os autores confirmaram, assim, que a camada de lamas que se encontra diretamente em contato com a atmosfera tende a desidratar de forma mais eficiente, formando a crosta seca e dura à superfície, referida na secção anterior, que impede a incidência de radiação e reduz a evaporação da água presente na camada inferior, tendo verificado, no mesmo instante, TH distintos nestas camadas: 55% na camada superficial e 76% na camada inferiores. Observaram também que, após o aparecimento de gretas na superfície das lamas, ocorreu um aumento da taxa de desidratação, conferindo o efeito, associado à fissuração da camada de lamas, também já referido. A partir dos dados experimentais obtidos, estes autores desenvolveram um modelo matemático de previsão dos valores de TS das lamas no decorrer do processo de desidratação em leitos de secagem, no qual consideraram as componentes drenagem e evaporação, como mecanismos de remoção de água. Apesar deste modelo ser já bastante completo, estes autores apenas consideraram a influência da radiação solar no processo de evaporação, desprezando os restantes parâmetros meteorológicos, como a temperatura ou a humidade relativa do ar. Para além disso, embora este modelo tivesse em conta o efeito da precipitação, durante todo o ciclo experimental de desidratação das lamas não se verificaram eventos pluviosos, pelo que estes autores não puderam inferir acerca da influência da precipitação na desidratação de lamas.

No mesmo país, mas em Campina Grande, Melo (2006) realizou, entre os meses de março e junho, ensaios experimentais em leitos de secagem experimentais, visando a melhor compreensão dos fenómenos envolvidos na evaporação da água das lamas e o efeito da precipitação neste processo.

Nestes ensaios, as lamas foram colocadas no interior de diversas caixas de madeira, umas cobertas e outras descobertas, com paredes laterais formadas por placas de madeira removíveis, de forma a minimizar o efeito do sombreamento da camada de lamas à medida que a sua espessura diminui. As caixas foram também providas de uma manta geotêxtil, para percolação das escorrências, e perfuradas na base. A massa das caixas de lamas foi medida diariamente, de forma a avaliar a massa de água removida. A radiação foi também medida através de um radiómetro. As lamas aplicadas apresentavam um valor de TH de 74% e foram colocadas, no interior das caixas, camadas de lamas com diferentes espessuras, garantindo-se pares de caixas, cobertas e descobertas, com a mesma espessura de lamas aplicada. Foram utilizadas coberturas translúcidas, dispostas de forma a possibilitar a livre passagem do vento. Como seria expectável, face ao valor inicial de TH das lamas, este autor apenas verificou a ocorrência de drenagem de água na sequência de ocorrência de precipitação. Concluiu ainda que, quanto maior a taxa de carregamento inicial, isto é, a espessura da camada de lamas introduzida, maior a massa de água removida por evaporação, tanto nas caixas descobertas como nas cobertas, e que a uma redução de TH de 75 para 50% corresponde uma perda de 50% da massa total das lamas. Pôde também observar que, nas caixas em que foram aplicadas menores espessuras, os valores de TS das lamas estabilizaram num período mais curto e que, por isso, num mesmo período de tempo, se podem obter valores de TS menores em camadas de lamas com menores espessuras. Foram ainda verificados valores muito semelhantes entre o TS das lamas desidratadas em caixas cobertas e descobertas, num mesmo período de tempo, o que leva os autores deste estudo a concluir que a este tipo de coberturas não interfere na evaporação da água das lamas. Relativamente à precipitação, o autor concluiu que, enquanto para valores de TH inferiores a 65% a maior parte da precipitação percola através da massa fissurada de lamas, ficando apenas uma pequena parte retida nessa camada, para valores superiores a quantidade de água retida aumenta substancialmente. Os valores determinados por este autor mostraram ainda que a produtividade dos leitos foi significativamente superior nos meses mais quentes, isto é, foi na época do ano em que se registaram maiores valores de temperatura e radiação que se atingiram maiores valores de TS, para um mesmo intervalo de tempo. Adicionalmente, Melo (2006) propôs um modelo matemático para simulação da remoção da água presente nas lamas por evaporação, tendo obtido curvas de valores de TS previstos que aproximam razoavelmente os resultados avaliados experimentalmente, para valores de TS inferiores a 40%, verificando-se um desvio considerável entre as curvas para valores superiores. Embora considere os diversos parâmetros meteorológicos com influência no processo de desidratação das lamas, o período de drenagem da água presente nas lamas é, no modelo desenvolvido por este autor, desprezado.

Também como o objetivo de validar um modelo matemático de previsão do valor de TS das lamas em leitos de secagem ao longo do processo de desidratação, Gharaibeh *et al.* (2007) realizaram, em Wollongong, na Austrália, ensaios de campo em leitos de secagem experimentais. Estes leitos foram equipados com uma válvula de fundo, ligada a um contentor para armazenamento e medição de escorrências, e um meio de enchimento composto por uma camada superior de areia e uma camada inferior de cascalho. Ao longo de 6 meses foram realizados diversos ciclos de drenagem, com valores de TS inicial entre 1 e 3,5 % e espessura da camada de lamas, entre 0,10 a 0,20 m. Foram,

diariamente, retiradas amostras de lamas para medição dos valores de TS e recolhidas as escorrências para medição do volume drenado. No local foi, ainda, instalada uma estação meteorológica para medição da velocidade do vento, radiação solar, humidade relativa, temperatura ambiente e temperatura da superfície de lamas. Os ciclos decorreram até valores de TS nas lamas de aproximadamente 50%. À semelhança de Melo (2006), estes autores verificaram um aumento do TH das lamas após períodos de precipitação, tanto menos significativo quanto mais tarde, no decorrer do ciclo, a precipitação tenha ocorrido, devido à fácil percolação da água da chuva por entre a massa de lamas após a formação de fissuras profundas na superfície das lamas. Verificaram também que, dependendo das restantes condições meteorológicas verificadas após a ocorrência de um evento pluvial, na fase inicial do ciclo, os valores de TH anteriores à precipitação foram recuperados após 1 ou 2 dias. O modelo por eles proposto, baseia-se na quantificação da massa de água evaporada, através do estabelecimento do balanço energético do processo, tendo em conta os princípios de transferência de energia e massa combinados, por radiação, convecção e evaporação. Aplicando esse modelo, relatam ter obtido curvas de valores de TS previstos com boa aproximação às curvas obtidas através dos ensaios experimentais, para valores de TS inferiores a 30%. A partir destes valores, verificaram um desvio da curva obtida pelo modelo, relativamente aos valores determinados experimentalmente. Embora estes autores refiram que as massas de água drenada e precipitada sobre os leitos, podem ser, respetivamente, adicionadas e subtraídas à massa de água evaporada prevista, para previsão do teor de sólidos ao longo do ciclo de secagem, não consideraram no artigos apresentados, a sua modelação. Para além disso, os resultados obtidos por estes autores sugerem uma tendência exponencial de crescimento do valor de TS ao longo do ciclo de desidratação, o que não traduz, evidentemente, a realidade.

Mais recentemente, Sousa (2012) efetuou, também no Brasil, em São Paulo, trabalhos de campo experimentais, em leitos de secagem de lama à escala piloto, avaliando a influência das condições meteorológicas na eficiência deste processo. Foram implantados dois leitos de secagem, um coberto e um descoberto, construídos em betão sobre um piso impermeabilizado, sem qualquer meio de enchimento ou sistema de drenagem. A estrutura de cobertura do leito coberto foi construída em madeira e revestida com uma lona plástica. Os dados meteorológicos foram, à semelhança do ensaio anteriormente descrito, registados por uma estação meteorológica. Foram realizados diversos ciclos de desidratação, com duração de 30 dias cada um, num período de 9 meses. Em cada ciclo as lamas foram dispostas em camadas de 0,3 m de espessura, com valores de TS inicial de cerca de 15%. As amostras foram recolhidas 3 vezes por semana, em intervalos de 2 dias. Por cada recolha foram recolhidas, em cada leito, amostras em 3 profundidades distintas, de forma a avaliar o efeito da estratificação da camada de lamas. Após as recolhas, as lamas remanescentes nos leitos foram revolvidas e as amostras foram analisadas para obtenção dos valores de TS. Através destes ensaios, o autor concluiu que o revolvimento das lamas promoveu o seu arejamento e homogeneização, favorecendo o processo de desidratação, ao promover o contacto das lamas colocadas inicialmente a maior profundidade com a atmosfera, à exceção dos períodos em que ocorreu precipitação, em que o revolvimento das lamas promove o aumento do seu TH nas diferentes espessuras. Assim, tal como Soares (2001), observou a estratificação dos valores de TS nas lamas, aumentando gradualmente a

humidade com a profundidade. Verificou também, tal como Melo (2006), que a eficiência deste processo foi superior nos períodos mais quentes, em que se obtiveram valores de TS nas lamas de cerca de 45%, ao passo que nos períodos em que se fizeram sentir temperaturas inferiores o valor de TS aumentou apenas para cerca de 23%. Relativamente às condições meteorológicas, Sousa (2012) concluiu que, para uma desidratação eficiente das lamas em leitos de secagem, as condições ideais incluem temperaturas médias acima de 20 °C, radiação média acima de 0,2 kW.m⁻², humidade relativa abaixo de 75% e reduzidas frequência, intensidade e duração da precipitação, recomendando cuidado na seleção da localização dos leitos de secagem, face ao eventual sombreamento provocado por outras estruturas próximas. Refere também que o vento não parece ser um fator preponderante neste processo, a menos que se façam sentir velocidades significativas. No que respeita aos leitos cobertos, menciona ainda que, embora não tenham sido diretamente afetados pela ocorrência de precipitação, foram afetados pelas alterações, decorrentes desse fenómeno, verificadas nas restantes variáveis meteorológicas, em particular pelo aumento da humidade relativa. Este autor aplicou um modelo semelhante ao desenvolvido por Gharaibeh *et al.* (2007), não tendo, no entanto, obtido resultados com a tendência exponencial de crescimento dos valores de TS ao longo do ciclo relatada por aqueles autores, mas antes valores que traduzem o abrandamento espectável das taxas de remoção de água ao longo do ciclo. Todavia, verificou, à semelhança de Gharaibeh *et al.* (2007) que os resultados obtidos pelo modelo se desviam significativamente dos experimentais para valores de TS superiores a 30%.

Relativamente aos resultados experimentais obtidos nos trabalhos descritos, faz-se ainda notar a diferença entre os valores máximos de TS obtidos nas diferentes regiões. Enquanto em Brasília e Campina Grande, zonas mais quentes e secas, se observaram valores de TS de aproximadamente 90% no fim dos ciclos de desidratação, em Wollongong e São Paulo, regiões de clima temperado, não foram observados valores de TS superiores a 50%.

4 MODELAÇÃO DO PROCESSO DE DESIDRATAÇÃO DE LAMAS EM LEITOS DE SECAGEM

4.1 Fundamentos teóricos sobre transferência de calor e massa

O processo de desidratação de lamas em leitos de secagem, em particular a evaporação da massa de água presente nas mesmas, envolve fenómenos complexos de transferência de calor e massa, em simultâneo. Assim, para melhor compreensão das expressões utilizadas no modelo matemático desenvolvido, importa conhecer esses fenómenos. Nesse sentido, nesta secção são enunciados alguns dos princípios que regem as reações de transferência de massa e energia térmica envolvidas.

Considere-se então um volume de controlo, isto é, uma região espacial, constituída por um determinado material, limitada por fronteiras definidas, através das quais podem ocorrer transferências de massa e energia térmica, também designada por calor.

Uma transferência de calor, corresponde ao trânsito de energia térmica, associada à translação, rotação e vibração dos átomos e moléculas que constituem a matéria, devido a uma diferença espacial de temperaturas. Desta forma, sempre que existe uma diferença de temperaturas entre os meios separados pelas fronteiras que definem o volume de controlo, ocorrem transferências de calor (Bergman *et al.*, 2011).

As transferências de calor podem ocorrer por condução, radiação e/ou convecção. Uma taxa de transferência de energia, definida nas equações abaixo pelo símbolo Q , corresponde à quantidade de energia transferida num determinado intervalo de tempo.

Os mecanismos de condução de calor estão associados à transferência de calor contacto entre partículas contíguas, no sentido das temperaturas menores, ou seja, no sentido do gradiente de *temperatura* negativo e pode ocorrer em gases, líquidos ou sólidos. Uma vez que o presente estudo pretende estudar as transferências de calor associadas à evaporação da massa de água presente nas lamas para o ar envolvente, desprezando-se a influência das trocas de calor entre as lamas e as paredes laterais do leito no processo de desidratação, e que essas transferências ocorrem fundamentalmente por radiação e convecção, muito embora as fronteiras entre este último processo e a convecção não sejam completamente definidas, não serão feitas considerações adicionais acerca deste método de transferência de calor.

Resultado de alterações das configurações eletrónicas dos átomos e moléculas constituintes dos materiais, estes podem emitir energia sob a forma de radiação térmica. Uma vez que esta energia é transportada por ondas eletromagnéticas, ao contrário da energia transferida por condução ou por convecção, a propagação da radiação térmica não implica a existência de um meio material, podendo mesmo propagar-se no vácuo. Assim, as superfícies sólidas, os gases e os líquidos emitem e absorvem radiação térmica.

De acordo com Moran *et al.* (2011), a taxa de emissão de radiação térmica, $Q_{emissão}$, a partir de uma superfície de área A , correspondente à área das fronteiras do volume de controle considerado, pode ser quantificada através de uma forma modificada da lei de Stefan-Boltzmann, representada pela expressão (1):

$$Q_{emissão} = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \times A \quad (1)$$

onde ε é o parâmetro adimensional que representa a emissividade do material, propriedade que traduz a capacidade de emissão de energia por radiação da sua superfície ($0 < \varepsilon < 1$); σ é a constante de Stefan-Boltzmann, que toma o valor $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$, e T é a temperatura da superfície, dada em K. De igual modo, a taxa de absorção de radiação, $Q_{absorção}$, para a mesma superfície, pode ser obtida pela equação (2):

$$Q_{absorção} = \alpha \times \sigma \times T^4 \times A \quad (2)$$

onde α é o parâmetro adimensional que representa a absorvidade do material, propriedade que traduz a capacidade de absorção de energia por radiação da sua superfície ($0 < \alpha < 1$).

A convecção térmica é um processo de transmissão de calor, entre uma superfície e um fluido (líquido ou gás) em movimento, a diferentes temperaturas, em que a energia térmica se propaga através do transporte de matéria (Bergman *et al.*, 2011). Apesar da complexidade acrescida, na definição da transferência de energia térmica por esta via, pelo movimento do fluido, a taxa de transferência convectiva de calor entre fluidos, ou entre um fluido e uma superfície, pode ser quantificada pela expressão empírica (3), conhecida como lei de Newton do arrefecimento:

$$Q_{convecção} = h \times \Delta T \times A \quad (3)$$

em que A corresponde à área da superfície das fronteiras do volume de controle perpendiculares ao fluxo, através das quais ocorre a transferência de calor; ΔT a diferença de temperaturas entre o interior do volume de controle e exterior das fronteiras e h o coeficiente de transferência de calor, em $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Este coeficiente não representa uma propriedade termodinâmica, mas sim um parâmetro empírico que relaciona a transferência de calor com a natureza do escoamento do fluido junto à superfície de transferência, a geometria da superfície de fronteira do volume de controle e as propriedades do fluido (Moran *et al.*, 2011), podendo ser determinado, no caso da convecção natural, pela expressão (4).

$$h = \frac{k}{L_c} \times Nu \quad (4)$$

sendo k a condutividade térmica do fluido; L_c a dimensão característica da superfície, e Nu o número adimensional de Nusselt. Não sendo possível definir, nas transferências de energia térmica que envolvem fluidos, fronteiras rígidas entre convecção e condução, o número de Nusselt representa um rácio entre o calor transferido por convecção e o calor transferido por condução. As transferências de calor, por convecção, entre o ar e a massa de lamas a desidratar em leitos de secagem, correspondem a convecção natural e os princípios que as regem podem ser assemelhados aos relativos a convecção natural através de placas horizontais. A quantificação da transferência de calor depende, ainda, do tipo de regime de escoamento do fluido, que pode ser laminar ou turbulento. No

caso da convecção natural, a quantificação do número de Rayleigh (Ra) através da expressão (5), permite fazer essa distinção:

$$Ra = Gr \times Pr \quad (5)$$

onde Gr é o número de Grashof, parâmetro adimensional que representa o rácio entre as forças de flutuabilidade devidas à variação espacial da densidade do fluido (causada pelas diferenças de temperatura) e a sua viscosidade cinemática, de acordo com a expressão (6), e Pr o número de Prandtl, também adimensional, característico do fluido e que relaciona a viscosidade cinemática de um fluido com a sua condutividade térmica.

$$Gr = \frac{\beta \times g \times (T_1 - T_2) \times L_c^3}{\nu^2} \quad (6)$$

Nesta expressão, β é o coeficiente de expansão térmica (por unidade de volume), que pode ser aproximadamente calculado, no caso do ar e em K^{-1} , pela expressão (7), definida para os gases perfeitos (Oliveira, 2014); g a aceleração da gravidade na Terra, em $m.s^{-2}$, e ν a viscosidade cinemática do fluido.

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (7)$$

Nesta expressão, T corresponde à temperatura, em K. Assim, considerando convecção natural através de placas horizontais, o número de Nusselt pode ser obtido pelas expressões (8), para escoamentos laminares, ou (8b), no caso de escoamentos turbulentos (Bergman & Lavine):

$$Nu = 0,54 \times Ra^{1/4} \quad 10^4 < Ra < 10^7 \quad (8a)$$

$$Nu = 0,15 \times Ra^{1/3} \quad 10^7 < Ra < 10^{11} \quad (8b)$$

Se a quantidade de energia transferida para o interior do volume de controlo, resultante do balanço entre as diferentes formas de transferência descritas, for suficiente, pode ocorrer uma transição de fase do material existente no interior desse volume. A quantidade de energia que é necessário fornecer para alteração de fase de uma determinada massa de material, m (kg) corresponde à entalpia desse material H , dada em $J.kg^{-1}$. A equação (9) representa a taxa de transferência de calor que ocorre no decorrer de uma transição de fase (Δt):

$$Q_{transição} = m \times H \times \Delta t \quad (9)$$

No caso da evaporação, mudança de um estado líquido para um estado gasoso, de uma massa de água presente num determinado volume de controlo, a energia térmica transferida será então função da entalpia de vaporização da água. Neste processo ocorre, assim, uma transferência de energia associada uma transferência de massa, através das fronteiras, do interior para o exterior do volume de controlo.

4.2 Desenvolvimento do modelo

4.2.1 Considerações gerais

Para o desenvolvimento do modelo matemático, foi considerado um volume de controlo de lamelas, correspondente à área e espessura de uma camada de lamelas depositada no interior de um leito de

secagem convencional, num sistema aberto, isto é, onde são possíveis trocas de energia e massa entre esse volume e o ambiente envolvente, através da superfície de lamas em contacto com o ar. Desprezaram-se as trocas de energia através das superfícies deste volume de controlo em contacto com as paredes laterais e o fundo dos leitos.

Para o volume de controlo considerado, foi determinado um balanço hídrico de massas, em ordem ao tempo. Para cálculo da massa de água evaporada considerada, foi também determinado o balanço de energia térmica neste sistema.

Para aplicação do modelo, são conhecidos os valores iniciais de TS, a massa volúmica (ρ_0) e a espessura inicial da camada de lamas (e_0), bem como a área superficial do leito considerado (A_{sl}). Desta forma, e face a um conjunto de parâmetros meteorológicos - temperatura do ar (T_a), humidade relativa (HR), radiação solar (R_{solar}) e precipitação (P) - conhecidos ou previstos, obtêm-se os valores estimados de TS e espessura da camada de lamas ao longo do tempo. Por razões de organização do documento, o procedimento correspondente a cada passo de cálculo do modelo, incluindo as equações consideradas, é apresentado, de forma esquemática, no fluxograma da Figura 11, no final do presente capítulo. Ao longo dos subcapítulos seguintes são feitas referências às equações incluídas nesse fluxograma e no Anexo I são indicadas as unidades dos parâmetros utilizados e os valores das constantes consideradas. No presente trabalho, o modelo foi aplicado num passo de cálculo diário.

4.2.2 Balanço hídrico de massas

Nas condições descritas, a água presente nas lamas pode ser removida por evaporação, através da superfície de lamas exposta ao ar, ou ser drenada pelo sistema existente nos leitos para esse efeito. Por outro lado, estando o volume de controlo exposto às condições meteorológicas, pode ser adicionada água por precipitação sobre o leito.

De acordo com o princípio de conservação da massa num sistema, traduzido pela equação de balanço hídrico apresentada no fluxograma da Figura 11, a variação da massa de água no interior do volume de controlo, no tempo (t), é igual à massa de água que entra no volume de controlo, através da sua superfície, ($m_{\acute{a}gua+}$), subtraída da massa de água removida ($m_{\acute{a}gua-}$). Para efeitos de modelação, consideraram-se nulas a entrada e a saída de água no volume de controlo através das paredes laterais do leito de secagem, hipótese que se aproxima à realidade na medida em que as paredes dos leitos devem, naturalmente, ser impermeáveis.

