

**MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2020/2021**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA TECNOLOGIA TENCATE GEOTUBE® NA  
DESIDRATAÇÃO DE LAMAS**

**PEDRO MIGUEL MARINHO CAÇADOR TORRES CALDAS**

Dissertação submetida para obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE**

**Presidente do Júri:** Professora Doutora Maria Cristina da Costa Vila  
(Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de  
Engenharia da Universidade do Porto)

---

**Orientador académico:** Professora Doutora Cidália Maria de Sousa Botelho  
(Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de  
Engenharia da Universidade do Porto)

**Co-Orientador:** Professora Doutora Cristina Maria Monteiro dos Santos  
(Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia  
da Universidade do Porto)

---

**Orientador na empresa:** Engenheiro Jorge Duarte Araújo Neto Avidos  
(Gestor de Produto na empresa Geosin Geosynthetics)

*Julho 2021*



*“A jornada de mil quilómetros começa com o primeiro passo”*

- O Rei Leão



## AGRADECIMENTOS

À Geosin por me ter dado a oportunidade de fazer a minha dissertação num tema do meu interesse em ambiente empresarial e por toda a ajuda disponibilizada durante a realização deste trabalho. Ao Engenheiro Jorge Avidos, por todo o acompanhamento durante este semestre e por todos os conselhos e lições que, com certeza, vou levar para o resto da vida. E, acima de tudo, obrigado por ter feito questão que a minha experiência fosse o mais 'normal' possível dentro do atual contexto pandémico.

À Professora Cristina e à Professora Cidália que me acompanharam nesta dissertação. Obrigado por toda a ajuda incansável e por me terem despertado o interesse para a área da gestão de recursos hídricos. À Engenheira Liliana por toda a ajuda durante a realização do trabalho laboratorial.

À família de Minas e Ambiente que a faculdade me deu, a quem fez de nós tropa, e aos titãs que aí virão. A Engenharia e a todos aqueles que fizeram parte dos melhores 5 anos da minha vida. Aos diamantes que fui encontrando ao longo do meu percurso académico, por todas as lágrimas e gargalhadas partilhadas. Que estes anos se transformem numa eternidade de memórias que iremos para sempre recordar. Em especial à Rafaela e à Catarina Silva pela paciência e por me terem permitido fazer este curso a vosso lado... Sem vocês acabar esta etapa não seria possível nem teria o mesmo significado.

À Alcinda e à Catarina por todos os jantares e por terem sido a minha família emprestada do Porto durante os últimos 3 anos.

À minha família materna, por todo o apoio incondicional ao longo do meu percurso académico, em especial aos meus padrinhos por me terem dado a oportunidade de estudar no Porto. À minha mãe e ao meu irmão, por terem feito de tudo para que eu pudesse viver plenamente o meu percurso académico. Tudo o que sou hoje devo-o a vocês e por isso agradeço por termos sido, e com certeza iremos continuar a ser, o suporte uns dos outros. À minha avó por todas as marmitas e todos os conselhos que ainda me dá hoje e por ser das pessoas mais generosas que conheço. Ao meu avô, por ser o melhor exemplo de um pai que podia ter e por fazer de mim o homem que sou hoje. São os meus ídolos, mesmo que não o diga muitas vezes, e a conclusão desta etapa não seria possível sem vocês.

Ao Francisco, à Maria, ao Gonçalo e a todas as pessoas cujo nome não mencionei, mas que tiveram um papel importante durante o meu percurso académico.

À Inês, por todo o apoio, ajuda e pela opinião dada durante a realização desta dissertação. Sempre acreditaste nas minhas capacidades e tentaste sempre puxar o melhor de mim, mesmo quando eu não o fazia. Que estes 3 anos se transformem em 75, e que me permitas continuar ao teu lado tão feliz, ou mais, do que já sou hoje. Obrigado.

## RESUMO

Com o aumento gradual da população humana, associado à escassez de água em todo o mundo, intensifica-se a urgência no reaproveitamento deste recurso natural.

As Estações de Tratamento de Águas Residuais permitem obter água de boa qualidade a partir de um efluente, submetendo-o a vários processos de tratamento, mas gera simultaneamente um conjunto de subprodutos. As lamas produzidas nesses processos apresentam um elevado potencial de valorização, uma vez que o seu alto teor de humidade permite recuperar a água e utilizar o resíduo sólido para outros fins.

Os processos de desidratação permitem a recuperação da água presente nas lamas e também a redução do seu volume. Atualmente, os processos mecanizados como a centrifugação e os filtros de banda ou de prensa são as técnicas mais utilizadas. Todavia, com a crescente consciencialização humana para os problemas ambientais, surgiu uma nova tecnologia de desidratação de lamas que apresenta bons resultados com um baixo consumo energético.

A tecnologia Tencate Geotube® dedicada à desidratação de material sólido permite recuperar a água presente nas lamas geradas devido à porosidade da unidade Geotube® para onde as lamas são bombeadas. Para além disso, o sistema Geotube® permite armazenar as lamas à medida que as mesmas são desidratadas, não requerendo qualquer outro tipo de estrutura de armazenamento.

No âmbito da presente dissertação, foram recolhidas amostras de lamas antes do processo de desidratação em 3 ETAR diferentes, assim como algumas amostras de filtrados e de lamas já desidratadas para posterior comparação com os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. No laboratório testaram-se 5 polímeros diferentes para a floculação das lamas e realizaram-se dois testes distintos com a tecnologia Tencate Geotube®: Cone test e GDT test.

Para além disso, foi feita a caracterização dos filtrados recolhidos nas ETAR e dos obtidos após aplicação do Cone test. Os parâmetros de qualidade analisados foram pH, Sólidos Totais, Sólidos Suspensos Totais, Carência Química de Oxigénio e Carência Bioquímica de Oxigénio. Foi também medida a humidade das lamas antes e após os processos de desidratação.

De um modo geral, os resultados obtidos comprovaram a eficiência da tecnologia Tencate Geotube® face às técnicas mais utilizadas atualmente, apresentando-se como uma excelente solução de desidratação a aplicar em lamas de ETAR.

**Palavras-chave:** ETAR, Desidratação de lamas, Tencate Geotube®

## ABSTRACT

With the gradual increase in population, associated with the scarcity of water seen more and more all over the world, the urgency of reusing this natural resource to the maximum is intensified. For this purpose, there are Wastewater Treatment Plants that make it possible to obtain good quality water from an effluent, subjecting it to various treatment processes.

However, this type of process generates a set of by-products, and the sludge formed has a high potential for recovery, due to its high moisture content that allows a good recovery of the water and use the solid waste for other purposes.

In order to recover the water present in this waste, processes are carried out that allow the reduction of its volume, among which the sludge dewatering stands out. Currently, mechanized processes such as centrifugation and the use of band or press filters are the most used techniques. With the growing awareness of environmental problems, a new sludge dewatering technology has emerged with good results and a low energy consumption.

Tencate Geotube® dewatering technology allows the recovery of water present in the sludge generated due to the porosity of the Geotube® unit where the sludge is pumped. Furthermore, the Geotube® system allows to store the sludge as it is dewatered, not requiring any kind of extra storage structure.

Sludge samples were collected before the dewatering process in 3 different WWTP, as well as some samples of filtrate (clarified) and dewatered sludges for later comparison with the results obtained in the laboratory tests.

In the laboratory tests, 5 different flocculants were prepared to determine which was the most suitable for each effluent, and two different tests were carried out with Tencate Geotube® technology: Cone test and GDT test.

Additionally, analyses were carried out on the filtrates collected in the WWTP and those obtained after applying the Geotube® system. The analysed parameters were pH, Total Solids, Total Suspended Solids, Chemical Oxygen Demand and Biochemical Oxygen Demand. The moisture present in the sludge before and after the dewatering processes was also measured.

Generally, the results obtained proved the efficiency of Tencate Geotube® technology compared to other techniques currently used, presenting itself as an excellent dewatering solution in WWTP.

**Keywords:** WWTP, Sludge dewatering, Tencate Geotube®

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>II</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>X</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>4</b>
2.1 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS.....	4
2.1.1 <i>Panorama nacional relativo ao tratamento de efluentes</i> .....	6
2.1.2 <i>Tipos de ETAR existentes</i> .....	8
2.1.3 <i>Processos de tratamento de efluentes</i> .....	9
2.1.3.1 Fase líquida .....	9
2.1.3.2 Fase sólida.....	12
2.2 PRODUÇÃO E GESTÃO DE LAMAS EM ETAR .....	12
2.2.1 <i>Produção de lamas</i> .....	12
2.2.2 <i>Processos de tratamento de lamas</i> .....	13
2.3 TÉCNICAS DE DESIDRATAÇÃO DE LAMAS .....	15
2.3.1 <i>Centrifugação</i> .....	15
2.3.2 <i>Filtração</i> .....	16
2.3.2.1 Filtros de banda .....	16
2.3.2.2 Filtros de prensa .....	17
2.3.3 <i>Leitos de secagem</i> .....	18
2.3.4 <i>Outros processos de desidratação</i> .....	19
2.4 ARMAZENAMENTO DE LAMAS DESIDRATADAS .....	20
2.5 DESTINO FINAL DAS LAMAS DESIDRATADAS.....	20
<b>3. TECNOLOGIA DE DESIDRATAÇÃO DE LAMAS TENCATE GEOTUBE®</b> .....	<b>23</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA TECNOLOGIA TENCATE GEOTUBE® .....	23
3.2 BOAS PRÁTICAS E INSTALAÇÃO DO SISTEMA TENCATE GEOTUBE® .....	26
3.3 FLOCULAÇÃO DURANTE A UTILIZAÇÃO DO SISTEMA GEOTUBE® .....	28
3.4 APLICAÇÕES TIPO DO SISTEMA TENCATE GEOTUBE® .....	30
3.5 EFICIÊNCIA DESTE SISTEMA .....	31
3.5.1 <i>Eficiência energética</i> .....	31
3.5.2 <i>Eficiência processual</i> .....	32
<b>4. CASOS DE ESTUDO</b> .....	<b>33</b>
4.1 OBJETIVOS .....	33
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO .....	33
4.2.1 <i>ETAR em S. Jacinto</i> .....	33
4.2.2 <i>ETAR na Figueira da Foz</i> .....	35
4.2.3 <i>ETAR de Famalicão</i> .....	38