Resolvendo essa equação em ordem ao tempo, e considerando as formas de adição e remoção de água referidas, pode obter-se a massa de água presente nas lamas, em cada passo de cálculo. De acordo a equação proposta no fluxograma (ver Figura 11 - eq. Y), a massa de água existente na massa de lamas em cada instante, $m_{\acute{a}gua}(t)$ será igual à massa de água existente na camada de lamas no instante anterior, ($t - 1$), adicionada da massa de água precipitada sobre o volume no intervalo de tempo Δt , decorrido entre esses instantes, $m_{\acute{a}guaprecipitada}(\Delta t)$, subtraindo a massa de água que, no mesmo intervalo de tempo, foi drenada e evaporada, $m_{\acute{a}guadrenada}(\Delta t)$ e

$m_{\text{águaevaporada}}(\Delta t)$, respetivamente. Na Figura 9 são esquematicamente representadas as parcelas, de entrada e saída, intervenientes neste balanço.

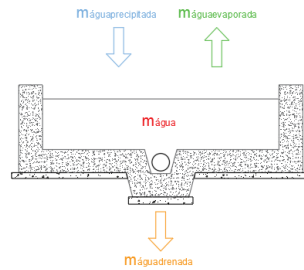


Figura 9 - Representação esquemática do balanço hídrico de massas associado à desidratação de lamas em leitos de secagem

A massa de água inicialmente presente no volume de controlo, isto é, no momento em que as lamas são introduzidas no leito de secagem, t_0 , pode ser determinada a partir dos valores conhecidos da área superficial e da espessura inicial da massa de lamas, correspondentes ao volume de controlo, do valor aproximado da massa volúmica das lamas a desidratar e do valor de TH inicial das lamas (ver Figura 11 - eq.C). De acordo com Metcalf & Eddy (2003), as lamas estabilizadas apresentam, normalmente, valores de massa volúmica entre 1007 e 1020 kg.m^{-3} , pelo que, para efeitos de modelação do processo de desidratação das lamas em leitos de secagem, foi considerado um valor de 1015 kg.m^{-3} para este parâmetro.

A massa de água precipitada sobre o volume de controlo, num determinado intervalo de tempo, foi obtida através do produto entre a altura de água precipitada nesse intervalo, $P(\Delta t)$, a área superficial correspondente ao volume de controlo e a massa volúmica da água, equivalente a 1000 kg.m^{-3} .

A massa de água drenada pode ser determinada a partir das equações apresentadas na Figura 11 (eq.E1 e eq.E2), consoante a fase do processo de desidratação em que as lamas se encontram, traduzida pelo seu valor de TH. Estas expressões foram obtidas através do ajuste da modelação face aos valores obtidos experimentalmente e traduzem a não uniformidade do efeito da precipitação neste processo, ao longo do ciclo. Nestas equações, $D_{\text{acumulada}}(t)$ representa a massa líquida acumulada, removida por drenagem, em cada dia, estimada a partir dos valores medidos nos ensaios experimentais. Como se explica no capítulo 5, a massa de escorrências removida por drenagem nos ensaios experimentais não foi medida diariamente, pelo que os valores obtidos correspondem a valores acumulados no intervalo de tempo entre medições. A estimativa dos valores referentes à massa de água acumulada nos dias entre medições foi obtida através da distribuição da massa de água drenada, acumulada nesses períodos, em cada um desses dias. Para valores de TH superiores a 90%, admitiu-se uma distribuição uniforme da massa de água acumulada nos reservatórios, representada pela expressão i), onde $D_{\text{acumulada}}(\Delta t_d)$ representa a massa de água drenada acumulada no reservatório, medida ao fim do intervalo de tempo entre medições de massa drenada, Δt_d , em dias; $D_{\text{acumulada}}(\Delta t_{d\text{anterior}})$ a massa de água drenada acumulada no reservatório, avaliada na medição experimental anterior e t_d o número de dias decorridos desde a medição da massa de água acumulada anterior. Na expressão correspondente à estimativa da massa drenada para valores

de teor de humidade inferiores a 90% (Figura 11 - eq. E2), $m_{\text{água precipitada}} (\Delta t_d)$ corresponde à massa de água precipitada acumulada em cada intervalo de tempo entre medições de massa drenada, isto é, ao somatório das massas de água precipitadas em cada dia desse intervalo (Figura 11 - eq. D). Assim, para estes valores de humidade, a massa de água removida por drenagem, em cada dia, foi estimada através de uma distribuição ponderada da massa de água precipitada sobre o leito, em função da massa de água drenada acumulada medida, no reservatório, no mesmo intervalo de tempo. Nos intervalos entre medições experimentais em que o valor de TH foi inferior a 90%, mas não ocorreu precipitação, a massa de água removida por drenagem, em cada dia desse intervalo, foi determinada através da expressão correspondente à estimativa da massa drenada para valores de teor de humidade inferiores a 90% (Figura 11- eq. E2). O valor de TH de 90% foi fixado por se ter observado que, para valores inferiores a este, a massa drenada medida nos ensaios experimentais decorreu, fundamentalmente, da ocorrência de precipitação, uma vez que nos intervalos em que esta não ocorreu, para estes valores de TH, os valores de massa drenada acumulada medidos foram bastante reduzidos.

A massa de água evaporada a partir da superfície do volume de controlo foi determinada através de um balanço energético, que se aborda no subcapítulo 4.2.3 (ver Figura 11 - eq. H). Este balanço não tem, no entanto, em conta a massa de água total presente nas lamas, nem as diferentes frações em que esta se distribui. De acordo com o descrito na secção 3.1, a massa de água presente nas lamas divide-se nas frações livre, intersticial, adsorvida e intracelular. A equação H da Figura 11 pode aplicar-se, de forma bastante aproximada, à remoção, por evaporação, da água livre presente nas lamas. A remoção das restantes frações apresenta, no entanto, condicionantes que a expressão apresentada não considera, como as forças de capilaridade a que as moléculas de água estão sujeitas e a maior dificuldade no seu movimento, através da camada de lamas, até à superfície de evaporação. A maior dificuldade de remoção destas frações da massa de água presente nas lamas traduz-se, como também foi explicitado na secção 3.1, no abrandamento da taxa de remoção de água, neste caso, por evaporação.

Na realidade, a partir de uma determinada fase do processo de desidratação, nem toda a energia disponível para evaporação, calculada de acordo com o balanço energético descrito, é efetivamente utilizada para evaporação da água presente nas lamas, em virtude das diferentes frações de água que permanecem nas lamas. Assim, por forma a considerar, de forma aproximada, os fatores acima descritos, traduzindo o conseqüente abrandamento da taxa de remoção de água por evaporação, a massa de água evaporada calculada pela equação H foi, para efeitos de balanço hídrico de massas, limitada em função do TS da camada de lamas ao longo dos ciclos, como indicam as equações G1 a G3 da Figura 11. Os valores de TS a partir dos quais a massa de água evaporada foi limitada foram definidos, por um lado, com base nas percentagens teóricas associadas às diferentes frações de água presente nas lamas, mencionadas na secção 3.1, e considerando os dados obtidos e as observações experimentais, por outro. Desta forma, é também evitada a consideração, pelo modelo, de valores de massa de água evaporada superiores aos da massa de água que, efetivamente, existe nas lamas.

Os limites assim definidos tiveram ainda em conta o facto de as lamas serem habitualmente removidas dos leitos de secagem, em países de clima temperado, quando se atingem valores de TS de aproximadamente 45%. Caso se pretenda aplicar a modelação desenvolvida a países de clima quente e mais seco, devem ser considerados outros patamares de limitação da massa evaporada, incluindo um patamar final, tipicamente com um valor de TS máximo de 90%, de acordo com os ensaios experimentais realizados por Sousa et al. (2001) e Melo (2006), a partir do qual se considere nula a evaporação.

4.2.3 Balanço de energia térmica

A equação de balanço de energia térmica apresentada no fluxograma da Figura 11, definida de acordo com os conceitos apresentados na secção 4.1, foi também aplicada ao volume de controlo considerado. À semelhança da Figura 9, a Figura 10 esquematiza as transferências de energia térmica entre o volume de controlo e o ambiente exterior.

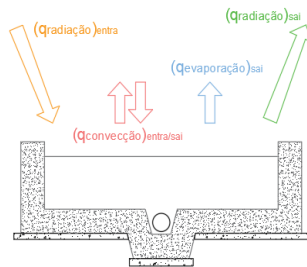


Figura 10 - Representação esquemática do balanço de energia térmica associado ao processo de desidratação de lamas em leitos de secagem

Para determinação da parcela da taxa de transferência de energia térmica por radiação para o interior do volume de controlo, correspondente à radiação emitida pela atmosfera, foram determinados os valores relativos à temperatura equivalente do céu através da equação J, proposta por Berdahl & Martin (1984), à temperatura de orvalho, pressão de vapor e pressão parcial de vapor de água, cujas expressões, correspondentes às equações K, L e M da Figura 11, são indicadas em (Snyder, 1984), e à emissividade da atmosfera, calculada pela equação N, determinada por Brutsaert (1982).

Uma vez que não está definido, na bibliografia existente sobre a matéria, um valor de absorvidade solar específico para lamas de depuração, foram procurados valores respeitantes a materiais semelhantes. De acordo com Martínez, os valores de absorvidade da radiação solar dos solos minerais terrestres podem variar entre 0,4 e 0,8. Dado que as lamas de depuração estabilizadas apresentam tipicamente uma cor acastanhada, escura, na modelação desenvolvida foi considerado um valor de absorvidade da superfície de lamas, α_{s1} , de 0,8. Relativamente à emissividade da superfície das lamas, a mesma fonte refere que os valores médios relativos aos solos variam normalmente entre 0,6 e 0,9, pelo que foi admitido, no presente trabalho, um valor de 0,75 para a emissividade das lamas, ε_{s1} .

A temperatura das lamas foi também calculada de acordo com as equações X1 e X2 da Figura 11, propostas em UNESP (2014) para estimativa da temperatura dos solos face à temperatura do ar, a uma profundidade de 0,02 m e 0,05m, consoante a espessura da camada de lamas aplicada nos

ensaios experimentais. Embora, durante grande parte do tempo, no decorrer dos ciclos de desidratação, a espessura média da camada de lamas no interior dos leitos seja, normalmente, superior aos valores mencionados, uma vez que os valores de temperatura das lamas são utilizados, no modelo, para efeitos de cálculo da massa de água evaporada, e que a evaporação é controlada ao nível da superfície das lamas, isto é, são as moléculas de água mais próximas da superfície da camada de lamas que têm maior facilidade em evaporar, foi considerada a temperatura das lamas a esta profundidade como representativa da temperatura da massa de lamas, não sendo consideradas, no modelo, variações térmicas no interior da camada de lamas. Para espessuras diferentes das aplicadas nos trabalhos experimentais realizados no âmbito desta dissertação, estas equações devem ser adaptadas a profundidades adequadas às mesmas.

Uma vez determinadas, através do procedimento descrito, as taxas de transferência de calor em passo diário, isto é, a quantidade de energia transferida, por radiação e convecção, em cada dia do ciclo de desidratação, a massa de água transferida, através da superfície do volume de controlo, do interior da massa de lamas para o ar, isto é, a massa de água evaporada, foi então determinada pela equação H.

Embora o valor da entalpia de vaporização da água, H_{fg} , possa variar ligeiramente em função da temperatura, para efeitos de modelação foi considerado um valor fixo para este parâmetro, assumindo uma temperatura média diária de 15 °C (o que não está longe da realidade verificada nos ensaios experimentais realizados em Portugal).

4.2.4 Estimativa do teor de sólidos

Embora algumas partículas sólidas possam ser arrastadas, no movimento de percolação da água, e removidas com a água drenada, a modelação desenvolvida não considera a perda de massa sólida no decorrer do ciclo de desidratação, pelo que, em qualquer instante ao longo de todo o ciclo, a massa de sólidos no volume de controlo é a mesma, como é representado no fluxograma da Figura 11 (eq. B).

Esta hipótese de conservação da massa de sólidos no interior do volume de controlo foi suportada pela análise das escorrências removidas nos leitos à escala piloto utilizados nos ensaios experimentais, através da qual foram determinados valores de massa de sólidos removidos inferiores a 0,1% da massa de sólidos presente nas lamas.

Assim, uma vez determinada, através dos balanços de massa e energia, a massa de água presente nas lamas, pode ser determinada a massa de lamas no interior do volume de controlo (Figura 11 - eq. Z) e, conseqüentemente, os valores de TS e a espessura da camada de lamas em cada passo de cálculo (Figura 9 - eq. AZ e eq. BZ). Os resultados da modelação do processo de desidratação de lamas em leitos de secagem através da aplicação das equações acima descritas são apresentados no capítulo 5.

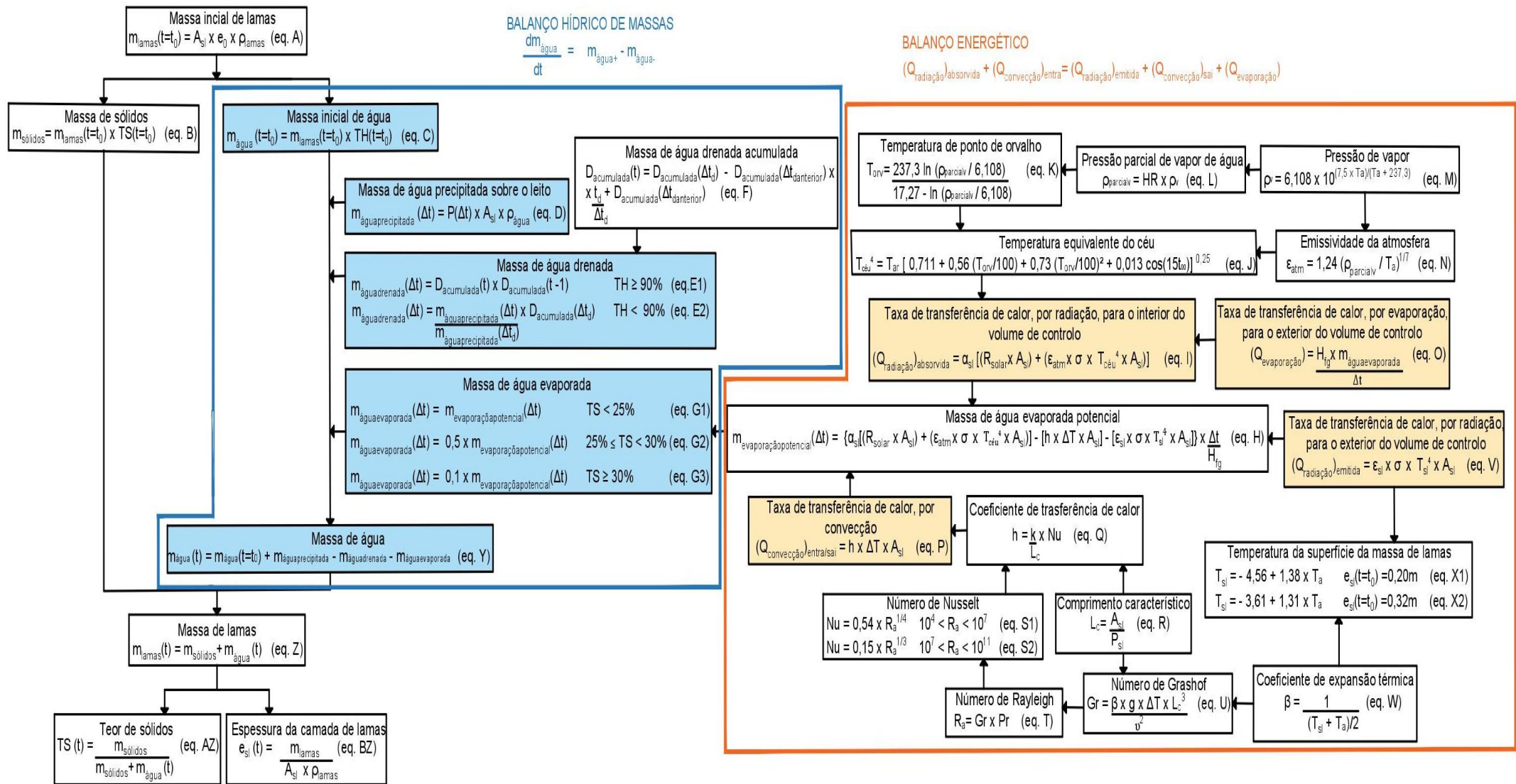


Figura 11 - Fluxograma esquemático do modelo de simulação desenvolvido

5 CASO DE ESTUDO: INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAÇÃO DOS LEITOS DE SECAGEM

5.1 Instalação experimental

5.1.1 ETAR da Póvoa da Galega

A ETAR da Póvoa da Galega, localizada no concelho de Mafra, foi recentemente remodelada, recebendo atualmente um caudal médio de cerca de $900 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, em tempo seco, e $1960 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, em tempo húmido, a que corresponde uma produção de lamas de cerca de $1000 \text{ toneladas} \cdot \text{ano}^{-1}$.

A linha de fase sólida da estação é constituída por um digestor anaeróbio de baixa carga, seguido de leitos de secagem de lamas com uma cobertura do tipo estufa agrícola. Paralelamente aos leitos de secagem, existe ainda um filtro banda. Dos três leitos de secagem existentes, apenas um desempenha efetivamente a função de desidratação de lamas, servindo os restantes para armazenamento das lamas desidratadas até ao seu transporte para destino final. No Anexo II são apresentadas fotografias das estruturas de desidratação de lamas da ETAR. Após tratamento, as lamas produzidas são conduzidas a uma estação de valorização agrícola. O efluente líquido final é descarregado no rio Trancão.

5.1.2 Montagem da instalação piloto

A instalação piloto, composta por 2 leitos de secagem e uma estação meteorológica portátil, foi montada junto aos leitos de secagem à escala real já existentes na ETAR, conforme se representa, esquematicamente, no Anexo II, a uma distância suficiente para que o efeito de sombra da estrutura de cobertura desses leitos não fosse significativo.

Os recipientes utilizados como leitos de secagem, foram constituídos por depósitos de plástico de reagentes utilizados na ETAR, com uma capacidade de 1 m^3 , esvaziados e devidamente lavados, aos quais foi retirada a parede superior, por forma a permitir uma superfície de contacto com o ar de aproximadamente 1 m^2 . Estes depósitos, foram colocados sobre uma estrutura de madeira, ou metálica, assente em 4 pilaretes de tijolo cerâmico, por forma a minimizar o contacto da sua base com o solo, e as perdas de calor por condução que daí poderiam decorrer. Com o objetivo de estabilizar as paredes plásticas dos recipientes, estes foram envolvidos por uma estrutura metálica, conforme se observa na Figura 12.



Figura 12 - Montagem dos leitos de secagem da instalação piloto e pormenor da torneira e recipiente de recolha e armazenamento da água drenada

No seu interior, foi colocado um meio de enchimento, constituído por 3 camadas de diferentes espessuras e granulometrias: uma camada inferior, de 0,2 m de espessura, composta por brita grossa, bem graduada, como diâmetros efetivos entre 20 e 40 mm; uma camada intermédia de seixo fino, com uma espessura de 0,1 m e diâmetros efetivos entre 8 e 12 mm; uma camada superior de areia, com uma espessura de 0,1 m. Na Figura 13, podem observar-se os diferentes materiais constituintes destas camadas.



Figura 13 - Materiais constituintes das diferentes camadas do meio de enchimento: a) brita grossa, b) seixo fino, c) areia, d) rede de proteção do orifício de drenagem

Na sua base, estes depósitos incluem uma depressão longitudinal, formando um pequeno canal, em direção a um orifício existente numa das suas paredes laterais, cuja abertura pode ser controlada por uma válvula do tipo torneira. A altura dos pilaretes em que os depósitos assentam foi definida de forma a possibilitar a existência de um declive de cerca de 1% na sua base, promovendo-se, assim, a drenagem de parte da água presente nas lamas que, após percolar através do meio de enchimento, é canalizada pela referida depressão, em direção ao orifício. A massa de água assim removida do leito, é recolhida e armazenada em recipientes plásticos cobertos, à saída do orifício (Figura 12).

Nos leitos utilizados no último ciclo de desidratação de lamas foi ainda colocada, no orifício e zona envolvente, uma rede de proteção, representada na Figura 13 de forma a impedir a obstrução deste orifício por elementos constituintes do meio de enchimento. O tubo plástico central que se observa na Figura 13, foi colocado por forma a permitir a medição da quantidade de água retida no fundo dos leitos e, assim, identificar eventuais entupimentos neste sistema de drenagem no decorrer dos ciclos.

Junto aos leitos, como mostra a Figura 14, foi instalada uma estação meteorológica portátil, modelo *WS-GP1* da *Delta-T Devices Ltd.*, que permite a medição da temperatura, em $^{\circ}\text{C}$, e humidade relativa, em %, do ar, velocidade, em m.s^{-1} , e direção do vento, radiação solar, em W.m^{-2} , e precipitação, em mm. Os dados meteorológicos medidos pelos sensores são armazenados no *datalogger* incorporado na estação e transferidos para um computador através do software *DeltaLINK 3.2*.



Figura 14 - Localização e pormenor da estação meteorológica portátil WS-GP1.

5.2 Metodologia adotada

5.2.1 Recolha de amostras e medição de parâmetros em campo

Entre setembro de 2016 e junho de 2017 foram realizados 3 ciclos de secagem de lamas, de maneira a avaliar o desempenho dos leitos de secagem face às diferentes condições meteorológicas que se fazem sentir, em Portugal continental, ao longo do ano. Assim, o 1.º ciclo decorreu entre os dias 27 de setembro e 18 de outubro de 2016, o 2.º ciclo entre 18 de outubro e 21 de novembro de 2016 e o 3º ciclo entre 17 de maio e 12 de junho de 2017.

As lamas foram retiradas do digestor anaeróbio a frio que integra a linha de tratamento da fase sólida da ETAR da Póvoa da Galega, e transportadas por bombagem para o interior dos leitos, como se observa na Figura 15, sem qualquer tipo de condicionamento químico.

De forma a evitar a erosão da camada superficial de areia do meio de enchimento, foi utilizada uma placa metálica na fase inicial do carregamento dos leitos, como é também visível nesta figura. As primeiras amostras de lamas foram também retiradas diretamente do digestor. Durante a bombagem de lamas para o interior dos leitos, as válvulas de fecho dos orifícios inferiores dos leitos encontravam-se na posição de fecho, sendo apenas abertas, em simultâneo nos dois leitos, após o carregamento de ambos. Desta forma, considerou-se, em cada ciclo, que o período de secagem das lamas se iniciou no momento de abertura das válvulas.



Figura 15 - Carregamento do leito de secagem de lamas.

Nos 1.º e 2.º ciclos, ambos os leitos foram carregados, com camadas de lamas de 0,32 m e 0,20 m de espessura, respetivamente. No terceiro ciclo realizado, um dos leitos foi colocado no interior da estufa existente na ETAR, de forma a avaliar e comparar o desempenho da mesma. No entanto, e embora tenha sido realizada a recolha e análise de amostras das lamas introduzidas neste leito, de forma semelhante à que será descrita para os restantes leitos, a avaliação do processo de desidratação das lamas nestas condições será alvo de estudo de outra dissertação de mestrado, pelo que os resultados experimentais obtidos relativamente a este leito não serão discutidos no presente documento. Neste ciclo, ambos os leitos foram carregados com uma camada de 0,32 m de espessura. As espessuras da camada de lama adotadas foram selecionadas de forma a comparar os valores máximos e mínimos, aproximados, sugeridos pela maioria da bibliografia referente ao tema. As lamas não foram, em nenhum dos ciclos, revolvidas, por forma a aproximar as características operacionais em vigor na maioria dos leitos de secagem, à escala real, das ETAR portuguesas.

No primeiro dia 1.º e 2.º ciclos de desidratação de lamas, foram retiradas duas amostras de lamas, em cada leito, 2 e 5 horas depois da abertura das válvulas. No entanto, por não se ter verificado uma diferença significativa entre os valores de TS das amostras retiradas do mesmo leito, em diferentes horas do primeiro dia dos ciclos de desidratação, no terceiro ciclo optou-se por retirar apenas uma amostra de cada leito, após 4 horas desde a abertura das válvulas.

Em todos os ciclos realizados, foi retirada uma amostra de lamas de cada leito nos 2.º, 3.º e 7.º dias do período de desidratação. Após este último dia, as amostras de lamas foram retiradas semanalmente nos 1.º e 2.º ciclos, e com um espaçamento de 3 dias no 3.º ciclo. O aumento da periodicidade da recolha de amostras neste último ciclo deveu-se não só à maior disponibilidade de recursos laboratoriais, nesse período, como à verificação de que, para melhor verificação do modelo, seria conveniente um maior número de valores experimentais.

No decorrer das recolhas de amostras, teve-se o cuidado retirar porções de lamas de diferentes profundidades, na tentativa de se obterem amostras representativas das características médias da camada de lamas. Nos 1.º e 3.º dias de cada ciclo, foram também recolhidas amostras das escorrências, isto é, da massa líquida drenada e armazenada nos recipientes correspondentes a cada um dos leitos, a fim de avaliar o tipo de tratamento a que devem ser submetidas. Na Figura 16 podem observar-se os diversos recipientes utilizados para recolha das amostras de lamas e escorrências.

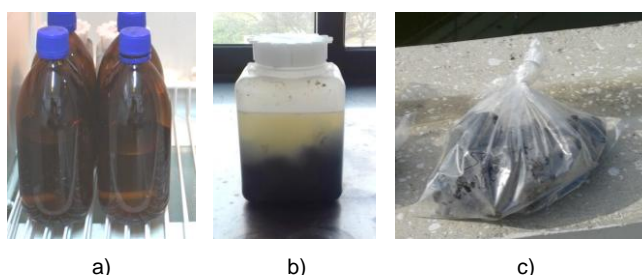


Figura 16 - Recipientes de recolha das amostras de lamas e escorrências: a) frascos de vidro b) frasco de plástico c) saco de plástico

No 1.º ciclo, as amostras de lamas foram inicialmente recolhidas em frascos de vidro (Figura 16a) e congeladas, devido à indisponibilidade de laboratório para análise das mesmas durante este ciclo. No entanto, alguns destes frascos rebentaram no interior da arca congeladora, devido à expansão volumétrica associada ao congelamento e ao gás presente nas lamas, pelo que se optou por recolher as restantes amostras em frascos de plástico (Figura 16b). Para além disso, numa fase mais avançada dos ciclos, as lamas apresentavam já uma consistência bastante espessa, dificultando a introdução das amostras retiradas no gargalo das garrafas plásticas, pelo que, a partir dessa fase, as amostras de lamas foram retiradas em sacos plásticos, devidamente fechados (Figura 16c). As amostras de escorrências foram, em todos os ciclos, recolhidas em frascos de plástico.

Em cada dia de recolha de amostras, foram também medidos a espessura da camada de lamas e a sua temperatura, bem como o volume da massa de líquido drenado, acumulado desde a recolha anterior, a respetiva temperatura e os valores de pH, OD e condutividade correspondentes. Após a

medição destes parâmetros, os recipientes de armazenamento das escorrências foram esvaziados e o líquido drenado foi reconduzida à linha de tratamento da fase líquida da ETAR.

A medição de temperatura, em °C, o OD, em % e a condutividade, em mS.cm^{-1} , das escorrências, foi realizada por uma sonda *YSI MPS* (Figura 17a) e o seu pH foi determinado através de tiras de medição próprias (Figura 17b). A temperatura das lamas foi obtida, numa fase inicial em que as lamas se apresentavam ainda relativamente líquidas, com a mesma sonda e, quando a sua consistência era já mais viscosa, com um termómetro *FANTAST* (Figura 17c), semelhante a um termómetro de cozinha. A temperatura das lamas foi medida a uma profundidade reduzida da camada de lamas, de maneira a que os valores assim obtidos se pudessem comparar aos determinados pelo modelo desenvolvido, validando-os.

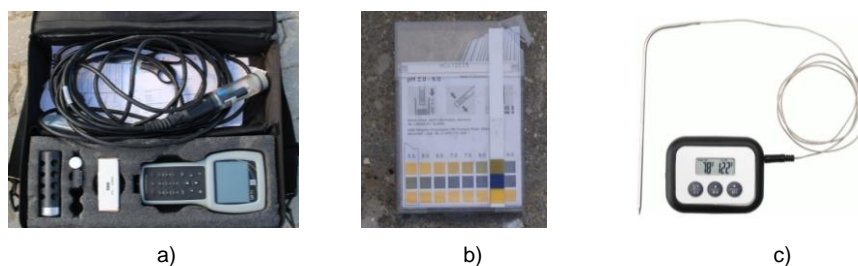


Figura 17 - Materiais utilizados para medição de parâmetros em campo: a) sonda *YSI MPS* b) tiras de medição de pH c) termómetro *FANTAST*

Após a sua recolha e medição, em campo, destes parâmetros, as amostras foram acondicionadas em arcas frigoríficas portáteis e transportadas para os laboratórios de análise.

Os ciclos de secagem de lamas foram dados por terminados quando as lamas apresentavam uma consistência compatível com a sua remoção manual, com o auxílio de pás, sendo, então, retirada a última amostra para análise. Após a sua remoção, as lamas foram encaminhadas para os leitos de armazenamento de lamas desidratadas existentes, sendo posteriormente enviadas para valorização agrícola, em conjunto com as restantes lamas produzidas e desidratadas na ETAR. No segundo ciclo, este critério fim de ciclo não foi aplicado, uma vez que, como é descrito na secção 5.2, os leitos foram inundados, devido a uma obstrução do orifício de saída da massa drenada, pelo que o ciclo foi dado por terminado aquando desta inundação, tendo as lamas sido apenas removidas uns meses mais tarde, após a evaporação da água acumulada no seu interior.

Uma vez terminado cada ciclo, a camada superficial de areia foi novamente nivelada, tendo-se repostado alguma quantidade de areia quando necessário. No 2.º ciclo, este critério fim de ciclo não foi aplicado, uma vez que, como se explica na secção 5.2, ocorreu uma obstrução do orifício de saída das escorrências, que provocou, após a ocorrência de fortes chuvadas, a inundação dos leitos, pelo que o ciclo foi dado por terminado, tendo as lamas sido apenas removidas uns meses mais tarde, após a evaporação da água acumulada no seu interior.

Após a remoção das lamas, no fim de cada ciclo, a camada superficial de areia foi, em parte, substituída e renivelada.

5.2.2 Análise laboratorial das amostras

As amostras de lamas recolhidas foram analisadas laboratorialmente, com vista à determinação dos valores de TS e conteúdo bacteriológico das mesmas, ao longo dos ciclos de desidratação das lamas nos leitos de secagem piloto. Foram também analisados os valores de SST e CQO das escorrências recolhidas.

As análises foram realizadas em diferentes laboratórios, consoante a especificidade dos parâmetros analisados e a sua disponibilidade. Todas as análises bacteriológicas foram requisitadas ao LabIST, bem com as análises de TS das lamas e de SST e CQO das escorrências do 2.º ciclo.

As análises de TS das lamas e de SST e CQO das escorrências do 3.º ciclo foram realizadas no Laboratório da Malveira, com o apoio do Grupo Águas de Portugal e a supervisão do responsável pelo laboratório. Devido à indisponibilidade dos laboratórios referidos, à data da recolha de amostras do 1.º ciclo, estas foram congeladas e posteriormente analisadas em parte no LabAmb e em parte no Laboratório da Malveira, consoante a disponibilidade dos mesmos. Uma vez que o congelamento das amostras pode afetar a atividade microbiológica existente, nestas amostras não foi possível avaliar a presença de *salmonella* e *e. coli* nas lamas.

As análises bacteriológicas foram apenas realizadas, em cada ciclo, às amostras retiradas das lamas do digestor e à última amostra retirada de cada leito. Não foi possível participar nem observar as análises requisitadas ao LabIST, pelo que não serão retratados os procedimentos experimentais correspondentes às análises bacteriológicas, sendo apenas apresentados, na secção 5.3, os resultados obtidos.

Os valores de TS foram avaliados em todas as amostras de lamas, assim como os valores de SST e CQO das amostras de escorrências (retiradas apenas nos primeiro e terceiro dias de cada ciclo). Nos diferentes laboratórios foram realizadas análises em duplicado, na percentagem indicada pelo Standart Methods for the Examination of Water an Wastewater (Rice *et al.*, 2012).

5.2.2.1 Análises de TS das lamas

As análises de TS das lamas foram realizadas, no LabAmb, de acordo com o procedimento 2540 G, indicado por Rice *et al.* (2012), e no Laboratório da Malveira em balanças de medição de massa seca do tipo *KERN D-72322 Balingen-Frommern*, com uma precisão de $\pm 0,003$ g, programada de acordo com o mesmo procedimento.

Em ambos os laboratórios, e nas amostras cuja consistência o permitiu, recolhidas na fase inicial de cada ciclo, as lamas foram trituradas, de forma a garantir a homogeneidade da amostra para análise. Nas amostras de lamas mais secas, com uma textura granular, em que não foi possível a trituração, procurou-se que a fração retirada para análise fosse representativa das características médias da amostra total.

Na Figura 18 e na Figura 19 podem observar-se algumas das etapas correspondentes às análises de teor de sólidos das lamas em ambos os laboratórios.



Figura 18 - Etapas do procedimento de análise de TS das lamas no LabAmbi

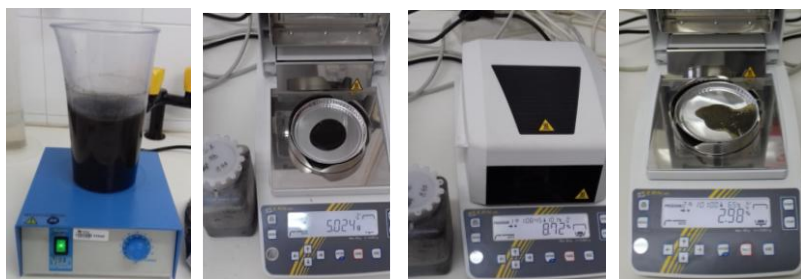


Figura 19 - Etapas do procedimento de análise de TS das lamas no Laboratório da Malveira

5.2.2.1 Análises de SST das escorrências

À exceção das amostras recolhidas no 2.º ciclo, cujos valores de SST foram, como foi já referido, analisados no LabIST, as análises de SST das amostras de escorrências foram realizadas no Laboratório da Malveira, com recursos às balanças acima referidas, programadas de acordo com o procedimento 2540 D, indicado em Rice *et al.* (2012). À semelhança da Figura 18 e da Figura 19, a Figura 20, retrata algumas das etapas deste procedimento.



Figura 20 - Etapas do procedimento de análise de teor de sólido suspensos totais das escorrências no Laboratório da Malveira

5.2.2.2 Análises de CQO das escorrências

As análises de CQO das escorrências foram realizadas, tanto no LabAmb como no Laboratório da Malveira, com recurso aos kits *Spectroquant*, cujo procedimento é acreditado como análogo ao 5220 D indicado por Rice *et al.* (2012). As principais etapas deste procedimento são representadas pela Figura 21.



Figura 21 - Etapas do procedimento de análise de carência química de oxigénio das escorrências no Laboratório da Malveira e no LabAmb

5.3 Resultados experimentais obtidos

5.3.1 Dados meteorológicos

Com foi referido, os dados meteorológicos foram medidos pela estação meteorológica portátil instalada. Foram, assim, determinados os valores médios horários e diários de temperatura e humidade relativa do ar, de radiação solar e os valores diários acumulados de precipitação, ao longo de cada ciclo.

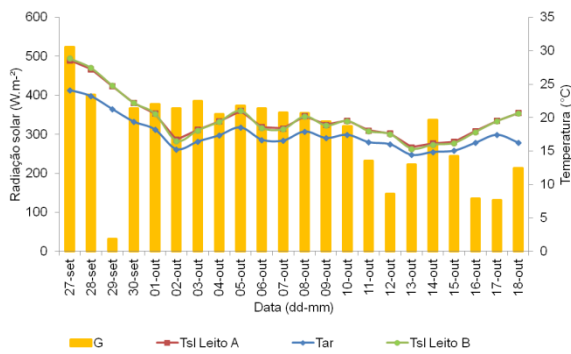
No decorrer do 3.^o ciclo, ocorreu uma avaria no medidor de radiação da estação meteorológica, pelo que os dados medidos, com valores absurdos, não foram utilizados. De forma a aproximar os valores de radiação incidente nas lamas no interior dos leitos de secagem, foram estimados valores com base em dados obtidos, nos ciclos anteriores, por uma estação meteorológica do SNIRH localizada nas proximidades da Póvoa da Galega.

Definida esta relação, e sabendo que a radiação solar constitui o principal parâmetro responsável pela variação da temperatura do ar, e que a precipitação afeta, naturalmente, a sua humidade relativa, nos gráficos da Figura 22a) à Figura 24a) são apresentados os valores médios diários da temperatura do ar, da temperatura das lamas de cada leito e da radiação solar, ao longo de cada ciclo, e, nos gráficos da Figura 22b) à Figura 24b), os valores médios diários da humidade relativa do ar e os valores acumulados da precipitação em cada dia.

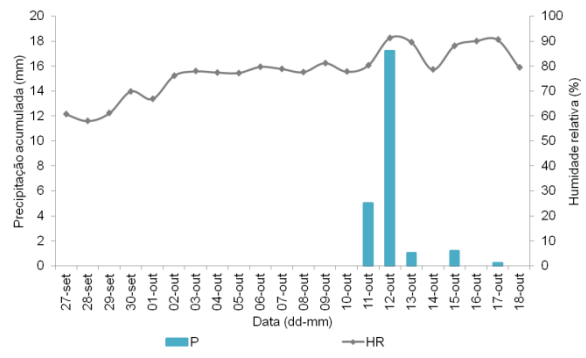
Como seria de esperar, nos 1.^o e 3.^o ciclos de secagem, correspondentes ao princípio do outono e fim da primavera, respetivamente, os valores de temperatura e radiação são mais elevados, relativamente aos valores medidos no 2.^o ciclo, correspondente ao final do outono, em que se verificaram valores mais elevados de precipitação e humidade relativa. É ainda de notar, neste 2.^o ciclo, uma maior oscilação dos valores de temperatura, radiação e humidade relativa.

Os valores de radiação apresentados para o 3.^o ciclo foram, como foi suprarreferido, estimados a partir dos dados medidos por uma estação meteorológica da rede de dados do SNIRH. Estes valores são, em média, mais elevados que os medidos pela estação meteorológica portátil no 1.^o ciclo, bem como os valores de temperatura. Embora, num ano com características médias, em Portugal, pudessem esperar-se valores de temperatura e radiação semelhantes para os meses de maio e setembro, no mês de maio de 2017 verificaram-se valores extraordinários destes parâmetros, tendo mesmo sido o terceiro mês de maio mais quente desde 1931, segundo as estatísticas publicadas pelo IPMA.

Foi também no período correspondente ao 3.^o ciclo que se verificaram menores valores de precipitação. Este ciclo apresenta assim, à partida, as condições mais favoráveis ao adequado desempenho dos leitos de secagem no processo de desidratação de lamas.

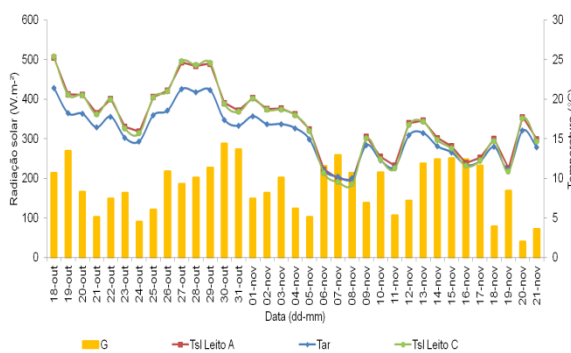


a)

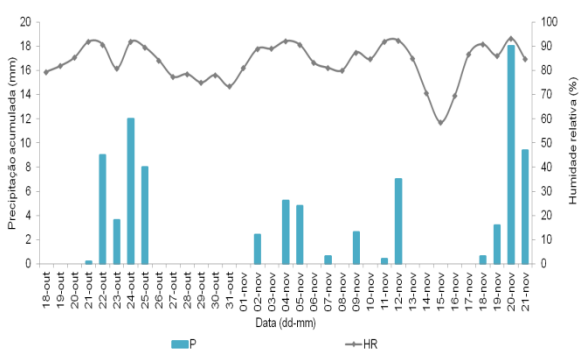


b)

Figura 22 - Dados meteorológicos medidos ao longo do 1.º ciclo: a) valores médios diários da temperatura do ar (T_{ar}), da temperatura das lamas de cada leito (T_{sl}) e da radiação solar (R_{solar}) b) valores médios diários da umidade relativa do ar (HR) e valores acumulados da precipitação em cada dia (P)

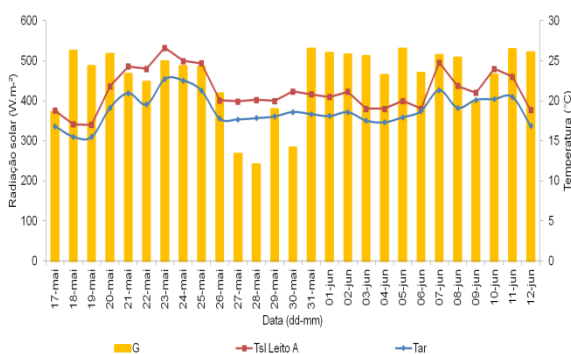


a)

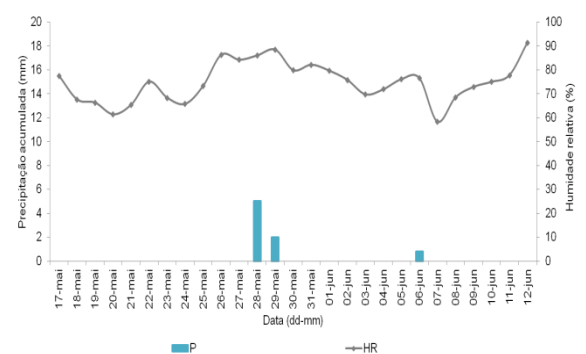


b)

Figura 23 - Dados meteorológicos medidos ao longo do 2.º ciclo: a) valores médios diários da temperatura do ar (T_{ar}), da temperatura das lamas de cada leito (T_{sl}) e da radiação solar (R_{solar}) b) valores médios diários da umidade relativa do ar (HR) e valores acumulados da precipitação em cada dia (P)



a)



b)

Figura 24 - Dados meteorológicos medidos ao longo do 3.º ciclo: a) valores médios diários da temperatura do ar (T_{ar}), da temperatura das lamas de cada leito (T_{sl}) e da radiação solar (R_{solar}) b) valores médios diários da umidade relativa do ar (HR) e valores acumulados da precipitação em cada dia (P)

Embora a estação meteorológica possibilitasse a medição da velocidade do vento, e se preveja que este parâmetro meteorológico possa também influenciar o processo de desidratação das lamas, em particular no que toca à evaporação da água presente nas mesmas, no presente trabalho esta interação não foi analisada.