4.3	RECOLHA DE AMOSTRAS .....	39
4.4	ANÁLISES LABORATORIAIS .....	41
4.4.1	<i>Preparação do floculante</i> .....	42
4.4.2	<i>Análise de humidade</i> .....	44
4.4.3	<i>Análise dos parâmetros dos filtrados</i> .....	44
4.5	TESTES COM A TECNOLOGIA GEOTUBE® .....	45
4.5.1	<i>Cone Test</i> .....	45
4.5.2	<i>GDT Test</i> .....	48
<b>5.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
5.1	PREPARAÇÃO DE FLOCULANTE .....	50
5.2	PERCENTAGEM DE MATÉRIA SECA NAS LAMAS .....	51
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO CENTRIFUGADO E FILTRADO DO GEOTUBE® .....	52
5.3.1	<i>Centrifugado</i> .....	52
5.3.2	<i>Filtrado da unidade Geotube® da Figueira da Foz</i> .....	53
5.4	CONE TEST .....	54
	<i>ETAR em S. Jacinto</i> .....	55
	<i>ETAR na Figueira da Foz</i> .....	58
	<i>ETAR em Famalicão</i> .....	61
5.5	VELOCIDADE DE DESIDRATAÇÃO .....	64
5.6	GDT TEST .....	64
5.7	EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE DESIDRATAÇÃO TENCATE GEOTUBE® NO TRATAMENTO DE LAMAS DE ETAR .....	66
5.8	ANÁLISE COMPARATIVA COM AS RESTANTES TÉCNICAS DE DESIDRATAÇÃO DE LAMAS .....	67
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>7.</b>	<b>TRABALHO FUTURO .....</b>	<b>72</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>76</b>	
	CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE CQO .....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Aqueduto 'Aqua Appia' em Roma. (Fonte: <a href="https://alchetron.com/Aqua-Appia">https://alchetron.com/Aqua-Appia</a> ).....	4
Figura 2 - Cartoon alusivo ao fenómeno do "Great Stink". (Fonte: <a href="https://www.historic-uk.com/HistoryUK/HistoryofBritain/Londons-Great-Stink/">https://www.historic-uk.com/HistoryUK/HistoryofBritain/Londons-Great-Stink/</a> ) .....	5
Figura 3 – ETAR em Famalicão. ....	5
Figura 4 - Evolução do nível de cobertura do serviço de saneamento de águas residuais em Portugal desde 1994 a 2015 (ERSAR, 2016). ....	6
Figura 5 – Evolução da qualidade de águas superficiais e subterrâneas em Portugal (APA,2019). ....	7
Figura 6 – Distribuição dos níveis de tratamento em ETAR urbanas em Portugal continental no ano de 2019 (APA, 2019).....	7
Figura 7 – Flotador de gorduras com ponte raspadora numa ETAR. ....	8
Figura 8 - Esquema ilustrativo das etapas de tratamento primário em ETAR (Adaptado de Jordão & Volchan Jr., 2009). ....	10
Figura 9 – Reator biológico numa ETAR (Fonte: <a href="http://aguaspontapreta.cv">http://aguaspontapreta.cv</a> ) .....	11
Figura 10 – Tratamento por lagunagem numa ETAR. ....	11
Figura 11 – Esquema de tratamento das fases sólida e líquida de uma ETAR.....	12
Figura 12 – Exemplo de um espessador gravítico e respetivos componentes (Adaptado de: Sludge Processing, 2020).....	13
Figura 13 – Exemplo de um espessador por flotação e respetivos componentes (Adaptado de: Sludge Processing, 2020).....	14
Figura 14 – Esquema de um digestor de lamas de ETAR. ....	14
Figura 15 – Esquema de um sistema de desidratação de lamas por centrifugação (Adaptado de Turovskiy & Mathai, 2006). ....	15
Figura 16 – Esquema de um sistema de desidratação por filtros de banda (Adaptado de SNF Floerger®, 2003). ....	16
Figura 17 – Esquema de um sistema de desidratação por filtros de prensa (Adaptado de Shammas & Wang, 2007). ....	17
Figura 18 – Leito de secagem aplicado em lamas de ETAR no Senegal (Fonte: <a href="https://www.researchgate.net/figure/Drying-beds-at-Niayes-faecal-sludge-treatment-plant-Dakar-Senegal-photo-Linda_fig1_269037413">https://www.researchgate.net/figure/Drying-beds-at-Niayes-faecal-sludge-treatment-plant-Dakar-Senegal-photo-Linda_fig1_269037413</a> ). ....	18
Figura 19 - Leito de secagem de lamas aplicado numa ETAR em Torrão (Águas do Vale do Tejo, 2020) .....	19
Figura 20 – Unidade Geotube® de desidratação de lamas em funcionamento (Tencate Geotube®,2021). ....	19
Figura 21 – Silo para armazenamento de lamas desidratadas por centrifugação em ETAR.....	20
Figura 22 – Utilização de lamas em campos agrícolas na Sibéria (Maksimova, et al., 2015). ....	21
Figura 23 – Utilização de unidades Geotube® contendo lamas desidratadas como barragem.(Fonte: Brochura Tencate Geotube® (Tencate Geotube®, 2021).....	22
Figura 24 – Utilização de unidades Geotube® contendo lamas desidratadas para terraplanagem. (Tencate Geotube® Case Studies, 2021) .....	22
Figura 25 – Membrana de uma estrutura Geotube®.....	23
Figura 26 – Unidade Geotube® com costuras circunferenciais na estrutura.....	24
Figura 27 – Altura máxima de enchimento gravada na superfície da unidade Geotube®. ....	24
Figura 28 – Mobile Dewatering System da Tencate Geotube® (Brochura Tencate Geotube®, 2021). ....	25

Figura 29 - Aplicação de unidades Geotube® em leitos de secagem (Tencate Geotube®, 2021)	25
Figura 30 - Exemplo de etiqueta do empacotamento de uma unidade Geotube® (Tencate Geotube®, 2021)	26
Figura 31 – Instalação de uma unidade Geotube® (Adaptado de Tencate Geotube®,2021).	27
Figura 32 – Floculante catiónico em pó.	28
Figura 33 – Solução de floculante em pó dissolvido em água.	29
Figura 34 – Floculante catiónico em emulsão de base oleosa.	29
Figura 35 – Exemplo da utilização de unidades Geotube® no combate à erosão costeira.	30
Figura 36 – Aplicação da tecnologia Tencate Geotube® na remediação de um rio na Malásia (Tencate Geotube® Case Studies, 2021).	30
Figura 37 – Aplicação da tecnologia Tencate Geotube® na remediação de um rio nos Estados Unidos da América (Tencate Geotube® Case Studies, 2021).	31
Figura 38 – Lagoa de arejamento na ETAR em S. Jacinto.	33
Figura 39 – Arejador em funcionamento na ETAR em S. Jacinto.	33
Figura 40 – Lagoa de maturação na ETAR em S. Jacinto.	34
Figura 41 – Unidades Geotube® instaladas na ETAR em S. Jacinto com lama consolidada no seu interior.	34
Figura 42 – ETAR urbana na Figueira da Foz.	35
Figura 43 – Equipamento utilizado para preparação e dosagem de floculante da ETAR na Figueira da Foz.	36
Figura 44 – Instalação da ETAR com bomba de lamas e entrada de polímero floculante pelo tubo azul.	36
Figura 45 – Circuito da tubagem das lamas antes do encaminhamento para a unidade Geotube®.	37
Figura 46 – Unidade Geotube® em funcionamento da ETAR na Figueira da Foz sobre uma plataforma construída para a estrutura.	37
Figura 47 – ETAR urbana em Famalicão.	38
Figura 48 – Centrifugadora de lamas na ETAR em Famalicão.	38
Figura 49 – Margem da lagoa de arejamento da ETAR em S. Jacinto onde foram recolhidas as lamas.	39
Figura 50 – Ponto de amostragem da ETAR na Figueira da Foz onde foram recolhidas as lamas.	39
Figura 51 – Recolha de filtrado da unidade Geotube® na Figueira da Foz.	40
Figura 52 – Local de recolha de lamas da ETAR em Famalicão.	41
Figura 53 – Ponto de amostragem onde foi retirado o centrifugado da ETAR em Famalicão.	41
Figura 54 – Pesagem de um floculante em pó numa balança analítica.	42
Figura 55 – Medição do volume de um floculante em emulsão.	43
Figura 56 – Floculante Geofloc C29 com grumos depositados.	43
Figura 57 – Floculante Geofloc A25 devidamente preparado e homogéneo.	44
Figura 58 – Exemplo de uma boa formação de flocos após adição de floculante e agitação em Jar test.	45
Figura 59 – Fenómeno de ‘bulking’ nas lamas floculadas da ETAR em S. Jacinto.	46
Figura 60 – Esquema de montagem de uma instalação de Cone Test.	46
Figura 61 – Exemplo de um mau filtrado durante o Cone Test com sólidos em suspensão.	47
Figura 62 – Exemplo de um bom filtrado durante o Cone test.	47
Figura 63 – Lamas no interior da membrana Geotube® antes de ser aplicada pressão.	48
Figura 64 – Instalação do GDT test.	49

Figura 65 – Soluções de floculante devidamente preparadas: A) Geofloc C29; B) Geofloc RG11; C) Geofloc A25; D) Geofloc GT08; E) Geofloc EC.....	50
Figura 66 – Recolha de lamas na ETAR em Famalicão. ....	51
Figura 67 – Papel de filtro utilizado nos ensaios de determinação dos SST no centrifugado da ETAR em Famalicão. ....	53
Figura 68 – Papel de filtro utilizado nos ensaios de determinação dos SST no filtrado da unidade Geotube® da ETAR na Figueira da Foz. ....	53
Figura 69 – Lamas das ETAR de S. Jacinto e Figueira da Foz após adição do floculante aniónico e agitação em Jar test. ....	54
Figura 70 – Lamas da ETAR em Famalicão após adição do floculante aniónico e agitação em Jar test. ....	55
Figura 71 – Exemplo de uma floculação adequada com separação evidente dos flocos formados e sobrenadante. ....	60
Figura 72 – Variação da matéria seca nas lamas desidratadas numa unidade Geotube® ao longo do tempo. ....	64
Figura 73 – Lamas desidratadas após 3 dias de consolidação no Geobag®.....	65
Figura 74 – Amostra de lamas desidratadas retirada do interior do Geobag® após 3 dias de consolidação no interior da estrutura.....	66
Figura 75 - Folha de calibração dos ensaios de determinação da CQO em gama alta .....	76
Figura 76 - Curva de calibração para determinação de CQO em gama baixa.....	77

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Consumos energéticos das tecnologias com processos mecânicos de desidratação de lammas (Andersen, 2001). .....	32
Tabela 2 – Propriedades dos flocculantes utilizados e respectivas concentrações arbitradas.....	42
Tabela 3 – Tempo de preparação dos vários flocculantes em agitação no Jar test. ....	50
Tabela 4 – Matéria seca nas amostras de lammas recolhidas em ETAR.....	51
Tabela 5 – Matéria seca nas lammas desidratadas por centrifugação na ETAR em Famalicão.....	52
Tabela 6 – Parâmetros de qualidade da água medidos no centrifugado da ETAR em Famalicão (Valores médios de dois ensaios $\pm$ desvio máximo).....	52
Tabela 7 – Parâmetros de qualidade da água medidos no filtrado da unidade Geotube® da ETAR na Figueira da Foz (Valores médios de dois ensaios $\pm$ desvio máximo).....	53
Tabela 8 – Determinação da dosagem ideal de flocculante para as lammas recolhidas na ETAR em S. Jacinto.....	55
Tabela 9 – Resultados dos ensaios Cone test às lammas recolhidas na ETAR em S. Jacinto. ....	56
Tabela 10 – Parâmetros de qualidade medidos no filtrado resultante do Cone test às lammas recolhidas na ETAR em S. Jacinto (Valores médios de dois ensaios $\pm$ desvio máximo). ....	57
Tabela 11 - Determinação da dosagem ideal de flocculante para as lammas recolhidas na ETAR da Figueira da Foz. ....	58
Tabela 12 - Resultados dos ensaios Cone Test às lammas recolhidas na ETAR da Figueira da Foz. ....	59
Tabela 13 - Parâmetros de qualidade medidos no filtrado resultante do Cone test às lammas recolhidas na ETAR da Figueira da Foz (Valores médios de dois ensaios $\pm$ desvio máximo).....	60
Tabela 14 - Determinação da dosagem ideal de flocculante para as lammas recolhidas na ETAR em Famalicão. ....	61
Tabela 15 - Resultados dos ensaios Cone test às lammas recolhidas na ETAR em Famalicão. ....	62
Tabela 16 - Parâmetros de qualidade medidos no filtrado resultante do Cone test às lammas recolhidas na ETAR em Famalicão (Valores médios de dois ensaios $\pm$ desvio máximo).....	63
Tabela 17 – Resultados obtidos no GDT test às lammas recolhidas na ETAR em Famalicão (Valores médios de dois ensaios $\pm$ desvio máximo). ....	65
Tabela 18 – Redução de volume e humidade nas lammas após o processo de desidratação por Cone test. ....	66

## NOMENCLATURA

### LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

<b>°C</b>	Grau Celsius
<b>a.C.</b>	Antes de Cristo
<b>APA</b>	Agência Portuguesa do Ambiente
<b>CBO</b>	Carência Bioquímica de Oxigénio
<b>CQO</b>	Carência Química de Oxigénio
<b>ETA</b>	Estação de Tratamento de Águas
<b>ETAR</b>	Estação de Tratamento de Águas Residuais
<b>g</b>	Gramas
<b>GDT</b>	Geotube® Dewatering Test
<b>L</b>	Litro
<b>LD</b>	Limite de deteção
<b>LER</b>	Lista Europeia de Resíduos
<b>m</b>	Metro
<b>min</b>	Minuto
<b>rpm</b>	Rotações por Minuto
<b>SST</b>	Sólidos Suspensos Totais
<b>ST</b>	Sólidos Totais
<b>WWTP</b>	Wastewater Treatment Plants



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do tema

Enquanto bem essencial, a água assume um papel fulcral na possibilidade da existência de vida no nosso planeta. Apesar de se verificar uma relativa abundância deste elemento na natureza, existem vários fatores de origem, nomeadamente antropogénica, que trazem consigo uma necessidade cada vez mais urgente de realizar tratamentos de águas para a sua posterior utilização, seja para consumo, atividades agrícolas, descarga em cursos de água, entre outros.