5.3.2 Evolução do processo de desidratação das lamas, em cada ciclo

O desempenho dos leitos de secagem de lamas pode ser avaliado através da determinação da evolução dos valores de TS da camada de lamas no interior dos leitos, em função do tempo decorrido desde o carregamento. Por outro lado, uma vez que uma das mais valias da desidratação de lamas é a redução do volume a transportar para destino final, a eficiência dos leitos pode também ser avaliada pela diminuição da espessura da camada de lamas ao longo do ciclo. No Quadro 7, são apresentadas, para os diferentes ciclos, as características iniciais das lamas aplicadas, em termos de espessura das camadas introduzidas em cada leito, valores de TS e composição bacteriológica das lamas retiradas do digestor.

Quadro 7 - Características iniciais das camadas de lamas depositadas em cada leito, em cada ciclo.

Identificação do leito		Espessura inicial da camada de lamas	Teor de sólidos	Escherichia coli	Pesquisa de Salmonella spp
		m	%	NMP.g ⁻¹	/50.g ⁻¹
1º Ciclo	Leito A	0,32	2	-	-
	Leito B	0,20			
2º Ciclo	Leito A	0,32	3	1,87 x 10 ⁵	Negativo
	Leito C	0,20			
3º Ciclo	Leito A	0,32	4	9,80 x 10 ⁵	Negativo

1.º Ciclo - 27 de setembro a 18 de outubro de 2017

Nos gráficos da Figura 25 são apresentadas as evoluções dos valores de TS e espessura da camada de lamas no interior dos leitos de secagem piloto A e B no decorrer do 1.º ciclo de desidratação de lamas, realizado entre 27 de setembro e 18 de outubro de 2016. Os valores de TS no dia 0 correspondem aos valores das amostras de lamas retiradas do digestor, no momento do carregamento dos leitos.

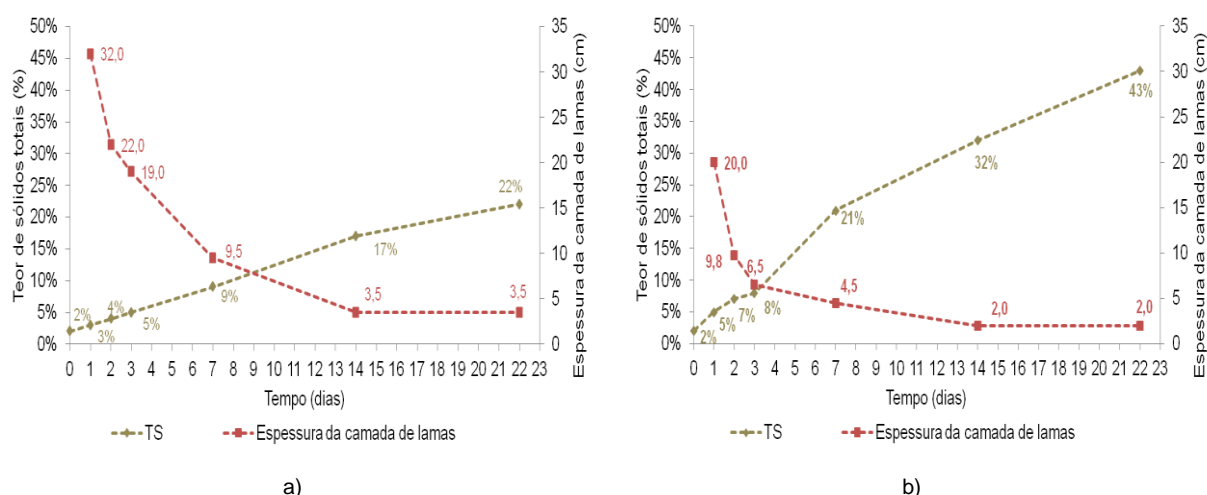


Figura 25 - Evolução dos valores de TS e espessura da camada de lamas no interior dos leitos de secagem piloto ao longo do 1.º ciclo: a) leito A, b) leito B

Como seria de esperar, para as mesmas condições meteorológicas e o mesmo intervalo de tempo, as lamas dispostas na camada com menor espessura inicial, no leito B, apresentam maior valor de TS final. De facto, as lamas depositadas, no leito B, numa camada de espessura inicial cerca de 40%

inferior à espessura da camada de lamas depositada no leito A, apresentam, neste ciclo, um valor final de TS superior em aproximadamente 40%, relativamente às lamas desse leito.

Em termos de evolução da espessura da camada de lamas, é evidente a atenuação da sua diminuição ao longo do ciclo. Note-se, por exemplo, que a espessura da camada do leito B apresentou uma mesma redução, de cerca de 50 %, entre o 1.º e o 2.º dias, e entre o 7.º e o 14.º. Em ambos os leitos, verificou-se também a estabilização da espessura da camada de lamas a partir do 14.º dia, não ocorrendo qualquer diminuição adicional entre este dia e o fim do ciclo de desidratação das lamas.

Apesar dos diferentes valores de teor de sólidos final, a diminuição da espessura associada ao aumento de teor de sólidos das lamas neste ciclo foi de, aproximadamente, 90% em ambos os leitos.

A percentagem de massa líquida drenada foi também semelhante em ambos os leitos, apresentando um valor de 71% relativamente à massa de água total inicial presente nas lamas, no leito A, e 69%, no leito B. A diferença dos valores finais de TS, deve-se, provavelmente, à menor facilidade de evaporação da massa de água presente na camada de lamas de maior espessura, no leito A, uma vez que as moléculas de água serão mais facilmente evaporadas quanto mais perto da superfície da camada de lamas se encontrem. Assim, para uma maior espessura, mais moléculas terão maior dificuldade em evaporar, por se encontrarem a maior distância dessa superfície. A isto acresce o efeito da camada seca e dura que se forma, na superfície das lamas, a partir de uma certa fase do processo de desidratação, e que não só dificulta a incidência dos raios solares nas moléculas situadas a profundidades superiores, no interior da camada de lamas, como aumenta a resistência que as moléculas de água têm de superar no seu movimento ascendente.

No gráfico da Figura 26 apresenta-se a evolução da massa líquida drenada acumulada em ambos leitos.

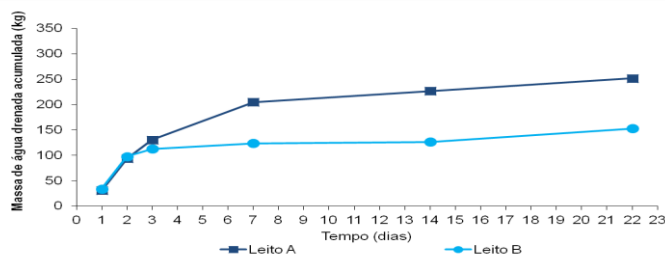


Figura 26 - Massa líquida drenada, acumulada ao longo do 1.º ciclo

Nestes gráficos, é evidente a atenuação, ao longo do ciclo, da quantidade de líquido drenada. A título de exemplo, no leito A, nos primeiros 3 dias a massa de escorrências drenadas representa cerca de 37% da massa de água total inicialmente presente na camada de lamas, ao passo que massa de líquida drenada nos 4 dias seguintes apenas representa 20% desse valor inicial, e entre o 7.º e o 14.º dias a massa drenada representa pouco mais de 6% da total inicial. O ligeiro aumento da taxa de drenagem entre o 14.º dia e o fim do ciclo, notável nos gráficos referentes a ambos os leitos, deve-se, muito provavelmente, à precipitação ocorrida nesse período, como indica o gráfico da Figura 22.

Note-se ainda que, nos primeiros dias, a massa líquida drenada foi praticamente a mesma em ambos os leitos, havendo diferenças significativas apenas a partir do 3.º dia. Entre os 3.º e o 7.º dias, é notável a diferença da taxa de drenagem entre os leitos, bastante superior no leito A, consequência da maior massa de lamas e, logo, de água, inicialmente introduzida neste leito. Do 7.º dia em diante, a taxa de drenagem é semelhante para os dois leitos.

No Quadro 8 são apresentados os valores dos parâmetros analisados nas amostras de escorrências, recolhidas no 1.º e 3.º dias do processo de desidratação.

Quadro 8 - Valores dos parâmetros analisados nas amostras de escorrências do 1.º ciclo.

Leito	Parâmetro analisado	Unidades	Dia 1	Dia 3
A	Sólidos suspensos totais	g.l ⁻¹	5,00	0,25
	Carência química de oxigênio	mg.l ⁻¹	2502,50	174,00
B	Sólidos suspensos totais	g.l ⁻¹	0,45	0,16
	Carência química de oxigênio	mg.l ⁻¹	419,50	192,50

Embora se verifique uma redução nestes 3 dias, os valores de CQO das escorrências drenadas nos leitos não cumprem os requisitos para as descargas de ETAR urbanas impostos pelo Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de junho de 1997, pelo que se confirma a necessidade de recondução à linha de tratamento da fase líquida.

Os reduzidos valores de SST medidos nas escorrências, à exceção das removidas do leito A, no primeiro dia, permitem corroborar a hipótese de que a massa de sólidos removida das lamas com a massa de água drenada pode ser desprezada, para efeitos de determinação dos valores de TS das mesmas, considerada no modelo desenvolvido.

Os valores de SST e CQO significativamente elevados, face aos restantes, das escorrências retiradas do leito A no 1.º dia deste ciclo, devem-se ao facto de, imediatamente após a abertura das torneiras, se ter verificado a saída de uma quantidade significativa de sólidos, como se observa na Figura 27a). Esta escorrência de lamas deveu-se à distorção de uma das paredes plásticas do leito piloto, causada pela pressão efetuada pela prancha metálica no momento da bombagem das lamas para o interior deste leito. Após remoção da porção de massa de lamas que assim percolou através do meio de enchimento, a saída de lamas através do orifício de drenagem foi interrompida, retomando-se a drenagem normal de escorrências no leito, como mostra a Figura 27b). Na bombagem de lamas para o interior do leito B a prancha não foi encostada à parede lateral do leito, pelo que não se verificou este incidente.



a)



b)

Figura 27 - Leito A: a) saída de lamas pelo sistema de drenagem após distorção acidental da parede do leito
b) saída normal de escorrências, após retoma da forma inicial da parede do leito

Como foi supracitado, devido a indisponibilidade de laboratórios neste período, as amostras de lamas e escorrências recolhidas no 1.º ciclo foram congeladas e só posteriormente analisadas, pelo que não é possível apresentar valores relativos a análises bacteriológicas.

2.º Ciclo - 18 de outubro a 21 de novembro de 2016

Nos gráficos da Figura 28 são apresentadas as evoluções dos valores de TS e espessura da camada de lamas no interior dos leitos de secagem piloto A e C no decorrer do 2.º ciclo de desidratação de lamas, realizado entre 18 de outubro e 21 de novembro de 2016. Neste ciclo, o leito B foi substituído pelo leito C devido apenas ao melhor estado de conservação da estrutura de suporte deste último.

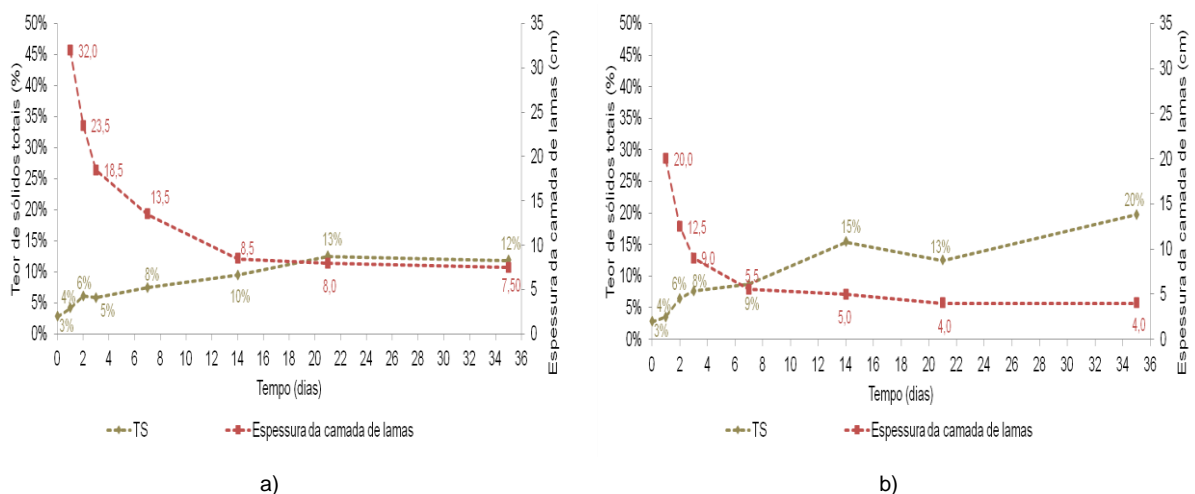


Figura 28 - Evolução dos valores de TS e espessura da camada de lamas no interior dos leitos de secagem piloto ao longo do 2.º ciclo: a) Leito A, b) leito C

À semelhança do relatado relativamente ao 1.º ciclo, para as mesmas condições meteorológicas e o mesmo intervalo de tempo, as lamas dispostas no leito C, numa camada com menor espessura inicial, apresentaram um maior valor de TS final, embora nos primeiros dias do ciclo esta diferença não seja tão evidente, o que leva a crer que a espessura das camadas de lamas influencia sobretudo o processo de evaporação da água presente nas lamas, e não tanto a drenagem

No entanto, neste ciclo, não é verificada, em nenhum dos leitos, a tendência sempre crescente, ao longo do ciclo, dos valores de TS das lamas, ocorrendo uma diminuição, no leito A, entre o 21.º dia e o fim do ciclo, e, no leito C, entre o 14.º e o 21.º dias. Esta redução deve-se, muito provavelmente, à elevada precipitação verificada nestes períodos.

Adicionalmente, no 35.º dia, verificou-se que o sistema de drenagem de ambos os leitos se encontrava comprometido, uma vez que, apesar da precipitação elevada nos dias antecedentes, os recipientes de armazenamento das escorrências se encontravam vazios, e os leitos apresentavam, no seu interior, uma camada de água sobre a camada de lamas, como ilustra a Figura 29.



Figura 29 - Camada de água acumulada no interior do leito de secagem piloto, no 35.º dia do 2.º ciclo

Por esta razão, embora as lamas não estivessem ainda em condições de ser removidas dos leitos, o ciclo foi dado por terminado neste dia. Mais tarde, percebeu-se que o orifício de saída da massa de água drenada se encontrava obstruído pelas partículas da camada inferior do meio de enchimento, de gravilha mais grossa, razão pela qual foi colocada a rede já mencionada.

Dada a humidade aparente, neste dia, das lamas de ambos os leitos, o valor final de TS, medido nas lamas do leito C, de 20% parece pouco plausível, pelo que terá provavelmente ocorrido algum erro na análise laboratorial deste parâmetro na amostra retirada desse leito. Por esta razão, este leito não foi considerado para aplicação da modelação desenvolvida, uma vez que, à falta deste valor, não seria correta a comparação dos valores previstos pelo modelo com os valores medidos experimentalmente.

Apesar da ineficiência do sistema de drenagem ter comprometido, neste ciclo, o decorrer do processo natural de desidratação das lamas, verificou-se uma redução da espessura de lamas de aproximadamente 80% em ambos os leitos, uma vez que a obstrução do orifício de saída de escorrências se deu numa fase do ciclo já relativamente avançada.

Neste ciclo, verificou-se também a tendência de diminuição mais acentuada da espessura da camada de lamas nos primeiros dias do ciclo, estabilizando à medida que o processo de desidratação evolui.

Devido aos elevados valores de precipitação registados ao longo deste ciclo, o valor medido da massa total de líquido drenada nos leitos foi bastante elevado, sendo mesmo superior à massa de água inicialmente presente nas lamas no leito C (o que leva, uma vez mais, à exclusão do valor de TS final determinado experimentalmente para este leito).

Ainda assim, nem toda a massa de água precipitada foi contabilizada nas medições de volume do líquido drenado, uma vez que toda a água precipitada após a obstrução do orifício de saída ficou retida no interior dos leitos, não sendo recolhida nos recipientes de armazenamento de escorrências, pelo que o valor real da massa drenada seria certamente superior ao medido, em ambos os leitos.

No gráfico da Figura 30 apresenta-se a evolução dos valores medidos da massa líquida drenada acumulada, em ambos leitos, ao longo deste ciclo.

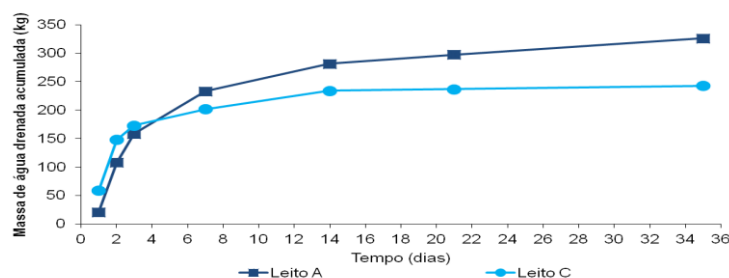


Figura 30 - Massa de água drenada acumulada ao longo do 2.º ciclo

Nestes gráficos, é novamente notória a atenuação, ao longo do ciclo, da quantidade de água drenada. Tal como no 1.º ciclo, no leito A, cuja camada de lamas apresentava inicialmente maior espessura, observaram-se maiores taxas de drenagem ao longo do ciclo, embora tenham sido medidos, nos primeiros dias do ciclo, valores superiores da massa drenada no leito C.

Os valores dos parâmetros analisados nas amostras de escorrências, recolhidas no 1.º e 3.º dias do processo de desidratação, são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 - Valores dos parâmetros analisados nas amostras de escorrências do 2.º ciclo

Leito	Parâmetro analisado	Unidades	Dia 1	Dia 3
A	Sólidos suspensos totais	g.l ⁻¹	7,6	0,24
	Carência química de oxigénio	mg.l ⁻¹	9800	148
C	Sólidos suspensos totais	g.l ⁻¹	1	0,13
	Carência química de oxigénio	mg.l ⁻¹	1500	209

Neste quadro, notam-se novamente valores elevados de SST e CQO nas escorrências recolhidas no primeiro dia, desta vez em ambos os leitos. De facto, observou-se, uma vez mais, a percolação de uma porção de massa de lamas através do meio de enchimento, embora a placa metálica de proteção contra a erosão não tenha sido encostada às paredes dos leitos. Assim, pensa-se que este fenómeno pode ter ocorrido, neste leito, devido ao facto de se ter aplicado um jato de água para limpeza do meio de enchimento, previamente ao carregamento das lamas, o que poderá ter provocado o arrastamento de algumas partículas da camada superior de areia, criando vazios com dimensões elevadas que permitiram a passagem de sólidos aquando do carregamento.

Desta forma, para além dos sólidos das lamas, os próprios finos minerais arrastados podem ter contribuído para o elevado valor de SST das escorrências recolhidas neste dia. Após esta saída inicial de sólidos através do orifício, a drenagem de escorrências prosseguiu o seu curso habitual, com reduzida saída de sólidos, como indicam os valores dos parâmetros medidos nas escorrências no 3.º dia deste ciclo. Possivelmente, o peso da massa de lamas sobre a areia provocou alguma compactação desta camada, reduzindo a dimensão dos vazios criados pelo jato de água, restituindo a sua capacidade de filtração.

3º Ciclo - 17 de maio a 12 de junho de 2017

No gráfico da Figura 31 são apresentadas as evoluções dos valores de TS e espessura da camada de lamas no interior do leito de secagem A, no decorrer do 3.º ciclo de desidratação, realizado entre 17 de maio e 12 de junho de 2017. Não foram realizados ciclos de desidratação entre o dia 21 de novembro de 2016 e o dia 17 de maio de 2017 por falta de recursos, nesse período, uma vez que alguns dos dispositivos utilizados foram necessários para realização de outros trabalhos experimentais. Note-se ainda que não foram medidos valores de TS entre o 16.º e o 23.º dias deste ciclo, por indisponibilidade de recursos neste período.

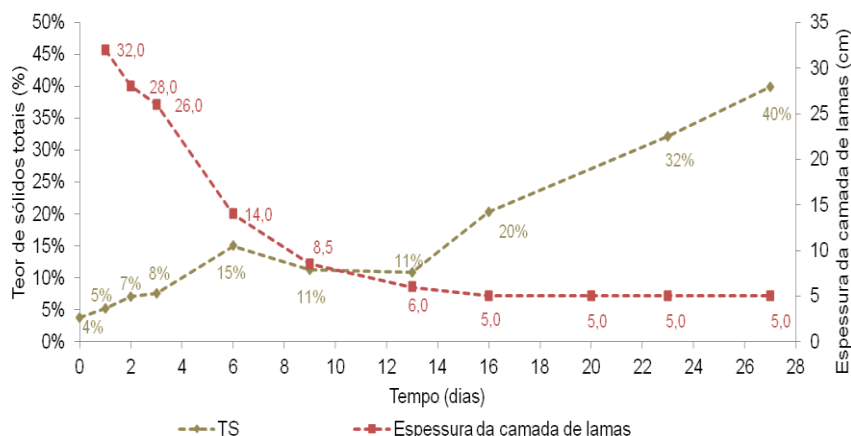


Figura 31 - Evolução dos valores de TS e espessura da camada de lamas no interior do leito de secagem A, ao longo do 3.º ciclo

O valor inicial de TS das lamas neste ciclo é relativamente elevado. De acordo com os operadores responsáveis pela ETAR da Póvoa da Galega, nos dias que antecederam o carregamento dos leitos experimentais, neste ciclo, afluiu à linha de tratamento da ETAR um caudal de AR bastante superior ao habitual, possivelmente causado por uma descarga indevida no sistema de drenagem que serve a estação de tratamento, pelo que a quantidade de lamas produzida excedeu a capacidade de tratamento da ETAR, o que pode justificar este aumento do valor de TS das lamas retiradas do digestor. No momento do carregamento das lamas para o interior dos leitos foi notória a maior viscosidade das mesmas, que apresentaram maior resistência à bombagem, tendo mesmo sido necessário o aumento da potência das bombas para o transporte das lamas ao longo da mangueira de alimentação dos leitos.

Comparando o gráfico da Figura 31 com o gráfico apresentado na Figura 24, é evidente, neste ciclo, o efeito da precipitação no processo natural de desidratação das lamas, notando-se uma diminuição no valor de teor de sólidos das lamas entre o 6.º e o 13.º dias, decorrente do aumento da humidade e da precipitação ocorrida nesse intervalo de tempo. O ciclo foi dado por terminado ao fim do 27.º dia por se ter verificado que, embora o valor de TS pudesse ainda aumentar, as lamas se encontravam já em condições de ser removidas, podendo a sua permanência adicional nos leitos dificultar, posteriormente, a sua adequada remoção.

O maior valor de TS inicial das lamas teve também influência no processo de drenagem das lamas. Como foi explicitado na secção 3.1, a concentração elevada de sólidos pode afetar as taxas de

remoção de água, uma vez que será, à partida, menor a fração de água livre presente. De facto, a massa de escorrências drenadas, medida no 1.º dia do 3.º ciclo, foi bastante inferior à medida em qualquer dos ciclos restantes. Na Figura 32, podem observar-se as taxas de drenagem verificadas ao longo deste ciclo.

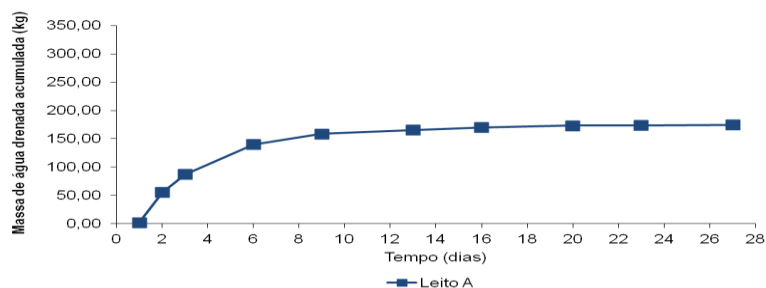


Figura 32 - Massa de água drenada acumulada ao longo do 3.º ciclo

Comparando o 3.º e o 1.º ciclos, apesar da espessura da camada de lamas, no leito A, ser a mesma em ambos os ciclos, e do valor de TS determinado ao 22.º dia ser superior nas lamas do 3.º ciclo, a massa total drenada neste último é bastante inferior. Este facto pode ser justificado pelos valores superiores de radiação solar que se fizeram sentir nos meses de maio e junho de 2017, relativamente a setembro e outubro de 2016, que contribuíram para uma maior quantidade de água evaporada no 3.º ciclo. Para além disso, ao maior valor de TS inicial medido corresponde, como foi referido, menor quantidade de água livre presente nas lamas e, logo, menor massa drenável.

Os valores reduzidos de massa líquida drenada nos primeiros dias, justificam a menor variação inicial da espessura das lamas, face à verificada nos restantes ciclos. Esta menor variação inicial foi, no entanto, rapidamente compensada a partir do 3.º dia, tendo-se obtido uma redução de espessura, no final do ciclo, de cerca de 85%.

Deve ainda referir-se, relativamente a este ciclo e aos restantes, que a redução de volume associada à desidratação das lamas é ainda superior à redução da espessura, uma vez que, na fase final do ciclo de secagem em que as fissuras formadas atingem a camada de areia, é significativa a retração horizontal das lamas, formando torrões espaçados entre si, como ilustra a Figura 33, correspondente aos últimos dias dos 1.º e 3.º ciclos.



Figura 33 - Torrões formados pela fissuração e retração horizontal da camada de lamas. a) 1.º ciclo; b) 3.º ciclo

Nesta figura é também evidente o efeito observado por Samudiu (1993), citado em Mortara (2011), e por Turovsky e Mathai (2006), referido no subcapítulo 3.2.1, relativamente à dimensão dos torrões formados pelo efeito de fissuração da camada de lamas. No final do 3.º ciclo, cujas lamas apresentariam, inicialmente, um menor grau de estabilização devido ao facto de a quantidade de lamas produzida exceder a capacidade o digestor a frio da ETAR, os torrões formados apresentam maiores dimensões.

Finalmente, no gráfico da Figura 34 resumem-se os valores de teor de sólidos obtidos experimentalmente em todos os leitos, nos vários ciclos de secagem realizados.

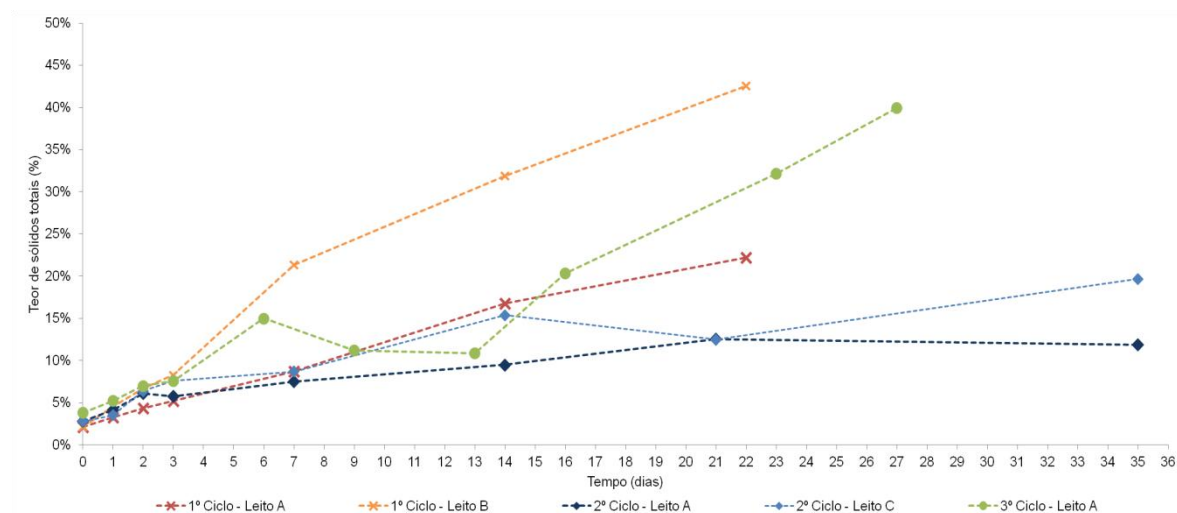


Figura 34 - Evolução dos valores de teor de sólidos totais (TS) no interior dos leitos de secagem piloto ao longo dos vários ciclos, nos diferentes leitos

Comparando as curvas de TS correspondentes a camadas de lamas com a mesma espessura, isto é, dos leitos B e C e do leito A em cada ciclo, pode concluir-se, corroborando as considerações expostas no capítulo 3, que as condições meteorológicas têm elevada influência no processo de desidratação natural das lamas em leitos de secagem. De facto, nos ciclos de desidratação em que se verificaram maiores valores de temperatura e radiação solar e menores valores de humidade relativa e precipitação, foi possível obter, no mesmo intervalo de tempo, valores de TS significativamente mais elevados. Note-se, por exemplo, que ao 7.º dia as lamas introduzidas no leito A apresentaram valores de teor de sólidos de 9%, no 1.º ciclo, 8% no 2.º ciclo e 15% no 3.º ciclo. No mesmo dia, a camada de lamas disposta no leito B no 1.º ciclo, com uma espessura de 0,2m, apresentou um valor de 21% de TS, ao passo que na camada colocada no leito C, no 2.º ciclo, com a mesma espessura inicial, foi medido um valor de 9%.

Através deste gráfico não se podem, no entanto, tirar conclusões relativamente à não uniformidade do efeito da precipitação neste processo, ao longo do ciclo, apontada no capítulo 3, uma vez que no período chuvoso do 1.º ciclo, que ocorreu entre o 15.º e o 19.º dias, numa fase do ciclo em que as gretas responsáveis por esta não uniformidade já se teriam formado, não houve recolha de amostras.

Em termos de espessura, observa-se que, ao fim de 22 dias, se obtiveram reduções superiores a 90%, no 1.º ciclo, entre 75 e 80%, no 2.º ciclo, e de cerca de 85% no 3.º, valores em geral, superiores à redução esperada deste processo e indicada no capítulo 3. Estes valores, que não contabilizam a redução adicional de volume provocada pela fissuração e formação de torrões ilustrada na Figura 33 demonstram uma das maiores vantagens associadas à desidratação de lamas em leitos de secagem.

Observando as diferentes curvas de desidratação da Figura 34, verifica-se que, de um modo geral, há um aumento da taxa de desidratação após os primeiros 4 a 7 dias de cada ciclo. Este aumento, deve-se provavelmente à fissuração da camada de lamas, cujo efeito potenciador da evaporação da massa de água presente nas lamas foi já apontado. Numa fase mais avançada dos ciclos, é observável o efeito contrário, isto é, o abrandamento do processo de desidratação, traduzido pela menor variação dos valores de TS ao longo do tempo. Este abrandamento é justificado pela diminuição da quantidade de água presente nas lamas passível de evaporar, isto é, pelo acréscimo gradual na dificuldade de remoção das diferentes frações de água presentes nas lamas, à medida que a quantidade de água livre diminui.

Um outro fenómeno observado no decorrer dos vários ciclos realizados foi o efeito de sombra da parede do próprio leito. À medida que a espessura da camada de lamas diminuiu, em cada leito, a parede lateral, virada a Sul, dos leitos de secagem sombreava parte da camada de lamas, sendo notória a diferença entre a humidade da zona sombreada relativamente à superfície exposta ao sol, como ilustra a Figura 35. Este efeito, que evidencia a influência da radiação solar no processo de desidratação das lamas, foi particularmente visível no decorrer do 2º ciclo em que, dada a época do ano, o sol se encontrava menos elevado ao longo do dia, sendo maior a sombra provocada. No decorrer de todos os ciclos as amostras de lamas foram retiradas da zona não sombreada da camada de lamas.

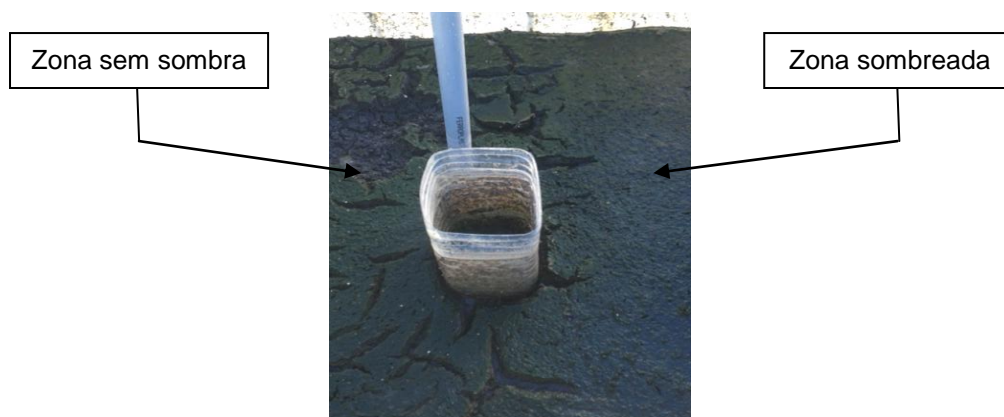


Figura 35 - Diferente aspeto entre a zona da camada de lamas sem sombra e a zona sombreada

Relativamente à drenagem nos leitos, verificou-se, em todos os ciclos, que, embora a maior parte dos autores defina um valor de 80% de TH nas lamas como limite para a ocorrência deste processo, no decorrer dos vários ciclos de desidratação os maiores valores de massa líquida drenada se verificaram para valores de TH superiores a 90%, sendo pouco significativa a quantidade de água removida por drenagem para valores inferiores a este, à exceção dos períodos de ocorrência de precipitação.

Através dos ensaios laboratoriais realizados no decorrer dos ciclos experimentais, verificou-se ainda o efeito de redução de microrganismos patogênicos associado à exposição solar das lamas desidratadas em leitos de secagem, contribuindo favoravelmente para a potencial valorização agrícola das mesmas, mais valia deste processo que foi também mencionada no capítulo 3.

No Quadro 10 são apresentadas, para os diferentes ciclos, as características das lamas desidratadas, em termos de espessura das camadas introduzidas em cada leito, valores de TS e composição bacteriológica das lamas retiradas do digestor.

Quadro 10 - Características finais das camadas de lamas desidratadas em cada leito, em cada ciclo.

Identificação do leito		Espessura inicial da camada de lamas	Teor de sólidos	Escherichia coli	Pesquisa de Salmonella spp
		m	%	NMP.g ⁻¹	/50.g ⁻¹
1º Ciclo	Leito A	0,035	28,0	-	-
	Leito B	0,020	43,0		
2º Ciclo	Leito A	0,075	12,0	4,10 x 10 ⁴	Negativo
	Leito C	0,040	20,0	1,72 x 10 ⁴	
3º Ciclo	Leito A	0,050	40,0	6,13 x 10 ⁴	Negativo

Refere-se ainda que os valores de TS obtidos no final de cada ciclo se aproximam aos valores obtidos experimentalmente por Gharaibeh *et al.* (2007) e Sousa (2012), em Wollongong e São Paulo, cujo clima temperado se assemelha ao português, sendo bastante inferiores aos obtidos por Soares *et al.* (2001) e Melo (2006), em Brasília e Campina Grande, que apresentam um clima mais seco e quente.

No Anexo IV é apresentada a evolução do aspeto das lamas introduzidas nos leitos de secagem, ao longo do processo de desidratação em cada ciclo, em cada leito.

5.4 Modelação do desempenho dos leitos de secagem

5.4.1 Considerações gerais

Uma vez obtidos os dados meteorológicos e conhecidas as dimensões dos leitos, a espessura das camadas de lamas aplicadas em cada leito e o TS inicial das mesmas, indicados no Quadro 7, foi aplicado o modelo, descrito no capítulo 4, para previsão dos valores de TS e espessura da camada de lamas ao longo do ciclo de desidratação nos leitos de secagem experimentais considerados. Pelas razões já enunciadas, o leito C não foi considerado na modelação.

5.4.2 Balanço de massas

Na Figura 36 representa-se graficamente a aplicação global, isto é, para o intervalo de tempo total em que decorreu cada ciclo, do balanço de massas considerado no modelo, a cada leito.

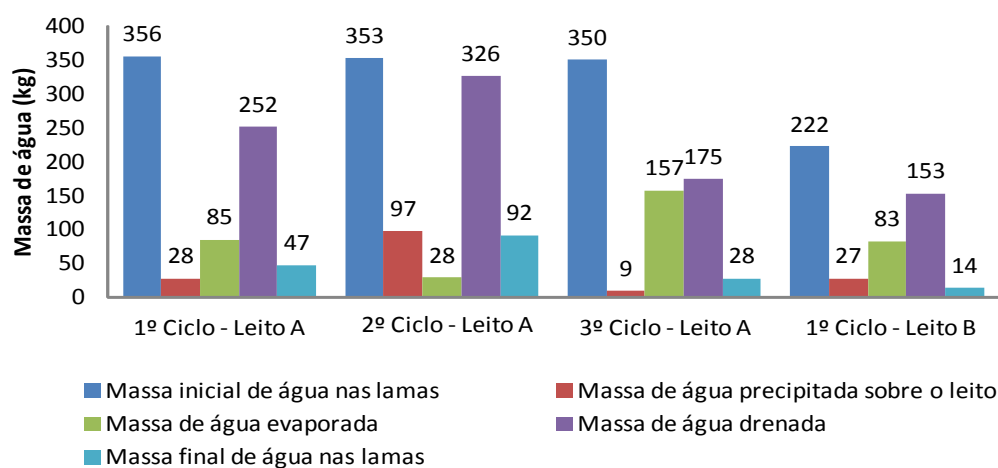


Figura 36 - Representação gráfica do balanço total de massas em cada ciclo

A influência dos dados meteorológicos no processo de remoção de água das lamas em leitos de secagem é, uma vez mais, evidenciada neste gráfico em que, no leito A, a massa líquida inicialmente presente nas lamas apresentou valores muito semelhantes nos diferentes ciclos, obtendo-se valores de massa final muito diferentes, face às diferentes massas totais de água precipitada e evaporada ao longo do ciclo.

Comparando os resultados obtidos na modelação, em termos de balanço global de massas, para os leitos A e B, no 1.º ciclo, confirma-se que a percentagem da massa total de água evaporada no leito B, face à massa de água inicialmente presente nas lamas (cerca de 42%), foi, de facto, bastante superior à verificada no leito A (aproximadamente 27% da massa total inicial), o que se deve à menor facilidade de evaporação da massa de água presente na camada de lamas de maior espessura, conforme foi referido em 5.2.1.

Como seria de esperar, face aos valores de temperatura e radiação indicados, a massa de água evaporada no 3.º ciclo é bastante superior às verificadas nos restantes ciclos. Desta forma, embora a massa líquida drenada seja bastante inferior às medidas nos 1.º e 2.º ciclos, no 3.º ciclo obtém-se um menor valor de massa de água presente nas lamas desidratadas, no final do ciclo.

5.4.3 Balanço energético

Nos gráficos da Figura 37 é representada a aplicação das equações de transferência de calor apresentadas no capítulo 4 ao longo de cada ciclo, em cada leite, bem como o valor da massa de água evaporada, em cada dia, correspondente ao balanço energético considerado.

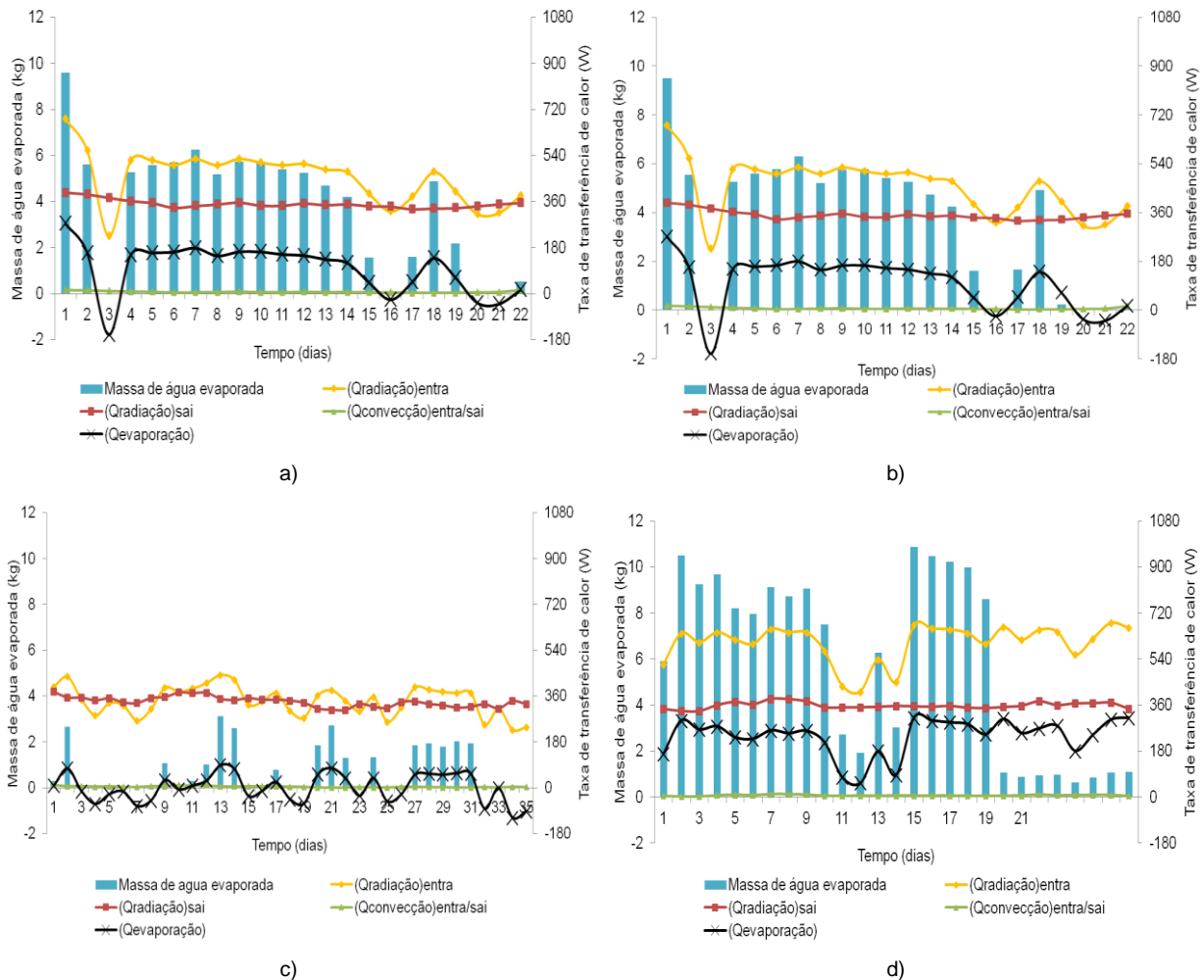


Figura 37 - Representação gráfica da aplicação das equações de transferência de calor ao longo dos diferentes ciclos, em cada leite: a) 1.º ciclo - leite A, b) 1.º ciclo - leite B, c) 2.º ciclo - leite A, d) 3.º ciclo - leite A

Observando as curvas correspondentes às diferentes formas de transferência de calor entre as lamas e o ar envolvente, verifica-se que a taxa de transferência da energia disponível para evaporação da massa de água presente nas lamas é maioritariamente influenciada pela taxa de transferência de calor por radiação que entra no volume controlado. Embora os valores desta taxa de transferência dependam, de acordo com as expressões indicadas no fluxograma da Figura 11, da radiação solar e da temperatura equivalente do céu, comparando as curvas de $(Q_{radiação})_{absorvida}$ com os valores de radiação solar medidos ao longo de cada ciclo, apresentados nas Figura 22a) a 24a), é evidente a maior influência da parcela correspondente à radiação solar emitida, face à radiação emitida pela atmosfera, que depende fundamentalmente da temperatura e da humidade relativa do ar. Os valores

de $(Q_{\text{radiação}})_{\text{absorvida}}$ são, por isso, mais elevados no e 3.º ciclo, em que os valores de radiação medidos são também superiores aos que se verificaram nos 1.º e 2.º ciclos.