Atualmente, as principais estruturas responsáveis pelo tratamento de águas são as Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR).

No tratamento de águas residuais, geram-se vários subprodutos, dos quais se destacam as lamas. São caracterizadas por um elevado teor de humidade e de matéria orgânica e apresentam um elevado potencial de valorização, que apenas pode ser concretizado se as mesmas forem devidamente tratadas.

Em Portugal, no ano de 2020, foram produzidas cerca de 800 mil toneladas de lamas de ETAR (Ambiente Magazine, 2021). Para além de se tratar de um valor extremamente elevado, será de esperar que o mesmo aumente com o passar dos anos. Tal dever-se-á, principalmente, ao aumento gradual do consumo de água e ao desenvolvimento das atividades do setor industrial que fomentam a produção de efluentes industriais.

As lamas de ETAR formam-se nos processos de tratamento da fase líquida e são posteriormente tratadas e valorizadas através de processos de redução de volume, de modo a recuperar o máximo de água possível, e de reaproveitamento do resíduo sólido final para, por exemplo, fins agrícolas.

A desidratação de lamas assume um papel importante na redução do volume das mesmas. A sua função é remover a água presente nas lamas, reduzindo o teor de humidade e reaproveitando a água que se encontrava nos interstícios do resíduo, reenviando-a para o início do tratamento na ETAR.

Existem vários métodos de desidratação de lamas, dos quais se destacam os leitos de secagem, os filtros de prensa ou de banda e a centrifugação. A filtração e a centrifugação tratam-se de sistemas mecânicos, sendo por isso mais caros, e podem ser vistos como processos mais sofisticados, de um ponto de vista operacional e de manutenção (Sperling, 2007). Por outro lado, os leitos de secagem utilizam mecanismos naturais como a evaporação e a percolação necessitando, por isso, de um maior período de operação para atingir a eficiência pretendida.

Atualmente, as tecnologias mais utilizadas são as que possuem os seus processos o mais mecanizados possível, devido ao crescente aumento da produção de lamas e consequente necessidade de tratamento e de otimização do espaço ocupado por este resíduo. Todavia, ainda se verifica a utilização de leitos de secagem em países em desenvolvimento como por exemplo acontece no Senegal (Dodane, 2011). As condições climáticas existentes em países como este apresentam uma vantagem para a utilização deste processo, pois as elevadas temperaturas aceleram o processo de evaporação da água. No entanto, trata-se de uma técnica que apenas é

adequada para pequenas populações, diminuindo assim a viabilidade da sua utilização em zonas mais urbanizadas.

Surge, então, a necessidade de encontrar técnicas de desidratação mais eficientes e mais sustentáveis. Uma dessas técnicas trata-se da desidratação de lamas através da tecnologia Tencate Geotube®. As lamas são floculadas através da adição de um polímero floculante, capaz de agregar as partículas sólidas em suspensão, e posteriormente enviadas para as unidades Geotube®. À medida que vão enchendo, a água é drenada pelos poros do Geotube® e a matéria sólida fica retida no interior da estrutura. Trata-se então de uma tecnologia que não só consegue obter resultados satisfatórios no que toca à redução do volume das lamas, como também está associada a um baixo consumo energético face às alternativas que utilizam processos mecânicos, considerando apenas o processo de desidratação.

A tecnologia Tencate Geotube® apresenta-se como uma alternativa para os processos atualmente mais utilizados na desidratação de lamas pois não só apresenta uma eficácia tão boa ou até melhor do que os processos mecânicos, como também representa um baixo custo energético de exploração, o que resulta em menores encargos para a entidade responsável pela gestão deste subproduto.

Para comprovar a eficiência desta tecnologia, foram realizados dois ensaios normalmente utilizados pela Geosin aquando da validação da técnica de desidratação Tencate Geotube® ao tipo de lamas a tratar. Recolheram-se amostras de três ETAR distintas, prepararam-se vários floculantes diferentes e fizeram-se dois tipos de ensaios: Cone Test e GDT test sendo que os procedimentos e resultados dos mesmos serão abordados nos capítulos 4 e 5.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo verificar a eficiência da desidratação de lamas através da tecnologia Tencate Geotube® e, posteriormente, compará-la com outras técnicas de desidratação atualmente utilizadas.

Serão utilizados vários floculantes nos ensaios laboratoriais de modo a determinar qual o floculante que permite obter melhores resultados.

Para além disso, com este estudo procurar-se-ão também formas de otimizar o processo de desidratação utilizando a tecnologia visada, assim como possíveis sugestões de trabalhos futuros de modo a comprovar e complementar os resultados aqui obtidos.

## 1.3 Estrutura da dissertação

O primeiro capítulo do trabalho consiste numa pequena introdução, apresentando os objetivos pretendidos com esta dissertação.

O segundo capítulo é o estado da arte, onde é feita uma breve contextualização histórica do tratamento de águas residuais e explicados os vários processos em ETAR, com enfoque na fase sólida e na desidratação de lamas.

No terceiro capítulo é apresentada, com mais detalhe, a tecnologia de desidratação de lamas Tencate Geotube®, assim como os critérios de eficiência utilizados para comparação entre as técnicas de desidratação.

No quarto capítulo são apresentados os 3 casos de estudo onde foram recolhidas amostras de lamas e também os procedimentos utilizados nos ensaios laboratoriais.

O quinto capítulo consiste na apresentação e discussão dos resultados experimentais obtidos e a sua comparação com os valores de referência.

O sexto capítulo trata-se das conclusões retiradas na realização do trabalho, sendo que no sétimo, e último capítulo, são apresentadas algumas sugestões para possíveis estudos futuros.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 Estações de Tratamento de Águas Residuais

Desde o início da humanidade que o aproveitamento da água, assim como o seu transporte a fim de poder ser utilizada, tem sido uma questão debatida. No império romano, por volta do século V a.C. foram projetados os primeiros aquedutos na cidade de Roma, sendo que no ano de 312 a.C. foi construído o primeiro aqueduto, conhecido como 'Aqua Appia', evidenciado na figura 1 (Web archive, 2008).

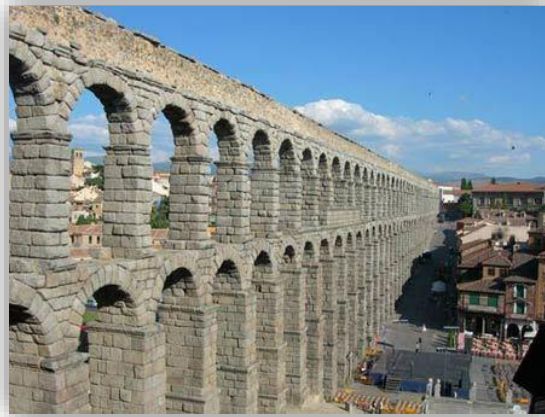


Figura 1 - Aqueduto 'Aqua Appia' em Roma.  
(Fonte: <https://alchetron.com/Aqua-Appia>)

Com o passar dos anos, foram construídos cerca de 24 aquedutos, transportando diariamente cerca de 1 milhão de metros cúbicos de água até à capital italiana, possuindo uma extensão de mais de 400 km de aquedutos (Web archive, 2008). Os aquedutos, são então considerados uma das primeiras obras do foro hidráulico, e já demonstravam, na altura da sua construção, uma necessidade crescente de obras destinadas ao transporte de água, culminando no saneamento que observámos atualmente na nossa civilização.

Todavia, com o passar dos anos e com o desenvolvimento do setor industrial verificado principalmente no século XIX, surge a necessidade de não só garantir um transporte adequado da água, como também assegurar a sua qualidade.

A meio do século XIX, as condições higiénicas foram agravadas devido a uma pesada industrialização e urbanização. Em Londres, ocorreram surtos de cólera nos anos de 1832, 1849 e 1855 associados a propagação de uma bactéria se encontrava na água que chegava as habitações da população (Angelakis & Snyder, 2015). Mais tarde, em 1858, ocorreu um fenómeno conhecido como 'Great Stink' que consistiu no enorme cheiro que se fazia sentir devido aos dejetos humanos libertados no rio Tamisa (History UK, 2019).



Figura 2 - Cartoon alusivo ao fenómeno do "Great Stink".

(Fonte: <https://www.historic-uk.com/HistoryUK/HistoryofBritain/Londons-Great-Stink/>)

Este tipo de acontecimentos mostraram que, para além de ser necessário ter atenção na água que utilizamos, também é da mesma importância assegurar que a mesma, depois de utilizada, é devolvida em boas condições, isto é, sem prejudicar qualquer ser vivo, assim como o meio ambiente.

Eventos como este, culminaram no desenvolvimento de uma estrutura que permitisse recolher um efluente, de origem industrial ou doméstica, e tratá-lo de modo a recuperar a água nele presente e dotar a mesma de características que permitissem a sua devolução ao meio recetor. Esta instalação é muito utilizada atualmente, e é vulgarmente conhecida como ETAR.



Figura 3 – ETAR em Famalicão.

As ETAR assumem um papel muito importante num mundo onde o aumento exponencial da população humana intensifica a necessidade de água potável. Além disso, em alguns países em desenvolvimento, verifica-se que ainda não existem as condições mínimas de saneamento para os seus habitantes, resultando em surtos de doenças, como por exemplo, a cólera. Em 2018, vários países africanos comprometeram-se, perante a Organização Mundial de Saúde a implementar estratégias que permitissem acabar com os surtos de cólera até 2030 (Agência Brasil, 2018).

Ainda assim, não é só nos países em desenvolvimento que pode existir propagação de doenças associadas à contaminação da água. No contexto pandémico que vivemos atualmente existem estudos que comprovam que é possível detetar a presença de estirpes da Covid-19 em efluentes domésticos, nomeadamente nas fezes de indivíduos infetados. Segundo o mesmo artigo, após o tratamento do efluente, já não se verificava a presença da estirpe do vírus, o que indica que este não sobrevive aos tratamentos em ETAR nos casos em estudo (Carrillo-Reyes, et al., 2020).

Atualmente, as Águas de Portugal lideram um projeto de nome Covidetect cujo principal objetivo é criar um sistema de alerta para possíveis surtos de Covid-19, verificando a presença de estirpes do vírus em efluentes domésticos (Diário de notícias, 2020).

Existe também, em Portugal, o projeto “Vírus4Health” resultante de uma parceria entre o CIIMAR-UP e a Águas do Porto que tem como principal objetivo monitorizar a presença de SARS-CoV-2 nas águas residuais afluentes às ETAR do Freixo e Sobreiras (Notícias UP, 2021).

### 2.1.1 Panorama nacional relativo ao tratamento de efluentes

No que diz respeito à situação de Portugal em relação ao tratamento de efluentes, verifica-se que atualmente é tratada uma percentagem muito superior da água que é drenada, face aos valores verificados no final do século XX, como podemos verificar na figura 4 (ERSAR, 2016).

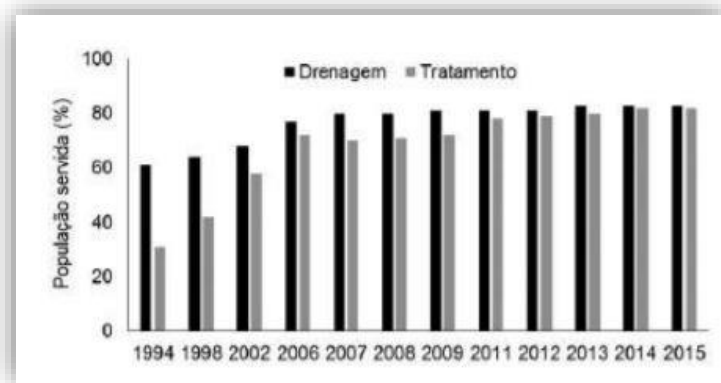


Figura 4 - Evolução do nível de cobertura do serviço de saneamento de águas residuais em Portugal desde 1994 a 2015 (ERSAR, 2016).