A parcela do balanço energético correspondente à taxa de transferência de calor emitida pelas lamas, isto é, $(Q_{\text{radiação}})_{\text{emitida}}$, foi, em todos os ciclos e para todos os leitos, pouco variável ao longo o processo de desidratação, uma vez que acompanha os valores da temperatura média das lamas, em cada dia do ciclo, cuja variação é pouco significativa, comparativamente às amplitudes de variação da radiação solar emitida.

A expressão dos valores de transferência de calor por convecção entre as lamas e o ar envolvente, $(Q_{\text{convecção}})_{\text{entra/sai}}$ é bastante reduzida, face às restantes parcelas do balanço energético, uma vez que esta é proporcional à diferença entre os valores de temperatura das lamas e do ar que é, naturalmente reduzida. A valores da temperatura das lamas superiores aos valores de temperatura do ar correspondem valores de $(Q_{\text{convecção}})_{\text{entra/sai}}$, na equação de balanço, positivos, isto é, a transferência de calor por convecção ocorre das lamas para o ar, diminuindo a quantidade de energia disponível, no volume de controlo, para evaporação da água presente nas lamas, e a valores de temperatura das lamas inferiores aos valores de temperatura do ar corresponde o oposto.

Assim, os valores da taxa de energia disponível para evaporação da massa de água presente nas lamas, $(Q_{\text{evaporação}})$, obtidos através do balanço energético aplicado, são significativamente superiores nos ciclos em que se registaram maiores valores de temperatura e radiação solar e menores valores de humidade relativa. A isto correspondem, naturalmente, maiores massas de água evaporada, nos 1.º e 3.º ciclos, relativamente à massa evaporada ao longo do 2.º ciclo. Neste 2.º ciclo, é notável a maior proximidade entre os valores das taxas de energia transferidas, por radiação, para o interior e o exterior do leito, a que correspondem, evidentemente, menores valores da taxa de energia disponível para evaporação e, logo, menores massas evaporadas.

Nos dias em que, de acordo com a expressão matemática do balanço energético, se obtiveram valores negativos de $(Q_{\text{evaporação}})$, o que, na prática, significa que não há energia disponível para que ocorra evaporação, os valores de $m_{\text{água evaporada}}$ foram considerados nulos, isto é, considerou-se que nestes dias não ocorreu evaporação da água presente nas lamas.

Nos últimos dias do 1.º e 3.º ciclos, nos leitos B e A, respetivamente, em que se obtiveram valores de TS superiores a 25%, os valores de massa de água evaporada foram, de acordo com o exposto no capítulo 4, limitados, por forma a traduzir o efeito do abrandamento do processo de desidratação das lamas, consequência da menor massa de água disponível para evaporação e, logo, da não utilização de toda a energia disponível para evaporação neste processo.

O gráfico da Figura 38 representa os resultados, em termos de TS, obtidos através da aplicação do modelo aos diferentes ciclos de desidratação.

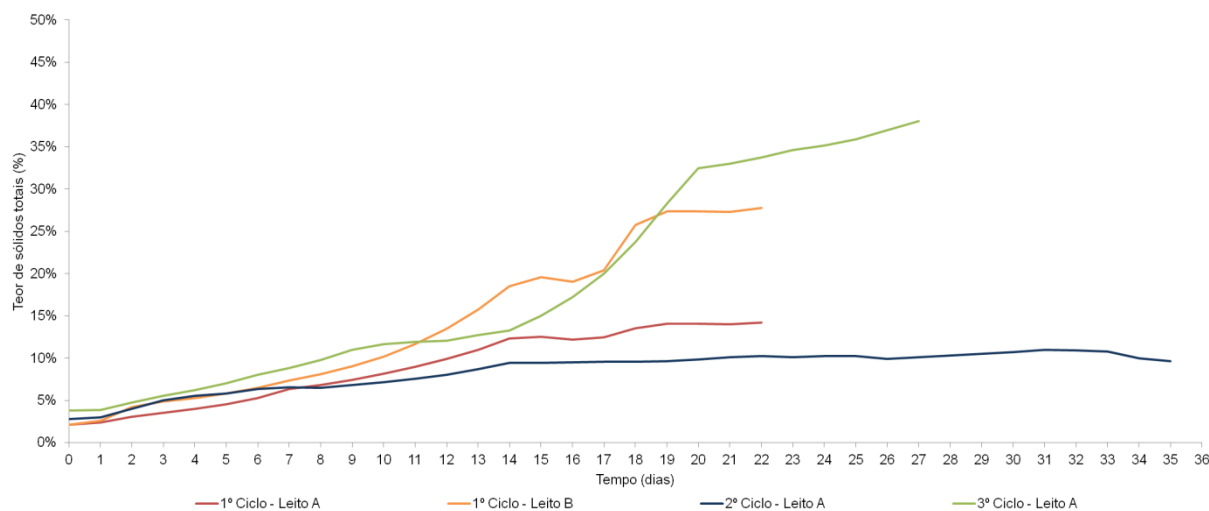


Figura 38 - Evolução dos valores de teor de sólidos totais (TS) das lammas obtidos pelo modelo, ao longo dos vários ciclos, nos diferentes leitos

Comparando os resultados obtidos, para o leito A, nos diferentes ciclos, verifica-se que o modelo permite obter valores de TS superiores para valores de temperatura do ar e radiação solar superiores, ao longo do ciclo, como seria de esperar e foi verificado experimentalmente.

Os resultados obtidos pelo modelo retratam, também, o efeito da aplicação de camadas de lammas com diferentes espessuras nos leitos, uma vez que, no mesmo ciclo e, logo, para as mesmas condições meteorológicas, o modelo prevê para as lammas do leito B, cuja espessura da camada inicial foi inferior à das lammas do leito A, valores superiores de TS ao longo do tempo.

As curvas obtidas pelo modelo parecem também demonstrar a influência da precipitação nos valores de TS obtidos. De facto, comparando estas curvas com os gráficos das figuras 22b) a 24b), é notório o abrandamento do processo de desidratação das lammas nos períodos de maior precipitação. Observado as curvas correspondentes aos leitos A e B do 1.º ciclo, em que a mesma precipitação ocorreu para valores de TS das lammas de 12% e 20%, respetivamente, pode notar-se que o efeito prejudicial da precipitação é rapidamente compensado no leito B, em que as lammas apresentam maior valor de TS, ou seja, o processo de desidratação se encontra já numa fase mais avançada, ao passo que no leito A essa recuperação é menos evidente. Desta forma, os resultados do modelo traduzem também a não uniformidade deste efeito, ao longo do processo de desidratação das lammas.

No caso das lammas aplicadas ao leito A, no 2.º ciclo, a estagnação do valor de TS ao longo de todo o ciclo decorre da ocorrência praticamente constante de precipitação no decorrer do mesmo.

O abrandamento do processo de evaporação, considerado no modelo da forma explicitada no capítulo 4, a partir de valores de TS de 25% é notório nas curvas correspondentes aos leitos A, do 3.º ciclo, e B, do 1.º ciclo.

A aparente estabilização do valor de TS das lamas observável no leito A, nos últimos dias do 1.º ciclo, deve-se ao facto de não se terem verificado valores significativos de precipitação nestes dias, pelo que as massas de água precipitada sobre o leito e drenada foram praticamente nulas, e da radiação solar média registada ter sido significativamente menor nestes últimos dias, face aos restantes dias do ciclo, pelo que também a massa evaporada prevista na modelação, através do balanço energético, foi nula.

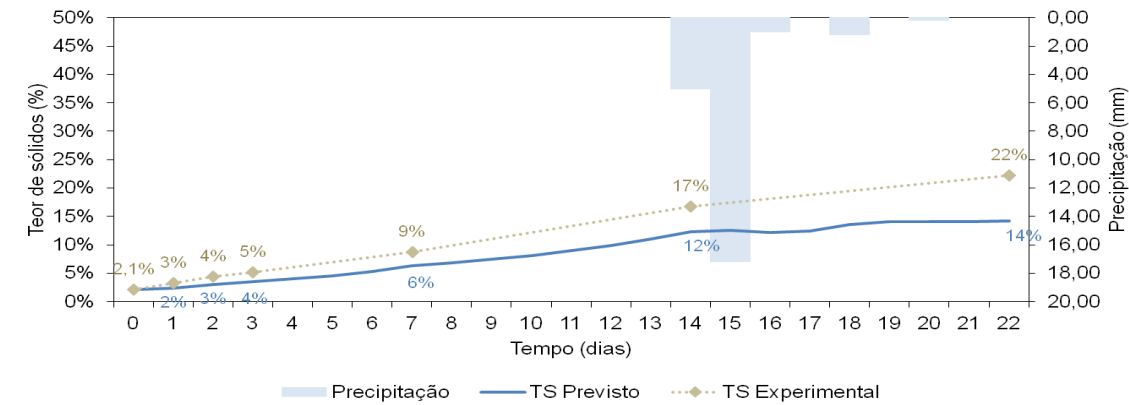
No Anexo III podem ser consultados, a título de exemplo, resultados da aplicação da modelação, em termos de balanço energético, balanço de massas e teor de sólidos correspondente, em passo diário, ao 3.º ciclo de desidratação de lamas.

5.5 Análise comparativa dos resultados experimentais e obtidos por modelação

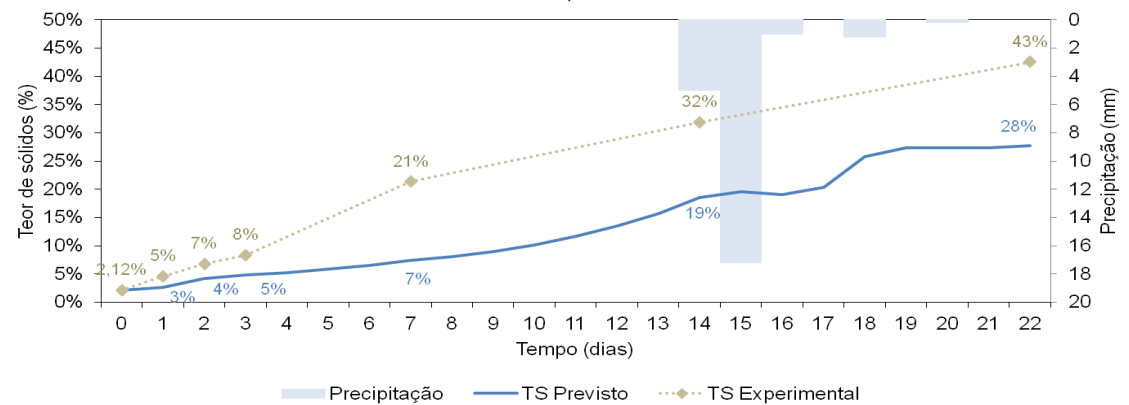
Nos gráficos da Figura 39 são apresentados os valores de TS, ao longo de cada ciclo e para cada leito, obtidos experimentalmente e através do modelo, de forma a facilitar a sua comparação. Através da observação destes gráficos, pode concluir-se que, de um modo geral, a modelação desenvolvida subestima o desempenho dos leitos de secagem das lamas, prevendo valores de TS inferiores aos obtidos experimentalmente. Os resultados obtidos pelo modelo parecem aproximar-se melhor aos valores determinados experimentalmente nos 2.º e 3.º ciclos de desidratação.

Observando os gráficos correspondentes ao 1º ciclo, pode notar-se que o modelo desenvolvido permite obter resultados que se aproximam, de forma satisfatória, aos resultados experimentais no princípio do ciclo, isto é, para valores de TS menores. Para valores de TS superiores, correspondentes a uma fase mais avançada do processo de desidratação das lamas nos leitos, verifica-se um desvio superior entre as previsões obtidas pelo modelo e os resultados experimentais. Este tipo de constatação é idêntico ao que verificaram também Garaibeh *et al.* (2007) e Sousa (2012) quando compararam a aplicação de um balanço energético semelhante ao descrito ao processo de desidratação das lamas em leitos de secagem com os resultados experimentais que obtiveram. O desvio observado deve-se possivelmente à fissuração da camada de lamas, a partir de um determinado valor de TS, que aumenta a área superficial exposta à radiação solar, favorecendo a evaporação de maiores quantidades de água das lamas, efeito que não é considerado na modelação desenvolvida, pelo que os valores de massa de água evaporada previstos podem ser inferiores aos que efetivamente se verificam nos leitos.

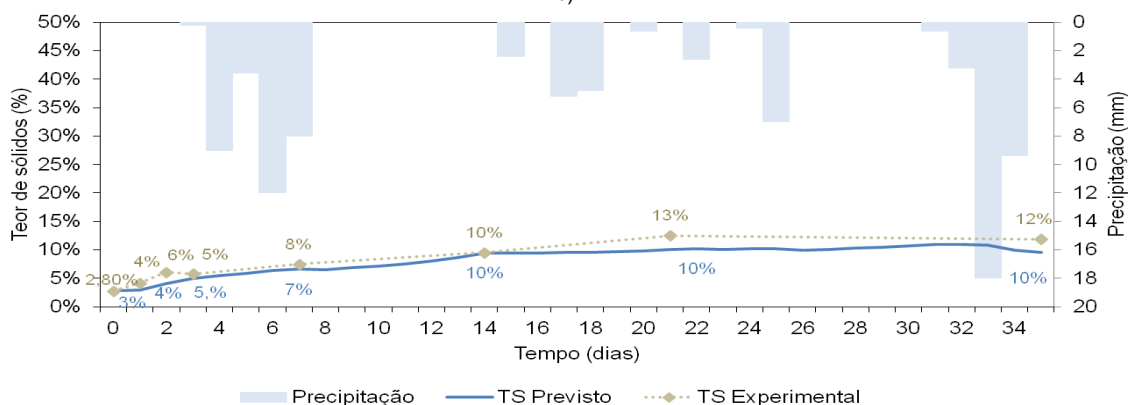
A maior aproximação dos resultados no 2.º ciclo decorre provavelmente ao facto de, devido à elevada precipitação e aos reduzidos valores de radiação solar verificados neste ciclo, o processo de desidratação não ter alcançado a fase em que as gretas responsáveis pela maior quantidade de água evaporada atingem uma profundidade considerável, para além do facto de estas gretas terem sido preenchidas, a dada altura, por água precipitada, em consequência do entupimento do sistema de drenagem deste leito.



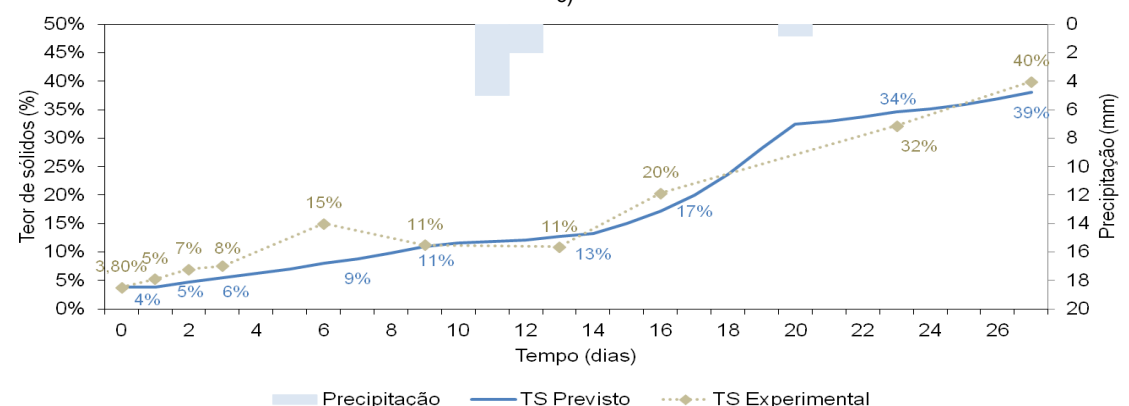
a)



b)



c)



d)

Figura 39 - Valores de teor de sólidos obtidos experimentalmente e previstos pela modelação: a) 1.º ciclo - leito A, b) 2.º ciclo - leito A, c) 3.º ciclo - leito A, d) 1.º ciclo - leito B

No caso das lamas do 3.º ciclo, embora se tenha observado a fissuração da superfície da camada de lamas e as gretas formadas tenham inclusivamente alcançado uma profundidade correspondente à superfície da camada superior de areia, o número de fendas formadas foi bastante inferior ao verificado nas camadas de lamas do 1.º ciclo, devido ao menor grau de estabilização inicial das lamas retiradas do digestor neste 3º ciclo, pelo que o efeito da fissuração na quantidade de massa de água evaporada terá sido menor. Assim se evidencia também alguma imprevisibilidade associada às características das lamas a desidratar, como consequência do reduzido controlo da matéria prima afluente à ETAR.

Assim, uma vez que o modelo não tem em conta, no cálculo da massa de água evaporada, a influência da fissuração da camada de lamas aplicada, a sua aproximação aos resultados experimentais foi superior nos ciclos em que esse fenómeno teve menor expressão.

As diferenças entre os resultados obtidos pela modelação e os obtidos nas análises laboratoriais, podem também estar relacionadas com a estimativa dos valores de temperatura das lamas, com influência nos valores de $(Q_{\text{radiação}})_{\text{emitida}}$ e $(Q_{\text{convecção}})_{\text{entra/sai}}$, que dependerá também da radiação solar e da humidade das lamas, parâmetros que não são considerados na expressão de cálculo desta temperatura.

Em relação ao cálculo dos valores de $(Q_{\text{radiação}})_{\text{absorvida}}$ pode também existir algum erro decorrente do facto de, nos dias em que o céu apresenta uma nebulosidade significativa, embora o valor da taxa de calor transferido por radiação solar seja, naturalmente, inferior, a radiação emitida pela atmosfera é, normalmente, superior à calculada pela expressão considerada no fluxograma do modelo. Desta forma, os valores de energia disponível para evaporação e, conseqüentemente, de massa evaporada serão, nestes dias, superiores aos considerados no modelo.

Existe ainda alguma incerteza associada aos valores considerados para a absorvidade solar e emissividade das lamas, uma vez que são indicados para materiais considerados semelhantes a lamas (solos) mas não foi feita qualquer verificação experimental da sua aplicabilidade às mesmas.

As diferenças observadas nos gráficos da Figura 39 podem ainda estar associadas a incertezas e erros decorridos nos procedimentos experimentais. Como foi já referido, apesar do cuidado em recolha de amostras do interior dos leitos representativas do estado de desidratação da camada de lamas, retirando porções de lamas de diferentes profundidades da camada e homogeneizando a mistura assim obtida, por forma a obter-se uma amostra representativa das características médias da massa de lamas de cada leito, nalgumas amostras a mistura obtida pode não ter sido corretamente homogeneizada no momento da recolha da amostra. Para além disso, nos laboratórios, as amostras não foram analisadas no seu todo, tendo apenas sido retirada uma porção de cada amostra, podendo a porção retirada não ser, uma vez mais, representativa das características médias da amostra, em particular nas amostras de lamas mais secas, e que não foi possível a trituração da amostra. A isto acresce o facto de, a todos os procedimentos laboratoriais, estar associada, uma incerteza intrínseca

a cada método de análise, ainda que todo o procedimento seja efetuado com os maiores cuidados, como se procurou no decorrer deste trabalho.