Observando a figura 4, não só se verifica um aumento gradual da percentagem de população servida, como também se nota uma diferença cada vez menor entre a drenagem e tratamento dos efluentes, refletindo a subida no rendimento dos processos de tratamento de águas residuais. Apesar de não se encontrarem apresentados na figura dados relativos ao ano presente, será de esperar que estes sejam muito semelhantes aos dados de 2015, ou seja, uma elevada percentagem da população servida e um tratamento de quase toda a água que é drenada.

Associada às evoluções das tecnologias usadas em ETAR, a qualidade das águas superficiais, como seria de esperar, apresenta melhorias face aos cenários das últimas décadas. A partir de 2009, a percentagem de água de boa qualidade ultrapassou a percentagem de água de má qualidade (ERSAR, 2016).

De acordo com os dados do relatório de Classificação das massas de água (APA, 2019), cujo objetivo era classificar as massas de água superficial e subterrânea em Portugal, a percentagem de água de qualidade boa encontrava-se distante dos valores pretendidos para 2021. Este

relatório dividiu-se em 3 ciclos em anos diferentes, sendo que os seus resultados se encontram na figura 5.

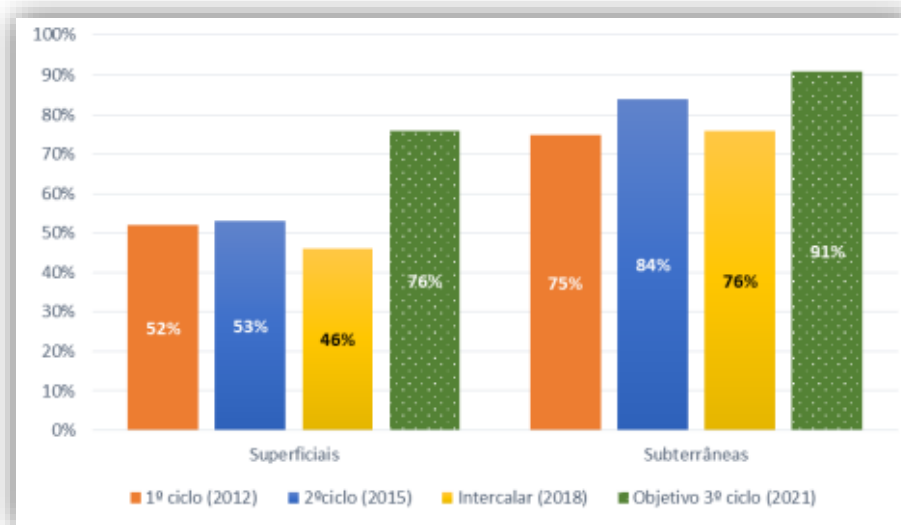


Figura 5 – Evolução da qualidade de águas superficiais e subterrâneas em Portugal (APA, 2019).

De acordo com os dados apresentados, no ano de 2018 tanto a qualidade das águas superficiais, como a qualidade das águas subterrâneas apresentam valores distantes dos valores alvo definidos para o ano de 2021. Para além disso, é possível verificar uma ligeira descida da qualidade de água entre 2015 e 2018 que poderá dever-se à intensa seca que afetou Portugal continental no ano de 2015, assim como a intensificação das atividades agrícolas (APA, 2019).

No que diz respeito aos níveis de tratamento de cada ETAR em território continental, na figura 6 apresentam-se as percentagens relativas ao tipo de tratamento em ETAR urbanas no ano de 2019 (APA, 2019).

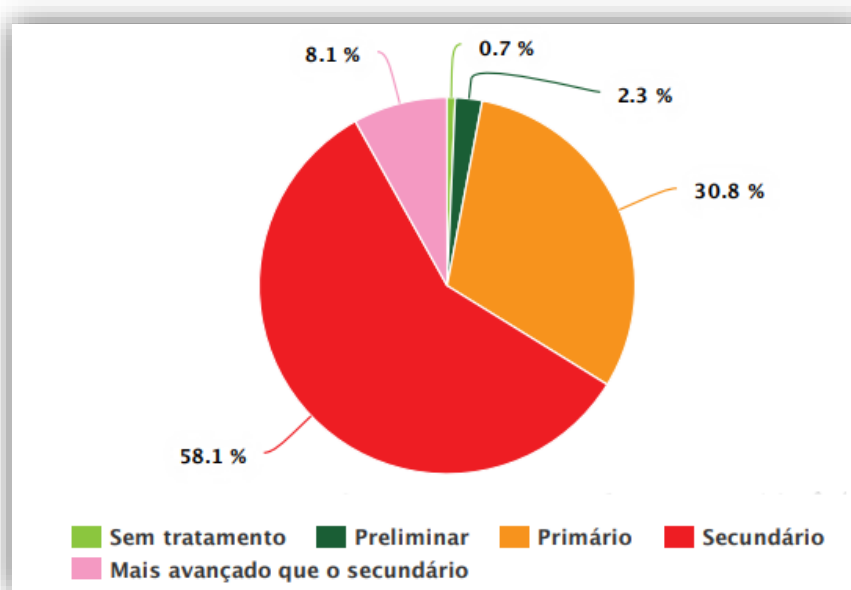


Figura 6 – Distribuição dos níveis de tratamento em ETAR urbanas em Portugal continental no ano de 2019 (APA, 2019).

De acordo com os dados da figura 6, facilmente se verifica que a maioria das ETAR urbanas possuem tratamento secundário, sendo que este é normalmente mais adequado às características das águas residuais urbanas. Em segundo lugar, encontra-se o tratamento primário, mais comum em instalações de pequenas dimensões (APA, 2019).

### 2.1.2 Tipos de ETAR existentes

Existem vários tipos de ETAR diferentes, seja quanto aos níveis de tratamento utilizados, assim como às características do efluente que vai ser tratado. No caso de se tratarem de efluentes com origens diferentes, como por exemplo, um efluente industrial e um efluente doméstico, ambos possuem composições/características que podem ditar os processos de tratamento a que serão submetidos na estação.

No que toca às lamas produzidas, será expectável que a sua composição, entre outras características, irá depender da natureza do efluente que é tratado, assim como dos processos de tratamento a que este for submetido. Os tipos de ETAR existentes, no que diz respeito aos efluentes a tratar, podem dividir-se em duas categorias: industrial e urbana.

Como o próprio nome indica, uma ETAR industrial responsabiliza-se por fazer o tratamento de efluentes industriais que tratam-se das águas residuais provenientes de instalações usadas para comércio ou indústria que não possuam uma origem doméstica ou provenham de escoamento pluvial de acordo com a Diretiva 91/271/CEE de 1991.

As características de um efluente industrial estão diretamente relacionadas com o tipo de atividade que a entidade responsável pela formação deste resíduo exerce. Tome-se como exemplo o caso de um efluente de uma indústria de conservas. Associado à produção de conservas está a utilização de óleos a fim de garantir a conservação dos alimentos embalados. Portanto, será de esperar um tratamento preliminar aquando do tratamento de um efluente industrial deste tipo. Para garantir um tratamento adequado deste efluente seria então necessária uma atenção especial no que toca à remoção das gorduras presentes. Na figura 7 pode observar-se um exemplo de um equipamento de desengorduramento a trabalhar numa ETAR onde as gorduras do efluente que chega são flotadas e, posteriormente, retiradas por ação de uma ponte raspadora.



Figura 7 – Flotador de gorduras com ponte raspadora numa ETAR.

Depois das etapas de tratamento preliminar e tratamento primário, quando se trata de um efluente com elevadas cargas orgânicas, o mesmo é submetido a um tratamento biológico, por exemplo por sistemas de lamas ativadas. O sistema de lamas ativadas consiste na manutenção de uma elevada concentração de microrganismos num reator artificialmente arejado. É um processo que permite converter grande parte da matéria orgânica solúvel e coloidal em formas inorgânicas estáveis e massa celular, sendo que estas são metabolizadas por um grupo diverso de microrganismos (Cervantes, et al., 2006).

No caso das ETAR urbanas são tratadas as águas residuais domésticas ou uma mistura destas com águas residuais industriais e/ou águas de escoamento pluvial, de acordo com a Diretiva 91/271/CEE (1991). Ainda segundo o mesmo documento, as águas residuais domésticas são resultantes de serviços e instalações residenciais e provêm, essencialmente, das atividades domésticas e do metabolismo humano.

Relativamente aos efluentes provenientes deste tipo de ETAR, apesar de geralmente não apresentarem um potencial poluidor muito elevado, podem conter produtos químicos que possam ser prejudiciais para o meio ambiente. Sendo assim, a etapa do tratamento biológico desempenhará um papel preponderante no tratamento deste tipo de efluentes.

### **2.1.3 Processos de tratamento de efluentes**

Numa ETAR, o seu funcionamento pode ser dividido em três fases distintas: fase líquida, fase sólida e fase gasosa.

Na ETAR é feito o tratamento da fase líquida removendo todos os componentes indesejados presentes na mesma. Associados aos processos de tratamento desta etapa, são gerados dois subprodutos que correspondem à fase sólida e à fase gasosa.

A fase gasosa corresponde à etapa onde são tratados os odores resultantes dos processos da fase líquida, e onde é armazenado o biogás que é produzido nas etapas de tratamento anaeróbio do efluente e/ou das lamas. Sendo que esta etapa é facultativa no tratamento de águas residuais, serão abordadas em maior detalhe nos capítulos seguintes apenas as fases líquida e sólida.

#### *2.1.3.1 Fase líquida*

É na fase líquida que acontecem os processos de tratamento do efluente, sendo que a mesma pode englobar 4 etapas de tratamento diferentes, pela seguinte ordem de operação: tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário.

Quando o efluente chega à ETAR, começa por ser submetido à etapa de tratamento preliminar onde são removidos os sólidos grosseiros, areias e gorduras que possam causar problemas de funcionamento nos equipamentos a jusante. Normalmente, estes sólidos são enviados para aterro e são considerados gradados, associados ao código LER 19 08 01 referente à deposição em aterro de resíduos não perigosos (Portaria nº 209, 2004).

Para tal, podem ser utilizados canais de gradagem, observáveis na figura 8, para fazer uma gradagem mecânica que permita remover os sólidos de maior dimensão. Para além disso, são também utilizados desgorduradores/desarenadores, também evidenciados na figura 8, para

retirar as areias, óleos e gorduras presentes no efluente. Depois destes dois processos, pode ainda ser utilizado um canal de Parshall que permite medir instantaneamente o caudal de modo a assegurar que o escoamento ocorre de forma controlada (Metcalf & Eddy, 2002).

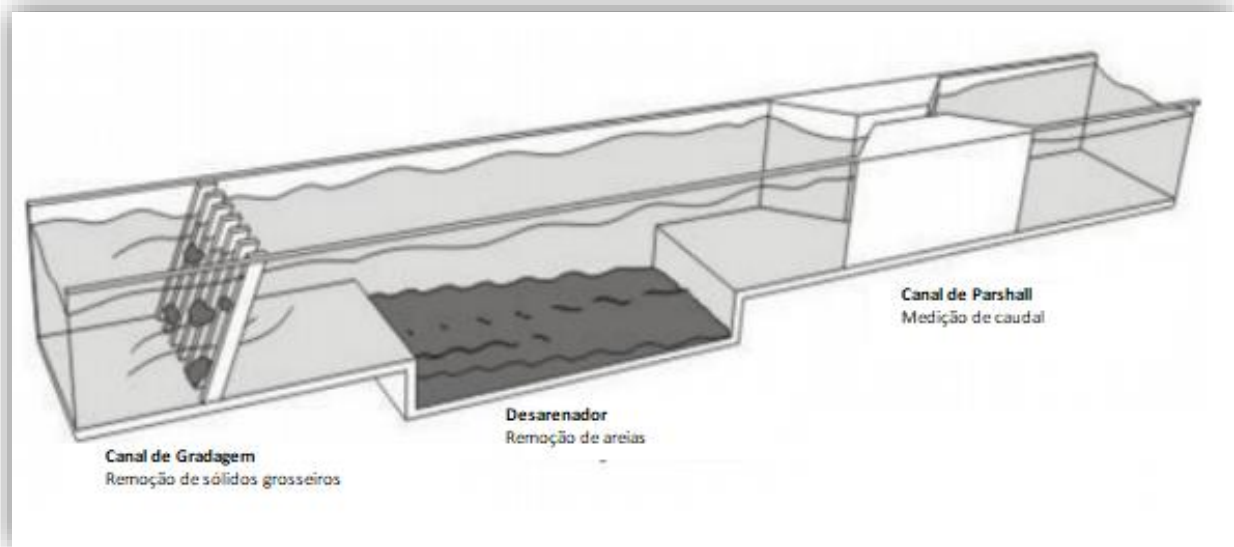


Figura 8 - Esquema ilustrativo das etapas de tratamento primário em ETAR (Adaptado de Jordão & Volchan Jr., 2009).

Seguidamente, ocorre a etapa de tratamento primário que, de acordo com Metcalf & Eddy (2002), é responsável pela remoção de uma quantidade considerável dos sólidos suspensos e de matéria orgânica do efluente, envolvendo processos de decantação de modo a clarificar o afluente. É nesta etapa que são produzidas as primeiras lamas que são encaminhadas para tratamento, também conhecidas como lamas primárias.

A próxima etapa, é responsável pela remoção de matéria orgânica biodegradável e de sólidos suspensos e é designada de tratamento secundário, sendo que também é conhecida como tratamento biológico devido aos processos que ocorrem nesta fase.

Segundo Metcalf & Eddy (2002) os objetivos desta fase de tratamento podem ser distinguidos consoante o efluente a tratar. Os autores referem que, no caso dos efluentes domésticos, o principal objetivo é transformar os constituintes biodegradáveis dissolvidos em produtos finais com condições admissíveis de devolução ao meio ambiente e também, se necessário, remover alguns nutrientes que possam estar presentes em excesso. Por outro lado, nos efluentes industriais o principal objetivo é remover ou reduzir a concentração de compostos orgânicos e inorgânicos.

O tratamento biológico pode ser feito de formas diferentes, por exemplo, em reatores biológicos, como o apresentado na figura 9, ou então num sistema natural de lagunagem como o evidenciado na figura 10.



Figura 9 – Reator biológico numa ETAR (Fonte: <http://aguaspontapreta.cv>)



Figura 10 – Tratamento por lagunagem numa ETAR.

No processo de tratamento secundário, assim como acontece no tratamento primário, são formadas as lamas secundárias, ou de depuração, que resultam principalmente da biomassa em excesso que é formada no processo de remoção de matéria orgânica e de outros nutrientes. Estas lamas são posteriormente decantadas em decantadores secundários, em sistemas de lamas ativadas, onde a biomassa é separada do efluente clarificado (Águas do Algarve, 2019).

Por fim, na etapa do tratamento terciário é feita uma remoção suplementar dos sólidos suspensos que não foram removidos anteriormente, sendo que também podem ser removidos nutrientes como o fósforo ou o azoto. Para além disso, pode também ser feita uma desinfecção da água, dado que se trata de um processo essencial caso a água seja destinada a reutilização. A desinfecção pode ser um processo físico ou químico, no entanto, são mais utilizados os processos físicos, nomeadamente através de radiação ultravioleta. Os processos químicos, que utilizam ozono ou cloro, são mais aplicados em casos de obtenção de uma água para consumo humano (Metcalf & Eddy, 2002).

Existem alguns casos onde pode haver ainda mais uma etapa de tratamento, conhecida como tratamento avançado. Esta procura remover os poluentes mais finos de modo a poder dotar a águas de características necessárias para, por exemplo, o consumo humano, e envolve processos como a ultrafiltração e osmose inversa (Metcalf & Eddy, 2002).

### 2.1.3.2 Fase sólida

A fase sólida é responsável pelo tratamento das lamas produzidas nos processos anteriormente mencionados, nomeadamente, no tratamento primário e no tratamento biológico.

O principal objetivo dos processos de tratamento na fase sólida consiste na redução do volume das lamas e fornecer às mesmas as características necessárias para o seu destino (Metcalf & Eddy, 2002).

Os processos incluídos nesta etapa, assim como a produção, gestão e valorização de lamas, serão abordados com mais detalhe nos capítulos seguintes.

## 2.2 Produção e gestão de lamas em ETAR

Enquanto principal subproduto de duas das etapas de tratamento da fase líquida, as lamas representam um dos maiores problemas associados ao tratamento de águas. No entanto, apesar de serem um resíduo indesejado, podem apresentar um enorme potencial de valorização. O DL nº73/2011 de 17 de junho comprova isso mesmo, pois o seu objetivo principal é retificar o conceito de resíduo para vários subprodutos, nos quais se encontram as lamas de ETAR. Deste modo, esta regulamentação procurou reforçar a prevenção destes resíduos, assim como a sua reutilização e reciclagem.

### 2.2.1 Produção de lamas

A produção de lamas está associada aos processos de tratamento englobados na fase líquida do funcionamento de uma ETAR, podendo dividir-se em lamas primárias e lamas secundárias, ou biológicas, sendo que na figura 11 pode observar-se uma esquematização da origem das lamas produzidas.

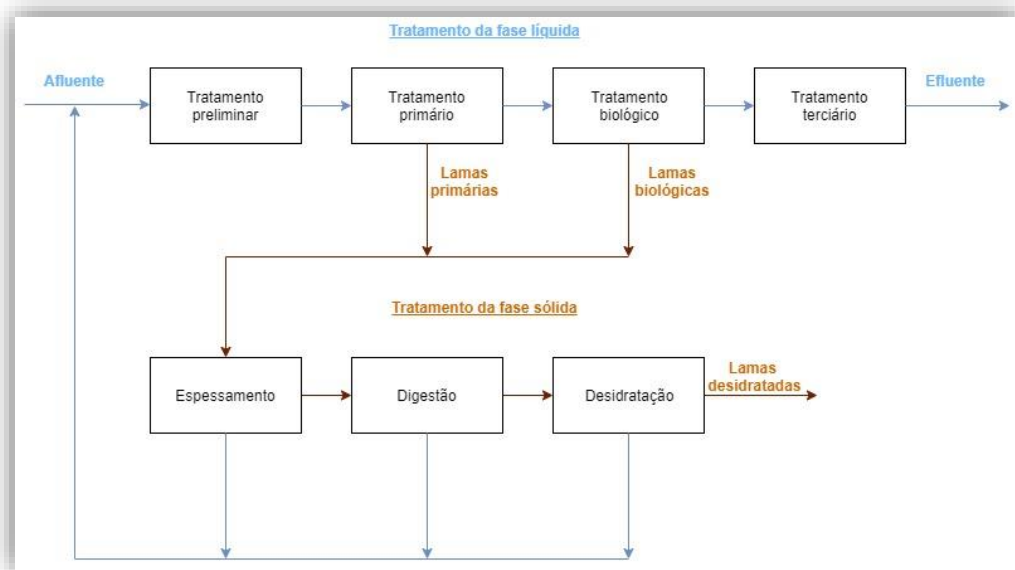


Figura 11 – Esquema de tratamento das fases sólida e líquida de uma ETAR.

No tratamento primário, são produzidas as lamas primárias que se tratam de lamas mais secas, devido à presença de partículas sólidas e de detritos na sua composição. São, portanto, lamas com um baixo teor de humidade e um elevado teor de matéria orgânica biodegradável dado que ainda não foram submetidas a qualquer tipo de tratamento biológico.

Por outro lado, as lamas biológicas caracterizam-se por um baixo teor de matéria orgânica e contêm as partículas sólidas que não foram removidas no tratamento primário.

Estas lamas são depois encaminhadas para as instalações responsáveis pelo tratamento, armazenamento e deposição das mesmas.

## 2.2.2 Processos de tratamento de lamas

No tratamento deste subproduto, estão, usualmente, englobados 3 processos: espessamento, digestão e desidratação.

O espessamento de lamas tem como objetivo principal aumentar a concentração dos sólidos, facilitando assim o processamento das etapas posteriores (AES sludge thickening, 2020). As técnicas mais utilizadas são o espessamento gravítico, normalmente mais aplicado às lamas primárias, e a flotação que é mais utilizada nas lamas secundárias.

No espessamento gravítico, as lamas são colocadas em espessadores que possuem configurações semelhantes aos decantadores (figura 12) e são submetidas apenas à ação da gravidade e a uma agitação lenta do tanque, se necessário.

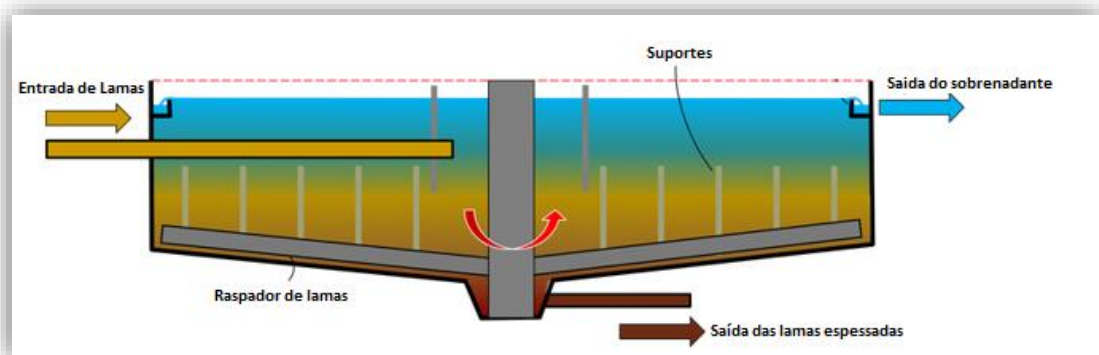


Figura 12 – Exemplo de um espessador gravítico e respetivos componentes (Adaptado de: Sludge Processing, 2020).

As lamas formam-se desde a base do tanque até ao topo do mesmo, estando sujeitas ao peso próprio das partículas depositadas ao longo do processo, sendo removidas, deste modo, pelo fundo do espessador por ação de um raspador de lamas enquanto o sobrenadante é removido no topo (Metcalf & Eddy, 2002).

Por outro lado, num espessamento por flotação, as lamas são ‘empurradas’ desde o fundo do tanque através da introdução de um gás que provoca o arrastamento das mesmas até a superfície, como evidenciado pela figura 13.

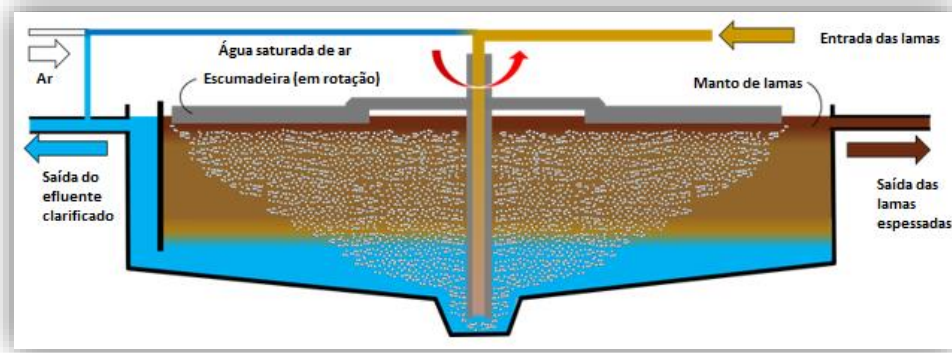


Figura 13 – Exemplo de um espessador por flotação e respetivos componentes (Adaptado de: Sludge Processing, 2020).

A flotação pode ser natural, no caso das partículas serem menos densas que a água, ou pode ser induzida por borbulhamento de ar, como é o caso das lamas cuja tendência é de se depositarem no fundo do tanque.

Posteriormente ao espessamento, dá-se a digestão das lamas cuja função é degradar a matéria orgânica através dos microrganismos que existem nas mesmas. É um processo que começa por ser aeróbio, devido à presença inicial de oxigénio dissolvido, mas que depois do oxigénio se extinguir, passa a ser um processo anaeróbio. Na digestão anaeróbia, é produzido biogás que é usado depois para produção de energia térmica/elétrica, contribuindo para a redução de custos do processo (Gonçalves 2017).

A digestão caracteriza-se pela sua continuidade, onde as lamas frescas entram no digestor ao mesmo tempo que as lamas já digeridas saem do mesmo de modo a serem uniformizadas. Os sólidos que entram no digestor devem ser distribuídos rapidamente, exigindo assim uma agitação permanente.