Relativamente ao cálculo da massa de água evaporada, devem ser calibrados os valores considerados para limitação da quantidade de água que efetivamente evapora, através de ensaios experimentais adicionais. Neste sentido, deve-se procurar compreender a partir de que valor de TS ocorre a diminuição da massa evaporada, face à energia total disponível para evaporação, para o qual no presente trabalho se considerou, de forma empírica e em resultado dos resultados experimentais, um valor de 25%, e de que forma ocorre essa diminuição gradual, daí em diante, tendo em conta as diferentes frações de água presentes nas lamas.

Finalmente, deve referir-se que a modelação desenvolvida não constitui, ainda, um modelo matemático completo de previsão, uma vez que a massa líquida drenada em cada dia do ciclo é estimada a partir dos valores conhecidos de massa drenada acumulada, medidos em cada dia de recolha, retratando uma tendência observada e não um valor previsto. Esta limitação poderá, no entanto, vir a ser ultrapassada em trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO

Nas últimas décadas, a problemática da produção de lamas residuais tem vindo a agravar-se, originando crescentes preocupações relacionadas com a sua gestão e destino final. O desenvolvimento de sistemas de saneamento e tratamento, nos países em desenvolvimento, esperado para os próximos anos, contribuirá, naturalmente, para o aumento da produção de lamas e, conseqüentemente, desta problemática.

É, por isso, essencial, não só a procura de novas soluções como o estudo dos métodos já existentes, definindo a sua aplicabilidade e os critérios de dimensionamento e avaliação de desempenho dos mesmos, adotando abordagens integradas dos sistemas de saneamento e tratamento de águas residuais com vista a uma gestão adequada das lamas produzidas. É neste contexto de otimização da gestão dos sistemas já construídos, com vista à correção de disfunções operativas e à melhor compreensão do efeito dos diversos fatores intervenientes, que surge a presente dissertação, no âmbito da qual se pretende avaliar o desempenho dos leitos de secagem de lamas como processo de desidratação natural de lamas de depuração.

Foram, para isso, instalados 2 leitos de secagem de lamas, à escala piloto, junto dos quais foi colocada uma estação meteorológica portátil. Entre setembro de 2016 e junho de 2017, foram realizados 3 ciclos de desidratação de lamas, diferindo entre eles não só nas condições meteorológicas registadas, consequência das diferentes épocas do ano em que foram realizados, como na espessura das camadas introduzidas no interior dos leitos e no valor de teor de sólidos inicial das lamas, devido às flutuações existentes na produção de lamas da ETAR da Póvoa da Galega, onde foram instalados os leitos.

Ao longo dos vários ciclos, foi determinada a evolução dos valores de teor de sólidos das lamas, através de análises laboratoriais realizadas em amostras retiradas dos leitos. Foi ainda medida, no decorrer de cada ciclo, a evolução da espessura da camada de lamas no interior dos leitos, como vista à avaliação da redução de volume associada a este processo. Em laboratório foram realizadas análises bacteriológicas das amostras de lamas e análises de CQO e SST das escorrências removidas dos leitos.

Desta forma, e como seria espectável, observou-se que os leitos de secagem de lamas apresentaram melhor desempenho, isto é, maiores valores de teor de sólidos e conseqüente redução de volume, num menor período de tempo, nos ciclos em que se verificam valores superiores de temperatura do ar e radiação solar e menores valores de humidade relativa do ar e precipitação. Para as mesmas condições meteorológicas, as camadas de lamas com menor espessura foram mais facilmente desidratáveis.

Verificou-se ainda que a maior parte da água livre presente nas lamas foi removida, por drenagem, nos primeiros dias de cada ciclo, não tendo sido medidos valores significativos de massa de água drenada para valores de teor de sólidos das lamas inferiores a 90%.

Em termos de volume das lamas, foram observados valores de redução superiores a 75%, em todos os ciclos realizados. No 1.º ciclo, o volume final das lamas corresponde, em ambos os leitos, a menos 10% do volume inicial. Estes valores ilustram a enorme vantagem deste processo de desidratação, face à problemática de crescimento da produção de lamas descrita neste documento.

Os resultados observados apontam ainda para a existência de um efeito favorável da adequada estabilização das lamas na extensão das gretas formadas na superfície da camada de lamas desidratadas em leitos de secagem, tal como é referido noutros estudos (Turovsky & Mathai, 2006 e Samudiu, 1993, citado em Mortara, 2011). No ciclo realizado na sequência da afluência de um caudal lamas superior à capacidade de tratamento do digestor a frio, a expressão da fissuração da superfície da camada de lamas foi inferior. Estes resultados evidenciam a imprevisibilidade das características das lamas a desidratar, como consequência das flutuações de caudal e das características das águas residuais afluentes à ETAR.

Foi ainda verificado que os valores de teor de sólidos obtidos experimentalmente se assemelham aos obtidos por outros autores, em ensaios experimentais realizados em regiões de clima temperado, sendo significativamente inferiores aos determinados em trabalhos de campo decorridos em locais de clima quente e seco.

Com vista à generalização da avaliação do desempenho de leitos de secagem foi, ainda no âmbito da presente dissertação, desenvolvida uma ferramenta matemática de modelação do processo de desidratação natural das lamas em leitos de secagem. Esta modelação permitiu, através do balanço hídrico de massas e do balanço energético associado ao processo de desidratação nos leitos, a obtenção dos valores de teor de sólidos previstos face às condições meteorológicas e às características das lamas a desidratar.

O modelo desenvolvido foi então aplicado a cada ciclo de desidratação de lamas, tendo-se comparado os resultados assim obtidos com os resultados experimentais. Desta forma, os resultados obtidos foram considerados, de um modo geral, satisfatórios, embora a tenham sido identificadas algumas insuficiências na estrutura de cálculo do modelo.

Verificou-se que a modelação desenvolvida aproxima melhor os resultados experimentais nos ciclos em que a fissuração da camada de lamas apresentou uma expressão reduzida, em virtude da não consideração do efeito deste fenómeno no modelo. Nos ciclos em que a camada de lamas apresentou uma fissuração extensa, os valores de teor de sólidos obtidos pelo modelo apresentam uma boa aproximação aos determinados experimentalmente, numa fase inicial, ocorrendo um desvio significativo para uma fase mais avançada, em que as gretas formadas ganham expressão, sendo os valores previstos inferiores aos experimentais.

É também de notar que a modelação desenvolvida não constitui, ainda, um modelo matemático completo de previsão, uma vez que a massa líquida drenada em cada dia do ciclo é estimada a partir dos valores conhecidos de massa drenada acumulada, medidos em cada dia de recolha, retratando uma tendência observada e não um valor previsto. De facto, a estimativa da massa drenada nos

leitos depende de alguns fatores de difícil quantificação, como a quantidade de água livre presente inicialmente nas lammas e as características do meio de enchimento do leito.

Assim, recomenda-se, para trabalhos futuros, que se realizem ensaios por forma a determinar a porosidade dos meios de enchimento e a respetiva condutividade hidráulica, e se considerem estes parâmetros na quantificação da massa de água drenada nas lammas. Uma forma de melhor caracterizar o processo de drenagem nos leitos seria, eventualmente, a consideração de uma lei de vazão através do orifício, considerando um escoamento em meio poroso.

Por forma a melhor estimar os valores de massa evaporada recomenda-se ainda, para trabalhos futuros, a inclusão no modelo, através de ensaios experimentais adicionais, da influência da fissuração das lammas na remoção de água presente nas lammas, por evaporação, face ao consequente aumento da área exposta à radiação solar.

Seria também interessante a caracterização das diferentes frações de água, livre, intersticial, adsorvida e intracelular, bem como a determinação experimental da evolução das quantidades presentes nas lammas, de cada uma, ao longo do ciclo de desidratação, com vista a uma melhor definição não só da massa líquida drenada nos leitos, mas também dos limites considerados para o abrandamento do processo de evaporação, em virtude das diferentes dificuldades de remoção, por este meio, destas frações.

Sugere-se, adicionalmente, a consideração do efeito da velocidade do vento na remoção de água por evaporação.

Ainda em relação às incertezas dos parâmetros considerados no modelo, é recomendada a medição dos valores médios diários da temperatura das lammas.

De forma a minimizar eventuais incertezas relativas aos resultados experimentais, aconselha-se a homogeneização de todas as amostras recolhidas para análise, incluindo as amostras de lammas mais secas, com o auxílio, por exemplo, de um almofariz.

Deve ainda referir-se que se encontram já em desenvolvimento trabalhos de investigação complementares ao descrito neste documento, por forma a completar a modelação do processo de desidratação das lammas, de acordo com as conclusões inferidas no presente trabalho e as recomendações aqui apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andreoli, C.V., Sperling, M., Fernandes, F., *Biological Wastewater Treatment - Volume 6: Sludge*

Bennamoun, L., *Solar drying of wastewater sludge: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, pp 1061- 1073, 2012

Berdahl, P., Martin, M., Emissivity of clear skies, *Solar Energy*, 32(5), 663–664, 1984

Bergman, T., Lavine, A., Incropera, F.P., Dewitt D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2011 ISBN: 13 978-0470-50197-9

Brutsaert, W., *Evaporation into the Atmosphere*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1982

Comissão Europeia, *Relatório da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões, sobre a execução da legislação da UE em matéria de resíduos no período 2010-2012*, Bruxelas, 2017

Davis M.L., *Water and Wastewater Engineering - Design Principles and Practice*, MacGraw-Hill, Inc., 2010, ISBN: 978-0-07-171385-6

Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de junho, 1997. Define os requisitos relativos aos sistemas de drenagem e tratamento das águas residuais. Diário da República Portuguesa, 1ª Série

Decreto-Lei n.º 276/2009, de 2 de outubro, 2009. Relativo ao procedimento de licenciamento da utilização agrícola das lamas de depuração. Diário da República Portuguesa, 1ª Série

Decreto-Lei n.º 446/91, de 22 de novembro, 1991. Relativo às condições de aplicação de lamas em solos cultivados. Diário da República Portuguesa, 1ª Série

Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho de 2011. Relativo ao regime geral da gestão de resíduos. Diário da República Portuguesa, 1ª Série

Diretiva do Conselho nº 91/271CEE, de 21 de maio, 1991. Relativa ao tratamento de águas residuais urbanas

Diretiva do Conselho n.º 1999/31/CEE, de 26 de abril, 1999. Regulamenta a deposição de resíduos em aterro. Jornal Oficial das Comunidades Europeias

Diretiva do Conselho n.º 86/278/CEE, de 12 de junho, 1986. Regulamenta a utilização das lamas de depuração na agricultura. Jornal Oficial das Comunidades Europeias

Environmental Protection Agency (EPA), *Wastewater Treatment Manuals: Primary, Secondary and Tertiary Treatment*, Ireland, 1997, ISBN 1-899965-46-7.

European Commission, *Disposal and recycling routes for sewage sludge, Part 3 – Scientific and technical report*, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001, ISBN 92-894-1800-1

European Commission, *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land - Final Report*, Bruxelas, 2008

Gharaibeh, A., Sivakumar, M., Hagare, D., *Mathematical model to predict solids content of water treatment residuals during drying*, Journal of Environmental Engineering, 133 (2), pp.165-172, Wollongong, Australia, 2007

Hazel, T.C.C., *Gestão de Lamas Fecais em Sistemas Urbanos de Saneamento Local*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015

Ifeanyi, E.B., *FMTLxLyLz dimensional equation for sludge drying bed*, Thesis submitted in partial fulfilment of the requirement for the award of Master of Engineering in Water Resources and Environment, University of Nigeria, Nsukka,

Mano, A. P., Folhas de apoio à disciplina de Operações e Processos Unitários, Curso de Pós-Graduação e Mestrado em Engenharia Sanitária, Faculdade de Ciências e Tecnologias, 1997

Matos, J.S., Ferreira, F., Slides de apoio às aulas de Instalações de Tratamento, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2013

Melo, A.S., *Contribuição para o dimensionamento de leitos de secagem de lodo*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2006

Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F., Stensel H.D., *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th edition, McGraw-Hill Education, International Edition, 2003, ISBN 0-07-112250-8

Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, PensaAR 2020 - Uma nova estratégia para o setor de abastecimento de água e saneamento de águas residuais, 2015.

Moiambo O., Ferreira, F., Matos, J.S., Desafios e oportunidades no tratamento de lamas fecais em Moçambique, Comunicação submetida ao 17.º ENASB, Guimarães, 2016

Moran, M., Shapiro, H., Boettner, D., Baileu, M., *Fundamentals of engineering thermodynamics*, 17th Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2011, ISBN 13 978-0470-49590-2

Mortara, F.C., Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2011

Nações Unidas, Relatório Sobre os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio 2015, Nova York, 2015

Oliveira, P.J., *Transmissão de Calor – Convecção Natural*, Departamento Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, 2014

Pedroza, M.M, Vieira, G.E.G, Sousa, J.F, Pickler, A.C., Leal, E.R.M., Milhomen, C.C, *Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão*, Revista Liberato, Novo Hamburgo, vol 11, nº 16, pp 89-XX, 2010

Pinto M. M., Matos J. S., Ferreira, F., *Sistemas locais de saneamento de baixo custo*, Contribuição técnica para a análise de soluções Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2014

Rasquilha, F.J.T., *Contribuição para o Tratamento e Gestão das Lamas em Excesso das Estações de Tratamento de Águas Residuais - Caso de Estudo de Otimização para 4 ETAR do Concelho de Elvas*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente - Perfil de Engenharia Sanitária, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010

Rice, E.W., Baird, R.B., Eaton, A.D., Clesceri, L.S, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd Edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012, ISBN: 9780875530130

Soares, S.R.A., Matos, Z.M.R., Cernardes, R.S., *Modelagem do processo de desidratação de lodo anaeróbio em leitos de secagem simulados*, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, nº.2, pp.313-319, 2001

Sousa, R. J. V., *Estratégias de Gestão de Lamas das Estações de Tratamento de Águas Residuais. Extorsão de Lamas para Aplicação na Agricultura*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005

Sousa, W.G., *Pós-secagem natural de lodos de estações de tratamento de água e esgoto sanitários*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2012

Spellman, F. R., *Handbook of water & wastewater treatment plant operations*, LEWIS PUBLISHERS, USA, 2003, ISBN 1-56670-627-0

Sperling, M., *Biological Wastewater Treatment - Volume 1: Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*, IWA Publishing, 2007, ISBN1-84339-161-9

Strande, L., Ronteltap, M., Brdjanovic, D., *Faecal Sludge Management - Systems Approach for Implementation and Operation*, IWA Publishing, London, UK, 2014, 2008 ISBN: 9781780404721

Turovskiy, I. S. e Mathai, P. K., *Wastewater Sludge Processing*. John Wiley e Sons, Inc, Nova Jersey, 2006

Páginas Web consultadas:

Águas de Portugal, <http://www.adp.pt>, consultado em novembro de 2016

Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas, 2015, <http://www.apda.pt/pt/noticia/2273>, consultado em março de 2017

Instituto Português do Mar e da Atmosfera, <https://www.ipma.pt>, consultado em junho de 2017

SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, Agência Portuguesa do Ambiente, <http://snirh.apambiente.pt/>, consultado em junho de 2017

Snyder, R., Snow, R., *Converting Humidity Expressions with Computers and Calculators*, University of California - Davis, 1984, consultado em maio de 2017

UNESCO, *Coverage with Improved Sanitation*, 2002, 2006
http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/wwap_WWDR2_Map_6.2.pdf.
consultado em março de 2017

UNESP, Aula 5 - Temperatura, 2014 http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/apresentacao-aula_05-temperatura-2014.pdf, consultado em maio de 2017

UPM - Departamento de Motopropulsión y Termofluidodinámica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid, Properties of solids, <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/dat1/eSol.pdf>, consultado em maio de 2017

ANEXOS

Anexo I - Unidades dos parâmetros e valores das constantes consideradas

Quadro I 1 - Unidades dos parâmetros considerados no modelo matemático

Parâmetro	Símbolo	Unidades
Área da superfície de controlo	A_{sl}	m^2
Coefficiente de expansão térmica		K^{-1}
Coefficiente de transferência de calor	h	$W.m^{-2}.K^{-1}$
Dimensão característica	L_c	m
Emissividade da atmosfera	ϵ_{atm}	-
Espessura da camada de lamas	e_{sl}	m
Espessura inicial da camada de lamas	e_0	m
Massa de água ⁽¹⁾	m	kg
Massa de água drenada acumulada	$D_{acumulada}$	kg
Massa de sólidos	$m_{sólidos}$	kg
Número de Grashof	Gr	-
Número de Nusselt	Nu	-
Número de Rayleigh	Ra	-
Passo de cálculo	t	dias
Pressão parcial de vapor de água	$\rho_{parcialv}$	hPa
Pressão de vapor	ρ_v	hPa
Radiação Solar	R_{solar}	$W.m^{-2}$
Taxa de transferência de calor	Q	W
Temperatura da superfície das lamas	T_{sl}	K
Temperatura de Orvalho	T_{orv}	$^{\circ}C$
Temperatura do ar	T_{ar}	$K^{(2)}$
Temperatura equivalente do Céu	$T_{céu}$	K
Tempo decorrido desde a meia noite	t_{00}	horas
Teor de sólidos	TS	%
Teor de humidade	TH	%

⁽¹⁾ evaporada, drenada, precipitada, inicial

⁽²⁾ à exceção da equação M da Figura 9, em que entra em $^{\circ}C$

Quadro I 2 - Valores das constantes utilizadas no modelo matemático

Parâmetro	Símbolo	Unidades	Valor
Absortividade das lamas	α_{sl}	-	0,8
Aceleração da gravidade na Terra	g	$m.s^{-2}$	9,8
Condutividade térmica do ar ⁽¹⁾	σ	$W.m^{-1}.K^{-1}$	0,02534
Constante de Stefan-Boltzmann		$W.m^{-2}.K^{-4}$	$5,67 \times 10^{-8}$
Emissividade das lamas	ϵ_{sl}	-	0,75
Entalpia de vaporização da água ⁽¹⁾	H_{fg}	$J.kg^{-1}$	2,4659
Massa volúmica das lamas	ρ_{lamas}	$kg.m^{-3}$	1015
Número de Prandtl ⁽¹⁾	Pr	-	0,71
Viscosidade cinemática do ar ⁽¹⁾		$m^2.s^{-1}$	$14,55 \times 10^{-6}$

⁽¹⁾ a $15^{\circ}C$

Anexo II - ETAR da Póvoa da Galega (estruturas de desidratção de lamas e localização da instalação piloto)



a) b) c)
Figura II 1 - Processos integrantes da linha de desidratção de lamas da ETAR da Póvoa da Galega:
a) filtros banda, b) leito de secagem, c) leito de armazenamento

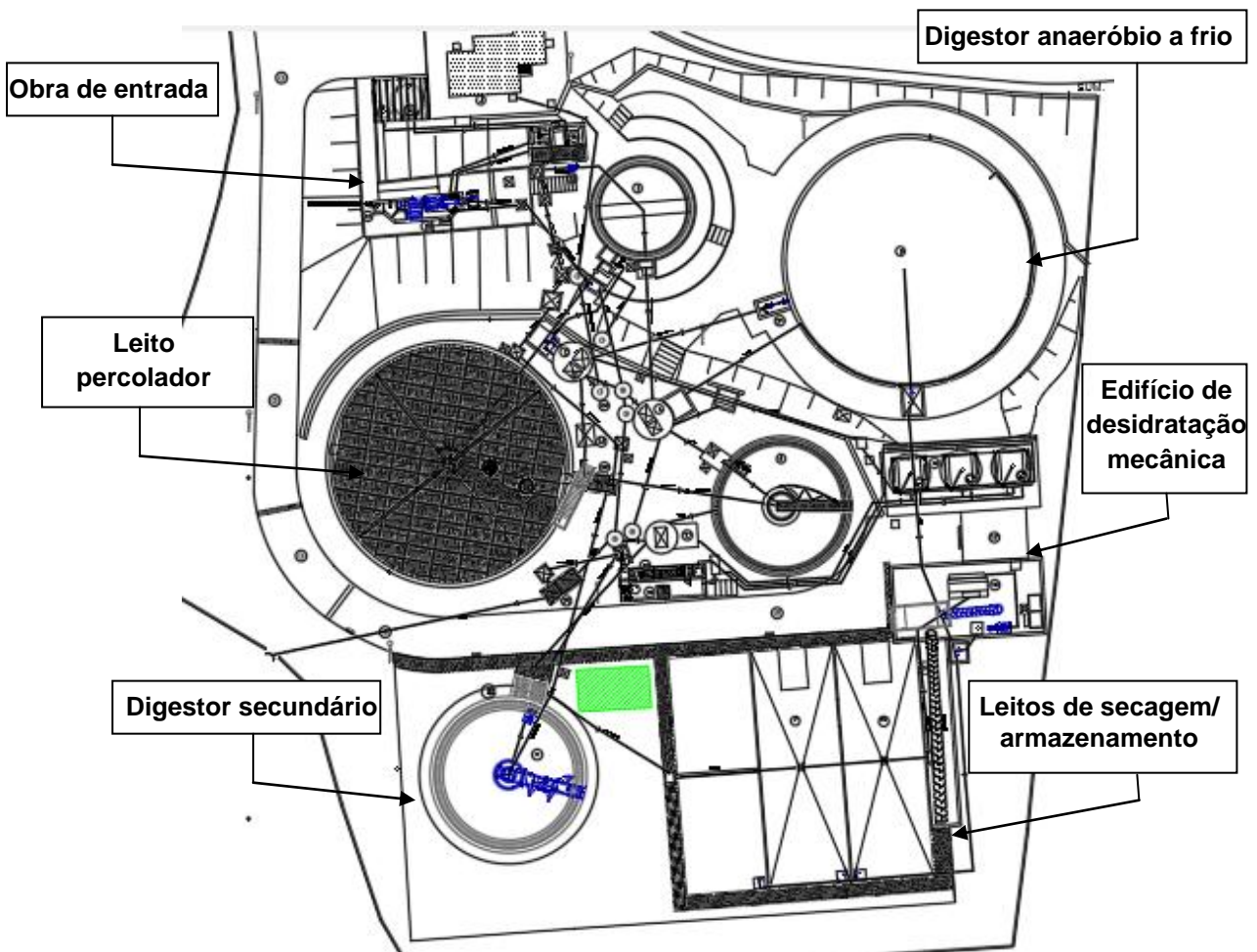


Figura II 2 - Localização da instalação piloto na ETAR da Póvoa da Galega, indicada a verde