Na figura 14 encontra-se um exemplo de um digestor com as camadas em que o mesmo se divide no processo de digestão das lamas. É possível verificar que a entrada nas lamas é feita a um nível intermédio do tanque que é coincidente com a camada de lamas que se encontra em digestão.

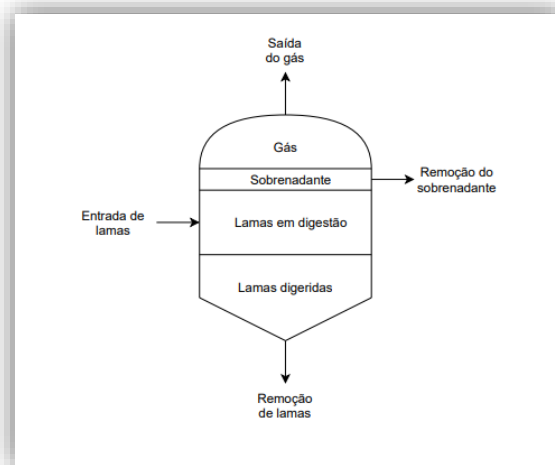


Figura 14 – Esquema de um digestor de lamas de ETAR.

A remoção dos sólidos que se encontram à superfície pode ser feita mecanicamente, ou pela recirculação de gás na base (Metcalf & Eddy, 2002).

A terceira, e última etapa, é a desidratação, responsável por remover a maior quantidade de água possível das lamas digeridas, sendo que as lamas desidratadas são posteriormente encaminhadas para valorização ou eliminação. Os processos de desidratação de lamas, assim como a respetiva valorização ou eliminação, serão temas abordados com mais detalhe nos seguintes capítulos.

## 2.3 Técnicas de desidratação de lamas

De modo a retirar a água presente nas lamas digeridas, as mesmas são submetidas a processos de desidratação que, para além de permitir reduzir o teor de humidade, permitem que a parte seca resultante do processo possa ser reaproveitada noutros processos, como por exemplo, para a produção de cimento (Rabie, et al., 2019).

Entre os vários processos de desidratação existentes, destacam-se as técnicas abordadas nos seguintes subcapítulos.

### 2.3.1 Centrifugação

Num sistema de desidratação por centrifugação, as lamas são introduzidas num cilindro que contém um parafuso rotativo no seu interior, estando ambas as estruturas em rotação a diferentes velocidades. Na figura 15, encontra-se um diagrama esquemático de um esquema de desidratação de lamas por centrifugação.

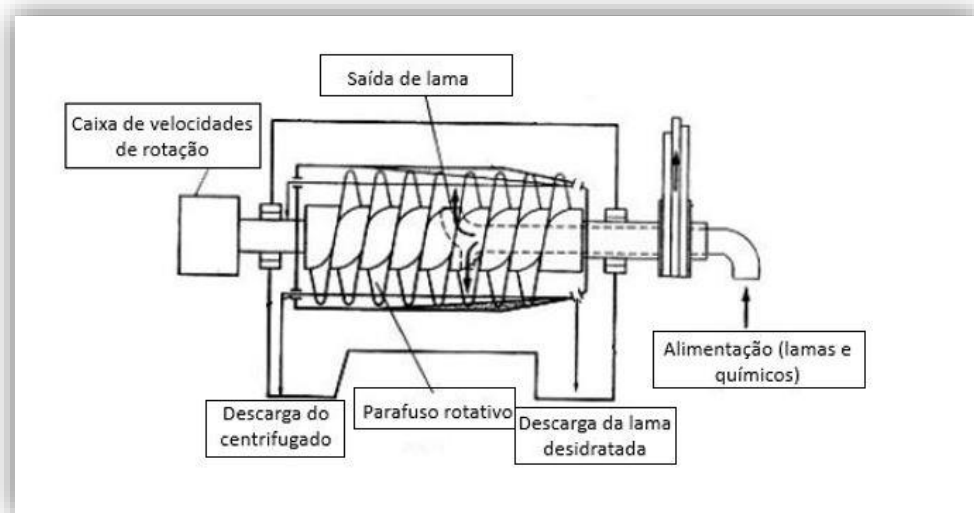


Figura 15 – Esquema de um sistema de desidratação de lamas por centrifugação (Adaptado de Turovskiy & Mathai, 2006).

Os movimentos rotativos da estrutura separam a água da parte sólida das lamas, removendo ambas em extremidades opostas sendo que podem ainda ser adicionados aditivos químicos para melhorar a eficiência do processo.

Entre os sistemas mecânicos de desidratação, a centrifugação é talvez a mais utilizada, principalmente em lamas biológicas, pois as lamas primárias podem conter material prejudicial para a centrifuga. Trata-se de uma técnica que, com a utilização de polímeros pode atingir uma taxa de captura de sólidos acima dos 90% (Turovskiy & Mathai, 2006).

A centrifugação de lamas é uma técnica cujo desempenho, aquando da transposição para uma escala industrial, é difícil de prever e depende muito das condições de operação. Parâmetros como o tempo de residência, a velocidade da centrífuga e do parafuso são extremamente variáveis consoante o tipo de lamas a tratar, representando assim um obstáculo para a aplicação desta técnica (Ginisty, et al., 2021).

## 2.3.2 Filtração

A filtração por meio mecânico, pode ser realizada por 2 equipamentos distintos: filtros de banda ou filtros de prensa. Apesar de ambas as técnicas trabalharem com processos de filtração, apresentam algumas diferenças no seu procedimento.

### 2.3.2.1 Filtros de banda

Os filtros de banda são sistemas com uma alimentação contínua com duas correias porosas em movimento que possuem uma zona de drenagem por gravidade e zonas de pressão que são aplicadas mecanicamente (Turovskiy & Mathai, 2006). Na figura 16 é apresentado um esquema de um filtro de banda.

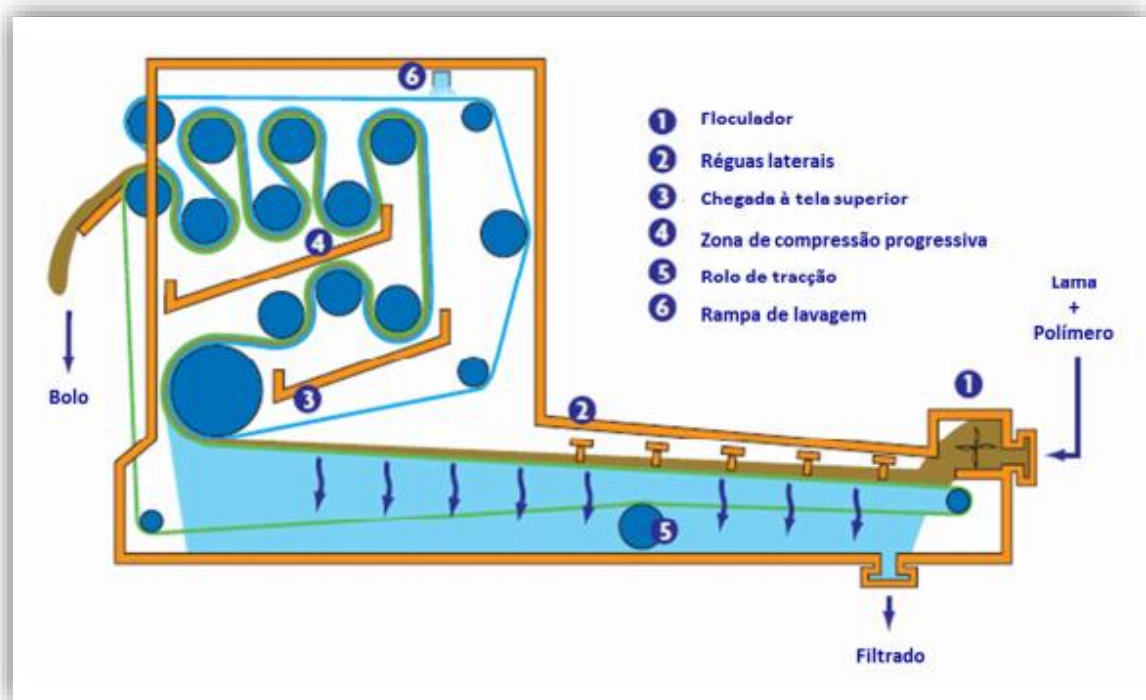


Figura 16 – Esquema de um sistema de desidratação por filtros de banda (Adaptado de SNF Floerger®, 2003).

Como se pode verificar na figura 16, a lama é introduzida com o polímero na face superior da banda e é transportada por ação do rolo de tração, sendo depois comprimida nas zonas de compressão progressiva, libertando assim a água contida, produzindo um bolo de

massa seca como resultado final. Este processo requer um operador responsável pela mistura e dosagem do polímero e pela monitorização da utilização da estrutura. Deve observar várias vezes ao dia tanto a alimentação como o bolo de lama seca, pois uma falha no condicionamento químico para ajustar as características dos biosólidos pode causar problemas operacionais (Shammas & Wang, 2007).

De acordo com Shammas & Wang (2007), esta tecnologia apresenta várias vantagens que incluem baixos custos operacionais, baixo consumo de energia e facilidade de manutenção. Por outro lado, segundo os autores, também possui um conjunto de desvantagens como a produção de maus odores e o facto do processo requerer uma quantidade considerável de água de lavagem das bandas.

### 2.3.2.2. Filtros de prensa

Ao contrário da técnica anterior, os filtros de prensa englobam um processo descontínuo onde a desidratação é atingida submetendo as lamas a altas pressões (Turovskiy & Mathai, 2006). O funcionamento dos filtros de prensa encontra-se esquematizado na figura 17.

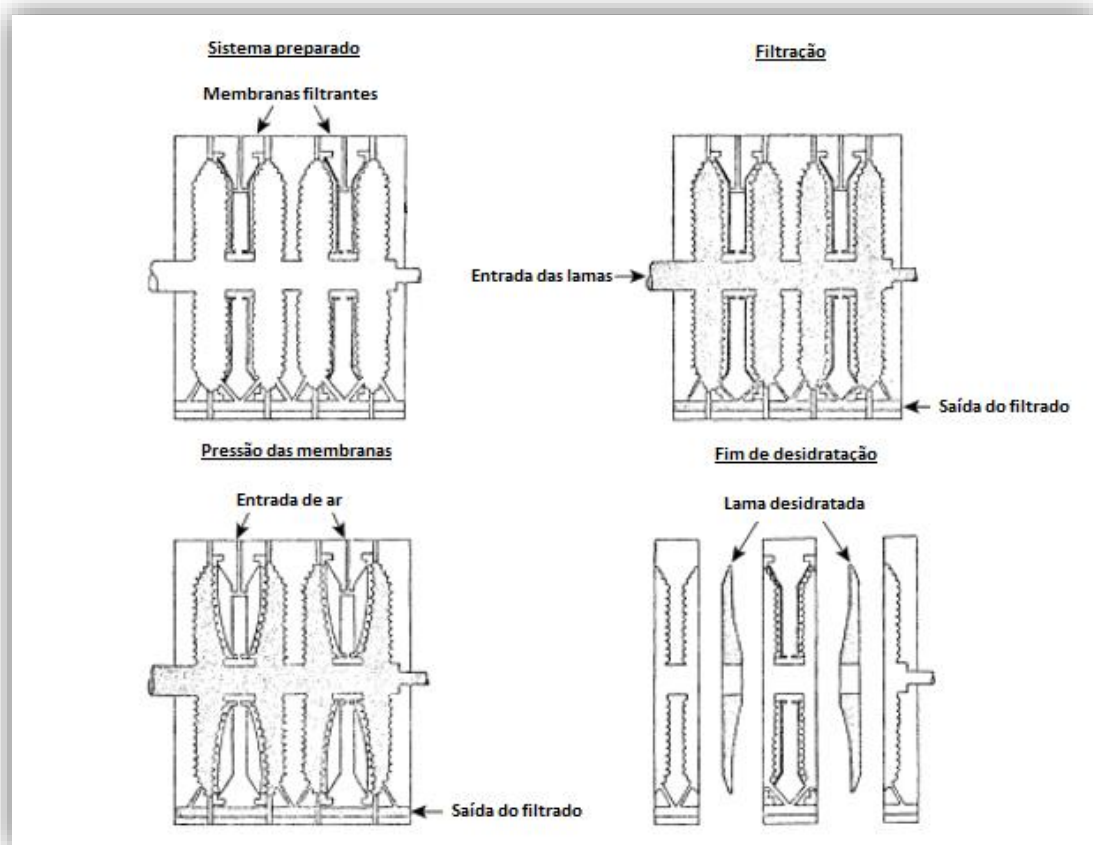


Figura 17 – Esquema de um sistema de desidratação por filtros de prensa (Adaptado de Shammas & Wang, 2007).

A lama é introduzida na parte lateral do filtro, que depois submete a mesma a elevadíssimas pressões por parte dos pratos do equipamento, retendo a matéria sólida e libertando a água presente inicialmente nas lamas. O bolo de massa seca formado é retirado no final antes da entrada do seguinte volume de lamas (Shammas & Wang, 2007).

Esta técnica apresenta uma elevada concentração de sólidos no bolo de massa seca final e não necessita de demasiada atenção do operador durante o processo de desidratação, apesar de obrigar a uma limpeza exaustiva do equipamento após utilização. No entanto, é uma técnica que requer uma área relativamente grande para garantir a sua viabilidade e é consideravelmente dispendiosa, muito devido ao gasto energético associado às elevadas pressões que é necessário os pratos exercerem sobre a lama (Shammas & Wang, 2007).

### 2.3.3 Leitos de secagem

Os leitos de secagem são, de todas as técnicas mencionadas até agora, os que representam menores gastos energéticos. O processo de desidratação consiste na percolação natural da água das lamas através de um leito constituído por uma base porosa de gravilha e areia dispostas por camadas e na evaporação da mesma devido à exposição ao ar ambiente (Shammas & Wang, 2007). É importante que a lama que esteja bem digerida pois, caso contrário, o processo irá criar maus cheiros intensos e será mais difícil libertar a água presente nos interstícios.

Trata-se da tecnologia mais primitiva de desidratação de lamas e, apesar de já não ser muito aplicada mundialmente, ainda é utilizada em países em desenvolvimento onde o processo de evaporação é fomentado por temperaturas elevadas, como acontece, por exemplo, no Senegal, visível na figura 18.



*Figura 18 – Leito de secagem aplicado em lamas de ETAR no Senegal*

*(Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/Drying-beds-at-Niayes-faecal-sludge-treatment-plant-Dakar-Senegal-photo-Linda\\_fig1\\_269037413](https://www.researchgate.net/figure/Drying-beds-at-Niayes-faecal-sludge-treatment-plant-Dakar-Senegal-photo-Linda_fig1_269037413)).*

Os leitos de secagem podem atingir percentagens de desidratação muito elevada, obtendo cerca de 90% de matéria sólida nas lamas desidratadas, no entanto, a sua eficiência é diretamente proporcional ao tempo de operação. Isto é, quanto maior for o tempo que as lamas ficam no leito maior é a percentagem de massa seca das lamas. Para atingir valores muito elevados de desidratação são necessários tempos considerados impraticáveis (Shammas & Wang, 2007).

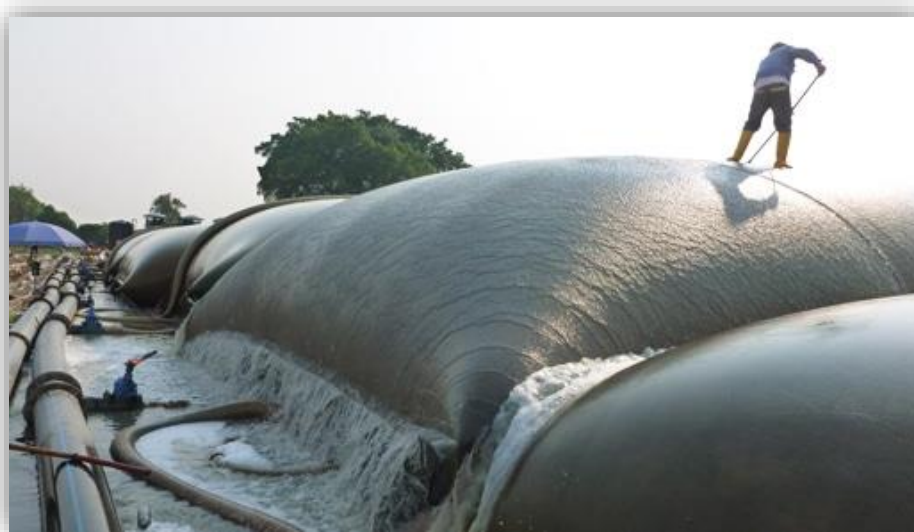
Também em Portugal se verifica a aplicação desta técnica de desidratação de lamas em algumas ETAR no país, como é o caso da ETAR de Torrão, visível na figura 19.



*Figura 19 - Leito de secagem de lamas aplicado numa ETAR em Torrão (Águas do Vale do Tejo, 2020)*

### **2.3.4 Outros processos de desidratação**

Os processos descritos de desidratação de lamas são fundamentais para a devida valorização deste subproduto, mas exigem um gasto energético elevado, à exceção dos leitos de secagem, e operações de manutenção regulares. Novos processos têm surgido para minimizar estes inconvenientes, dos quais se destaca, pelos bons resultados obtidos e aplicação prática já bastante reconhecida, a Tecnologia Tencate Geotube® (figura 20).



*Figura 20 – Unidade Geotube® de desidratação de lamas em funcionamento (Tencate Geotube®, 2021).*

Esta tecnologia, descrita detalhadamente no capítulo 3, é o objeto de estudo desta dissertação onde, como se referiu no capítulo 1, se pretende estudar a sua eficiência no processo de desidratação de lamas e comparar com as tecnologias atualmente mais utilizadas.

## 2.4 Armazenamento de lamas desidratadas

Depois de submetidas ao processo de desidratação as lamas de ETAR podem ser armazenadas consoante o seu teor em sólidos. Para as lamas com maior composição de sólidos, com quantidades acima dos 60%, podem ser utilizadas técnicas habitualmente utilizadas para materiais sólidos. Por outro lado, no caso das lamas com uma composição de sólidos entre 15 e 60%, existem várias técnicas de armazenamento das quais se destacam: lagoas de lamas desidratadas, estruturas confinadas, medas ou pilhas assentes sobre pavimentos impermeáveis de modo a evitar a possível poluição das águas subterrâneas (Tavares, 2007).

De acordo com Sousa (2005), as lagoas de lamas desidratadas são o processo mais comum de armazenamento, apesar de poderem representar um problema no que toca à formação de odores indesejados no local. Relativamente ao armazenamento em pilhas ou medas, Sousa (2005) afirma que são a abordagem mais utilizada quando se pretende armazenar as lamas por um longo período de tempo, sendo aconselhável a sua cobertura ou fazer o armazenamento em espaços abertos. Atualmente, é comum a utilização de silos para armazenar as lamas desidratadas, como o que se encontra na ETAR observável na figura 21.



*Figura 21 – Silo para armazenamento de lamas desidratadas por centrifugação em ETAR.*

## 2.5 Destino final das lamas desidratadas

Até há pouco tempo, o principal destino das lamas desidratadas era a deposição em aterro pois não se reconhecia o potencial de valorização que as mesmas podem apresentar. Felizmente, existem hoje opções de valorização de lamas desidratadas que permitem tornar o tratamento de águas residuais numa operação ainda mais sustentável.

Uma das opções de valorização atuais é a utilização de lamas desidratadas para fornecer alguns dos nutrientes necessários para o crescimento das plantações.

O Decreto-Lei nº276/2009 de 2 de outubro, estabelece o regime de utilização de lamas de depuração em solos agrícolas, procurando promover uma correta utilização deste subproduto. Esse decreto, para além de estabelecer limites para metais pesados, contaminantes orgânicos e microrganismos patogénicos, também define um conjunto de regras aplicadas aos produtores de lamas, nomeadamente quanto às quantidades e ao modo como as lamas são armazenadas.

Na ETAR de Parada, localizada no município da Maia, existe uma central de compostagem das lamas que lá são produzidas, assim como outras lamas provenientes de outras ETAR. É produzido um fertilizante fazendo compostagem das lamas com casca de pinheiro moída ou serrim (SMAS Maia, 2020).

Existe também a Ambitrevo, uma empresa portuguesa que atua na área de gestão de resíduos orgânicos que, através do processo de compostagem, permite obter o composto Nutrifolium. Este composto trata-se de um corretivo agrícola orgânico constituído por matéria orgânica e macro e micronutrientes que permitem ao Nutrifolium ser um excelente corretivo agrícola e fertilizante (Ambitrevo, 2020).

Existem casos onde é possível encontrar uma razão ideal entre lamas e solo para a obtenção de uma elevada fertilidade, como acontece no Oeste da Sibéria. Neste caso, a enorme quantidade de lamas formadas no tratamento de efluentes industriais das maiores cidades da Rússia representava um grande problema. Maksimova, et al. (2015) conduziram estudos que permitiram fixar o rácio lamas solo para obter uma boa fertilidade. Na figura 22 pode observar-se um campo agrícola com lamas na Sibéria, onde as lamas são utilizadas para este propósito.



*Figura 22 – Utilização de lamas em campos agrícolas na Sibéria (Maksimova, et al., 2015).*

Outra das opções de valorização que vale a pena sublinhar é a utilização de lamas desidratadas para a produção de cimento ou de tijolos. Limani, et al. (2019) fizeram um estudo usando uma mistura de lamas e argila para a produção de tijolos. Com este estudo os autores concluíram que não só a utilização de lamas na constituição de tijolos permitia uma menor utilização de argila, como também conseguia manter, na quantidade ideal, as mesmas características físicas e químicas de um tijolo sem lamas.

No caso da produção de cimento, em 2019 Rabie, et al. realizaram um estudo usando lamas secas e húmidas na produção de cimento, concluindo que esta seria uma opção válida para a deposição deste subproduto, quando utilizado em quantidades específicas e dependendo do uso final do cimento.

Em Portugal, existem também exemplos da valorização de lamas na indústria cimenteira, como acontece no caso da CIMPOR. A empresa inclui lamas no complexo processo de formação do clínquer, o principal componente do cimento, representando assim uma mais valia neste processo do ponto de vista da sustentabilidade. A empresa já utiliza lamas de ETAR como combustível, sendo que em 2020 afirmou querer atingir uma percentagem de 90% no futuro próximo (Jornal de negócios, 2020).

No caso específico da tecnologia da Tencate Geotube®, após as lamas terem sido desidratadas o próprio Geotube®, contendo a matéria sólida, pode ser utilizado como barragem ou dique, como é visível na figura 23, realçando a sustentabilidade desta tecnologia. Para além disso, pode também ser utilizada como enchimento de solo para terraplanagens, como se pode observar na figura 24. A lama desidratada pode também ser depositada em aterro ou reaproveitada.



Figura 23 – Utilização de unidades Geotube® contendo lamas desidratadas como barragem. (Tencate Geotube®, 2021)



Figura 24 – Utilização de unidades Geotube® contendo lamas desidratadas para terraplanagem. (Tencate Geotube® Case Studies, 2021)

## 3. Tecnologia de desidratação de lamas TenCate Geotube®

### 3.1 Características técnicas da tecnologia TenCate Geotube®

Na tecnologia Tencate Geotube®, o principal componente que distingue esta tecnologia das demais, são as características únicas da sua estrutura. Estas especificidades permitem reter a matéria sólida dentro da unidade e libertar grande parte da água presente, podendo atingir valores de redução do volume de cerca de 90% (Tencate Geotube®,2021).

Dado que o Geotube® vai estar sujeito a constantes pressões por parte das lamas que vão sendo bombeadas para o seu interior, a sua estrutura tecido (teia + trama) garante que o tamanho dos poros se mantenha o mesmo à medida que o processo de enchimento decorre. Como se pode verificar na figura 25, a estrutura é composta por multifilamentos numa direção e monofilamento na outra, de modo a evitar que os poros alterem o seu diâmetro e, deste modo, manter a elevada capacidade de drenagem ao longo do processo de desidratação.