Anexo III - Resultados da modelação aplicada ao leite A do 3.º ciclo

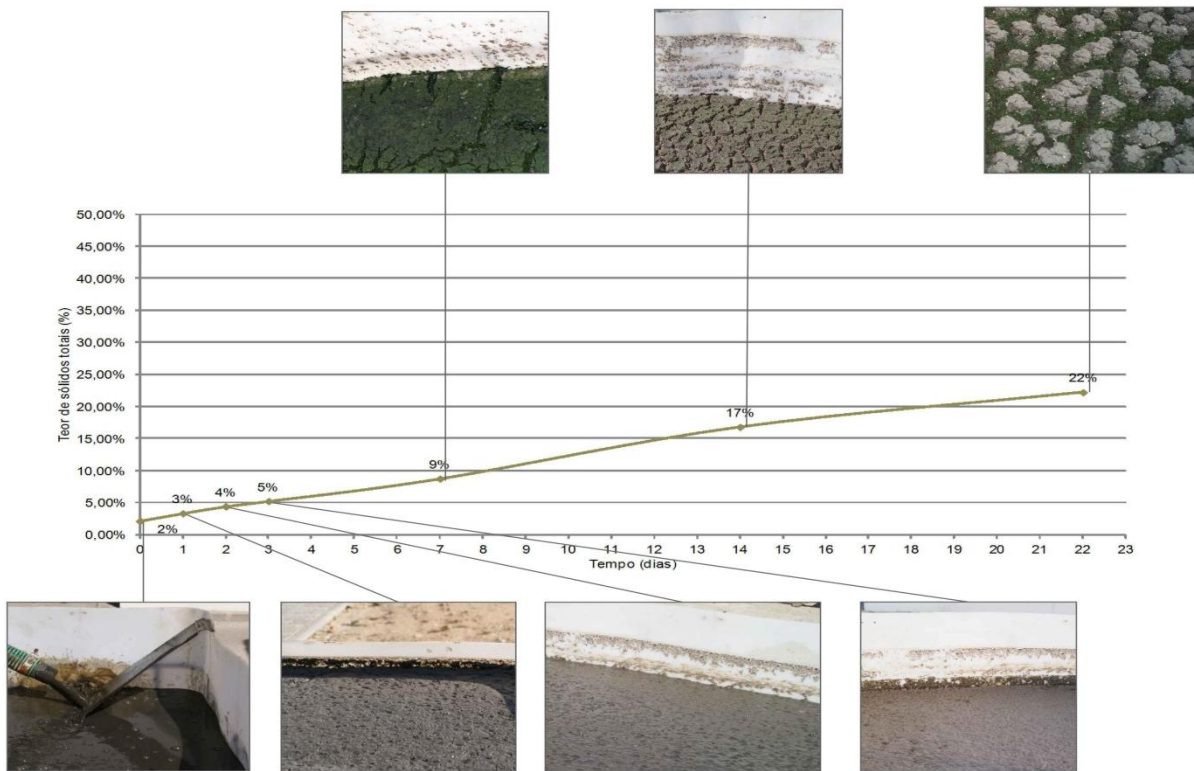
Quadro III 1 - Aplicação da modelação ao leite A, no 3.º ciclo: balanço de massas

Tempo	Espessura da camada de lamas	Massa de lamas	Massa de água	Massa de sólidos	Massa de água precipitada sobre o leite	Massa de água evaporada	Massa de água drenada	Massa de sólidos (t+1)	Massa de água (t+1)	Teor de sólidos
t	e (cm)	M _l inicial (t-1)	m _á (t-1)	m _{ST} (t-1)	M _á precipitada (Δt)	M _á evaporada (Δt)	M _á drenada (Δt)	m _{ST} (t)	m _á (t)	TS (t)
dias	m	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	%
1	0,32	363,32	349,52	13,81	0,00	5,91	1,80	13,81	341,81	3,88
2	0,31	355,62	341,81	13,81	0,00	10,49	53,50	13,81	277,82	4,73
3	0,26	291,63	277,82	13,81	0,00	9,25	32,00	13,81	236,57	5,51
4	0,22	250,38	236,57	13,81	0,00	9,69	17,67	13,81	209,22	6,19
5	0,20	223,02	209,22	13,81	0,00	8,19	17,67	13,81	183,36	7,00
6	0,17	197,17	183,36	13,81	0,00	7,97	17,67	13,81	157,72	8,05
7	0,15	171,53	157,72	13,81	0,00	9,13	6,17	13,81	142,42	8,84
8	0,14	156,23	142,42	13,81	0,00	8,74	6,17	13,81	127,52	9,77
9	0,12	141,32	127,52	13,81	0,00	9,06	6,17	13,81	112,29	10,95
10	0,11	126,10	112,29	13,81	0,00	7,49	0,00	13,81	104,80	11,64
11	0,10	118,60	104,80	13,81	0,00	2,70	0,00	13,81	102,09	11,91
12	0,10	115,90	102,09	13,81	5,59	1,91	5,00	13,81	100,78	12,05
13	0,10	114,58	100,78	13,81	2,24	6,26	2,00	13,81	94,75	12,72
14	0,10	108,56	94,75	13,81	0,00	3,02	1,33	13,81	90,39	13,25
15	0,09	104,20	90,39	13,81	0,00	10,88	1,33	13,81	78,18	15,01
16	0,08	91,99	78,18	13,81	0,00	10,48	1,33	13,81	66,37	17,22
17	0,07	80,17	66,37	13,81	0,00	10,22	0,88	13,81	55,27	19,99
18	0,06	69,08	55,27	13,81	0,00	9,99	0,88	13,81	44,41	23,72
19	0,05	58,21	44,41	13,81	0,00	8,59	0,88	13,81	34,94	28,32
20	0,04	48,75	34,94	13,81	0,00	5,35	0,88	13,81	28,72	32,47
21	0,04	46,80	33,00	13,81	0,89	0,88	0,70	13,81	28,04	32,99
22	0,04	46,12	32,32	13,81	0,00	0,94	0,00	13,81	27,10	33,75
23	0,04	45,18	31,37	13,81	0,00	0,98	0,00	13,81	26,12	34,58
24	0,04	44,20	30,40	13,81	0,00	0,63	0,00	13,81	25,49	35,14
25	0,04	43,45	29,64	13,81	0,00	0,85	0,00	13,81	24,64	35,91
26	0,04	42,47	28,66	13,81	0,00	1,06	0,00	13,81	23,58	36,93
27	0,04	41,28	27,48	13,81	0,00	1,09	0,00	13,81	22,49	38,04

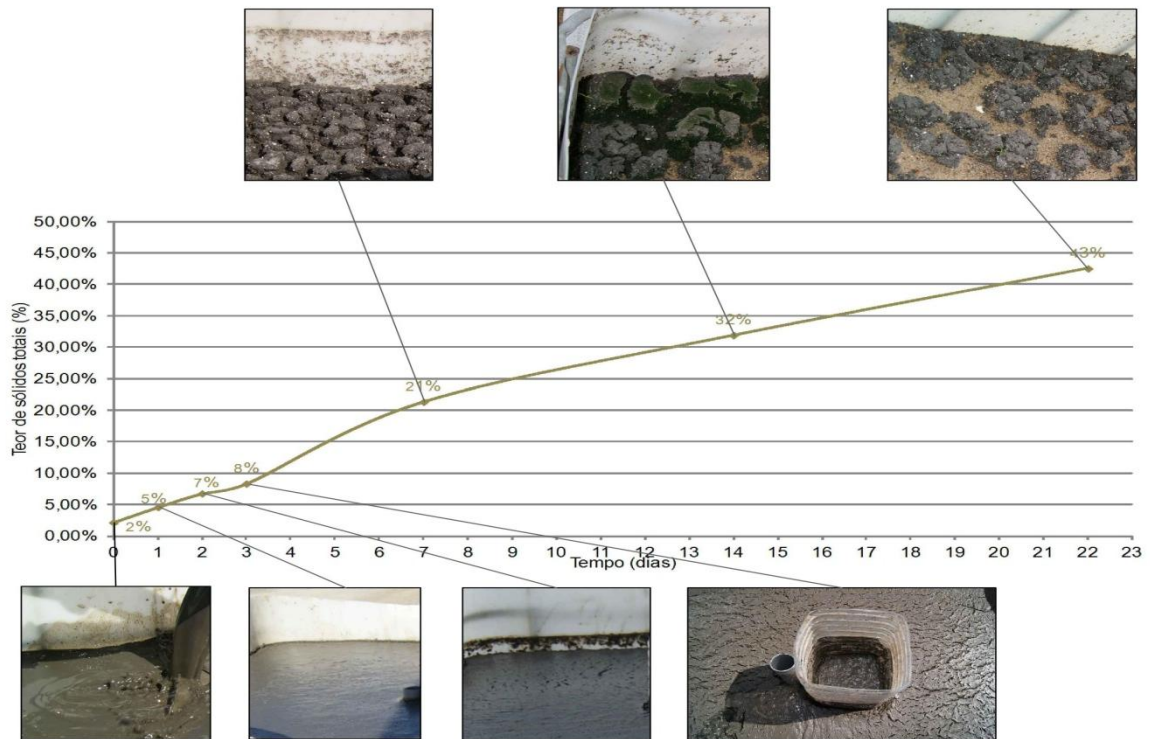
Quadro III 2 - Aplicação da modelação ao leito A, no 3.º ciclo: balanço energético

Tempo	Taxa de transferência de calor por convecção	Taxa de transferência de calor por radiação	Taxa de transferência de calor por radiação	Taxa de transferência de calor por evaporação	Massa de água evaporada
t	($Q_{\text{convecção}}_{\text{entra/sai}} (\Delta t)$)	($Q_{\text{radiação}}_{\text{sai}} (\Delta t)$)	($Q_{\text{radiação}}_{\text{entra}} (\Delta t)$)	$Q_{\text{evaporação}} (\Delta t)$	$m_{\text{água evaporada}} (\Delta t)$
dias	W	W	W	W	kg
1	5,00	345,51	519,06	168,54	5,91
2	3,66	337,42	640,45	299,38	10,49
3	3,63	337,27	604,88	263,98	9,25
4	7,56	360,24	644,27	276,47	9,69
5	9,74	372,31	615,78	233,73	8,19
6	8,06	363,00	598,57	227,51	7,97
7	11,91	384,17	656,75	260,68	9,13
8	11,68	382,94	643,99	249,37	8,74
9	10,11	374,39	643,12	258,62	9,06
10	6,04	351,55	571,41	213,82	7,49
11	5,94	350,98	434,12	77,20	2,70
12	6,11	351,96	412,56	54,49	1,91
13	6,34	353,31	538,42	178,77	6,26
14	6,97	356,90	450,18	86,31	3,02
15	6,68	355,21	672,35	310,46	10,88
16	6,40	353,60	659,19	299,19	10,48
17	6,95	356,75	655,39	291,69	10,22
18	5,78	350,05	640,94	285,11	9,99
19	5,54	348,64	599,32	245,14	8,59
20	6,23	352,65	664,11	305,24	10,69
21	7,08	357,52	614,90	250,29	8,77
22	10,19	374,82	653,58	268,58	9,41
23	7,58	360,30	646,34	278,46	9,76
24	8,73	366,76	556,23	180,74	6,33
25	8,85	367,39	619,40	243,16	8,52
26	9,16	369,14	680,77	302,47	10,60
27	5,06	345,84	661,00	310,11	10,87

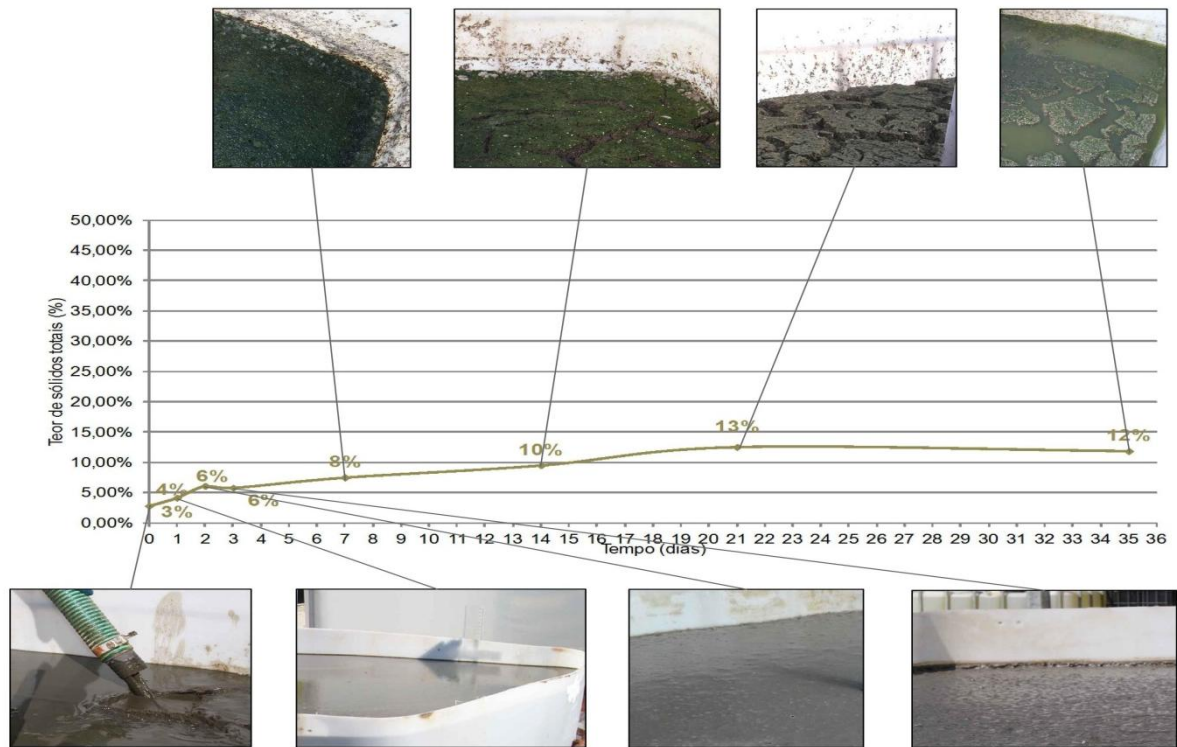
Anexo IV - Evolução do aspeto das lamas em cada leito, ao longo de cada ciclo



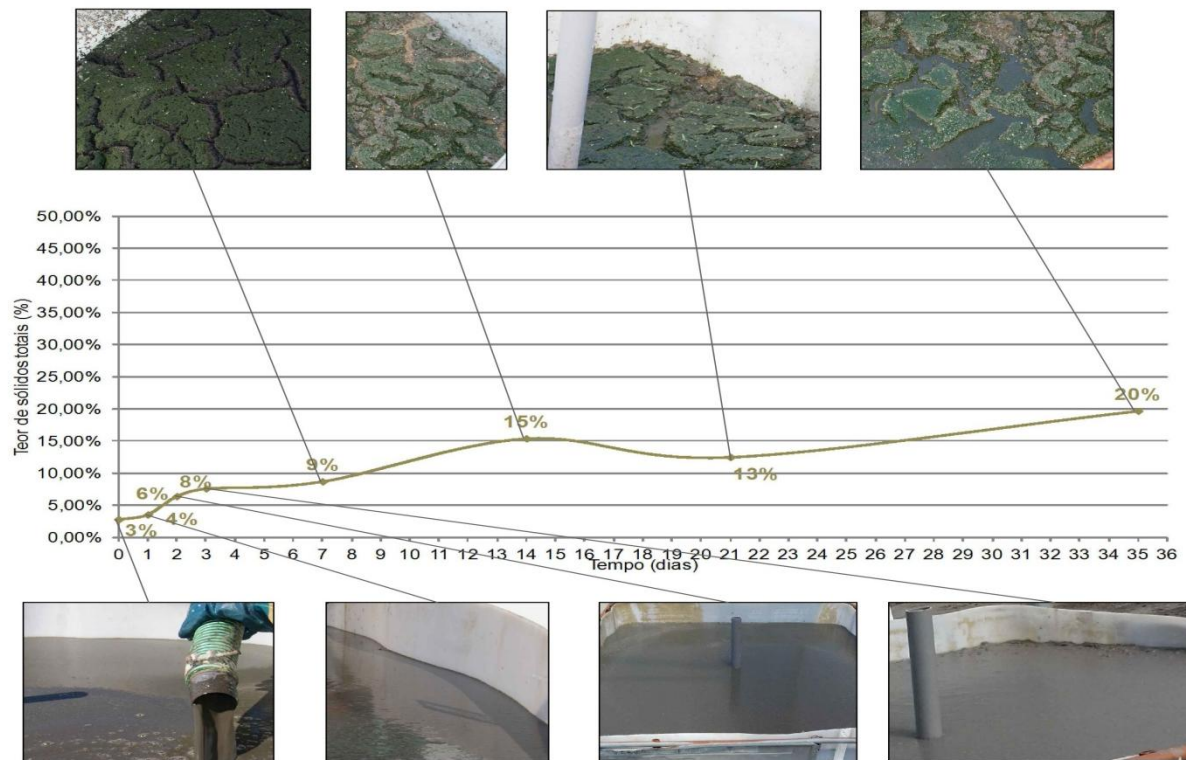
V1 - Evolução do aspeto das lamas no leito A, ao longo do 1.º ciclo



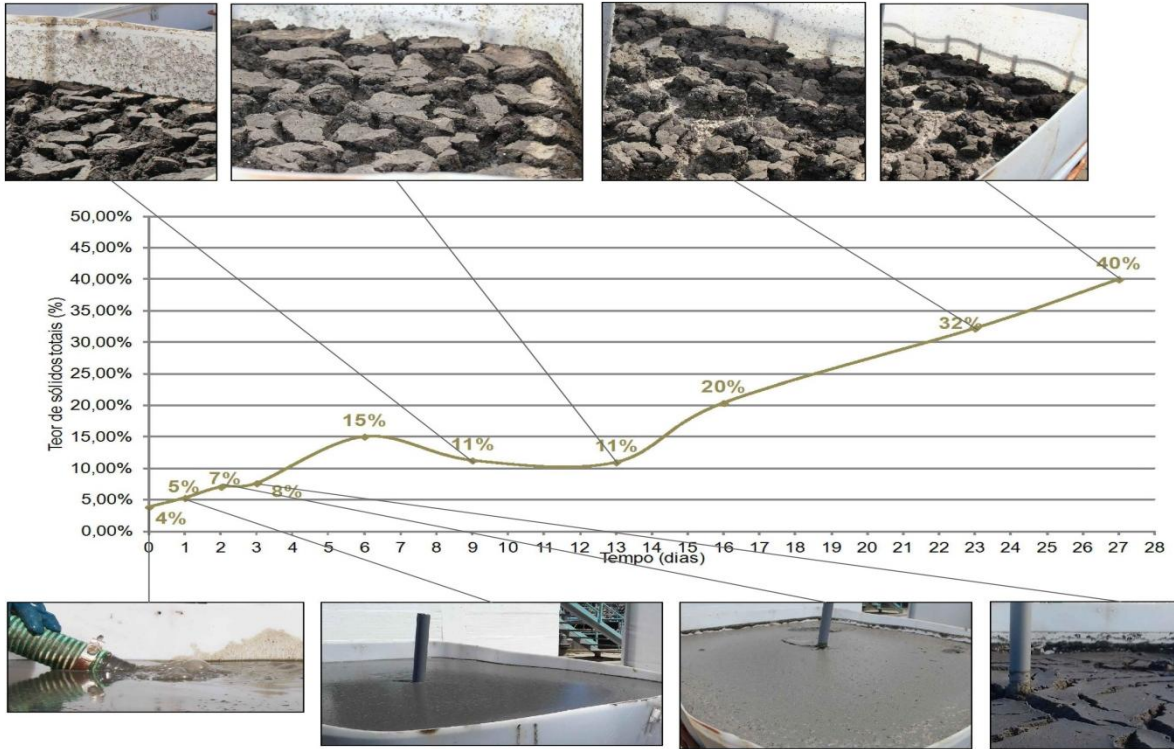
V2 - Evolução do aspeto das lamas no leito B, ao longo do 1.º ciclo



V3 - Evolução do aspeto das lamas no leito A, ao longo do 2.º ciclo



V4 - Evolução do aspeto das lamas no leito C, ao longo do 2.º ciclo



V5 - Evolução do aspeto das lamas no leito A, ao longo do 3.º ciclo