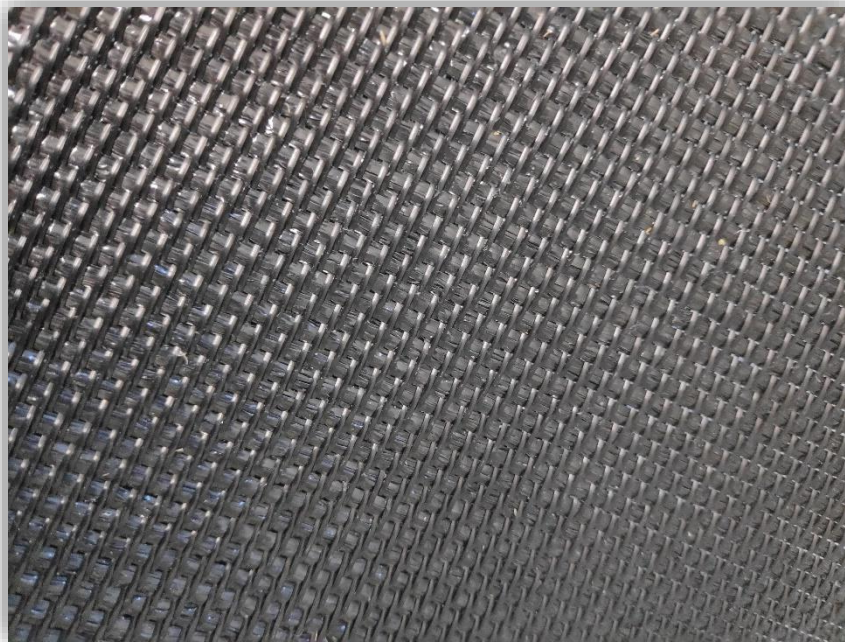


Figura 25 – Membrana de uma estrutura Geotube®.

Inicialmente, as costuras da unidade Geotube® eram feitas longitudinalmente, no entanto, passaram a ser circunferenciais de modo a ter maior segurança durante o processo de enchimento e atingir alturas maiores, que conseqüentemente se traduz num incremento do volume de armazenamento. Na figura 26 pode observar-se uma unidade Geotube® contendo lamas já desidratadas e devidamente consolidadas, sendo que a costura da estrutura se encontra no meio da mesma de modo circunferencial.



Figura 26 – Unidade Geotube® com costuras circunferenciais na estrutura.

A capacidade da unidade Geotube® é delimitada pela sua altura máxima de enchimento, sendo que esta deve ser sempre respeitada para garantir o bom funcionamento do sistema. Este dado encontra-se gravado na estrutura da unidade Geotube® bem visível para os operadores que manuseiam o sistema, como se pode observar na figura 27.



Figura 27 – Altura máxima de enchimento gravada na superfície da unidade Geotube®.

Existe uma vasta gama de capacidades de unidades Geotube® que permitem a aplicação da tecnologia Tencate Geotube® em várias situações, consoante as necessidades do utilizador. Disponíveis entre os 9,8 m<sup>3</sup> e os 1.500 m<sup>3</sup> de capacidade de armazenamento de lamas desidratadas, as unidades Geotube garantem solução para grandes obras de remediação

ambiental, para lagoas de tratamento de efluente como acontece numa ETAR em S.Jacinto e também para pequenas estruturas de tratamento de águas residuais. Para menores quantidades de lamas, podem ser utilizadas pequenas estruturas Geotube® que são colocadas em contentores, que facilitam o controlo das águas filtradas e o transporte para o destino final. Estas estruturas são consideradas o sistema MDS (Mobile Dewatering Systems) e na figura 28 pode observar-se um exemplo das mesmas em aplicação.



Figura 28 – Mobile Dewatering System da Tencate Geotube® (Brochura Tencate Geotube®, 2021).

Comparada com as técnicas mecânicas de desidratação, esta trata-se de uma tecnologia com baixos consumos de energia, pois o processo de desidratação ocorre de forma natural, sendo que o consumo de energia elétrica no processo resume-se aquela que é gasta no bombeamento das lamas para o Geotube® e do polímero floculante.

Para além disso, a tecnologia Tencate Geotube® pode ser aplicada em locais onde são usados processos de leitos de secagem. Nesses casos a eficiência do processo aumenta com o passar do tempo, sendo necessários tempos demasiado elevados para obter bons resultados. Logo, o Geotube® representa uma boa alternativa a esta técnica de desidratação natural, podendo reaproveitar o espaço utilizado dos leitos de secagem para colocar as unidades de desidratação. Na figura 29 pode observar-se um exemplo de aplicação do sistema Geotube® em leitos de secagem.



Figura 29 - Aplicação de unidades Geotube® em leitos de secagem (Tencate Geotube®, 2021)

No empacotamento das unidades Geotube® para posterior envio ao local de aplicação estão especificadas características como capacidade, número de portas de enchimento, comprimento e largura para que as unidades estejam devidamente identificadas. Na figura 30 encontra-se um exemplo de uma etiqueta no empacotamento de uma unidade Geotube®.



Figura 30 - Exemplo de etiqueta do empacotamento de uma unidade Geotube® (Tencate Geotube®, 2021)

## 3.2 Boas práticas e instalação do sistema TenCate Geotube®

A escolha do local de colocação da unidade Geotube® deve ser feita com alguma cautela, com dimensões adequadas, e assegurando o nivelamento do terreno para evitar movimentos inesperados da unidade Geotube® durante o processo.

A plataforma onde a unidade Geotube® será instalada deve ser o mais lisa possível, sem a existência de protuberâncias rugosas sendo que o gradiente da superfície irá contribuir para a drenagem dos efluentes. Para controlo das águas filtradas, deve ser construída uma pequena berma para contenção de toda a área de drenagem, cuja altura deve ser pelo menos 1/3 da altura de enchimento da unidade Geotube®. A localização das portas de enchimento, assim como o número, devem ser estudados e acordados na fase de dimensionamento das unidades Geotube®. Estes irão depender de alguns fatores como as características dos sedimentos. Deve existir uma estrutura que permita selecionar para que unidade, ou unidades Geotube® as lamas são enviadas, sendo que esses pontos de definição devem estar facilmente acessíveis. (Documento confidencial da Geosin, 2021).

Depois de recebido no local da sua instalação, a unidade Geotube® é estendida e procede-se da tubagem de ligação da bomba de lamas à unidade Geotube® através da manga de enchimento.

Aquando da junção da bomba de lamas, é necessário garantir que todo o sistema está bem montado e preparado para o início do processo. Antes de ser iniciado o enchimento, a unidade Geotube® deve estar ancorada para evitar que se mova por ação do vento. Para além disso, a junção entre a entrada da bombagem e a tubagem que vai transportar as lamas a tratar deve estar devidamente atada de modo que não haja lamas que não sejam bombeadas para o interior do Geotube®. Para tal, a porta de enchimento possui uma manga de enchimento que permite atar a tubagem e evitar que haja qualquer derrame de lamas.

Na figura 31 encontra-se um esquema de todo o sistema de desidratação desde a saída das lammas dos tratamentos primário e secundário até à sua entrada nas unidades Geotube®.



Figura 31 – Instalação de uma unidade Geotube® (Adaptado de Tencate Geotube®, 2021).

Observando o esquema da figura 31 verifica-se a existência de um medidor de caudal de lammas bombeadas de modo a controlar o enchimento das unidades Geotube®. O floculante é preparado e adicionado às lammas através de uma bomba que ajusta a dosagem ao valor pretendido. Após injeção do floculante, verifica-se um conjunto de joelhos na tubagem que servem para promover a mistura do polímero com as lammas. Imediatamente antes da entrada no Geotube®, existe um ponto de amostragem para verificar se a floculação está a ocorrer de forma adequada, ou se é necessário ajustar a dosagem. Em alguns casos, pode existir uma estrutura que permite retirar a água em excesso na plataforma de drenagem para evitar transbordos.

É importante mencionar que não existe qualquer restrição no que toca aos valores do caudal de lammas a tratar, ou seja, tanto pode ser um valor muito reduzido como pode ser um caudal mais elevado, consoante a necessidade do utilizador. Por outro lado, a dosagem do polímero deve ser feita consoante os resultados de testes prévios realizados com a lama de modo a determinar a dosagem ótima do floculante. Em ambas as bombas é necessário haver uma monitorização gradual, principalmente no final do processo para assegurar que estão bem fechadas, de modo a evitar que a altura máxima de enchimento seja ultrapassada e conseqüentemente haja acidentes como o rompimento do Geotube®.

### 3.3 Floculação durante a utilização do sistema Geotube®

A floculação representa uma etapa importante num sistema de desidratação utilizando a tecnologia Tencate Geotube®. A dosagem de floculante deve ser feita de forma adequada, pois caso tal não aconteça, ocorre a formação de flocos de pequenas dimensões que dificultam o processo.

Caso o floculante seja aplicado em sub dosagem, ou em sobre dosagem, a qualidade dos flocos será sempre inferior aquela que seria apresentada quando aplicada a dosagem ideal às lamas. A forma abrupta como a qualidade dos flocos formados oscila mediante a quantidade de floculante aplicado demonstra a importância da etapa de adição de floculante às lamas a desidratar.

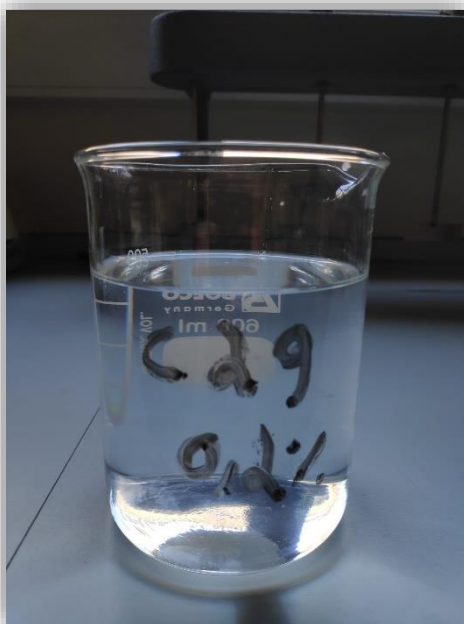
A aplicação de uma quantidade inadequada de floculante às lamas a tratar está na origem de vários problemas na unidade Geotube® como a colmatação da estrutura, drenagem de partículas sólidas ou acumulação de água no interior da unidade. Para verificar se a floculação está a ocorrer da forma desejada, deve existir um ponto de amostragem no sistema de bombagem em que pode ser recolhida uma amostra de lamas.

Os floculantes utilizados podem ser divididos em dois grupos consoante a carga, ou seja, floculantes catiónicos e floculantes aniónicos. Normalmente, para o tratamento de águas residuais os floculantes mais eficazes são os catiónicos devido à elevada carga orgânica dos efluentes e ao facto de numa suspensão aquosa a superfície das partículas sólidas estar carregada negativamente.

Existem, também, variações relativamente à preparação do floculante consoante o estado físico do mesmo. Isto é, existem floculantes em pó que são posteriormente dissolvidos em água para a preparação da solução à concentração pretendida. Na figura 32 pode verificar-se um exemplo de um floculante em pó antes da preparação da solução. Para verificar que a solução se encontra pronta a ser utilizada, esta deve apresentar um aspeto homogéneo, sem nenhum tipo de grumos brancos em suspensão como é o caso da solução apresentada na figura 33.



Figura 32 – Floculante catiónico em pó.



*Figura 33 – Solução de floculante em pó dissolvido em água.*

Neste trabalho também foram testados dois floculantes em emulsão. Um deles é de base oleosa (figura 34) enquanto o outro é de base aquosa. Este tipo de floculantes, teoricamente, são de preparação mais rápida do que os floculantes em pó sendo que esta suposição será discutida no capítulo 5.



*Figura 34 – Floculante catiónico em emulsão de base oleosa.*

### 3.4 Aplicações tipo do sistema TenCate Geotube®

O sistema Tencate Geotube® começou a ser aplicado na década de 1950 em engenharia hidráulica. Os Geotube® eram utilizados como contentores de areia para evitar fenómenos de erosão ou manter linhas de costa. Atualmente, verifica-se a aplicação desta tecnologia em alguns locais na costa portuguesa, como por exemplo acontece na praia da figura 35.



Figura 35 – Exemplo da utilização de unidades Geotube® no combate à erosão costeira.

Foi só a partir da década de 1990 que a tecnologia passou a ser usada para desidratação de resíduos de lamas, sendo assim uma técnica de desidratação relativamente recente. Mais tarde, ainda no século XX, aplicou-se pela primeira vez o sistema Tencate Geotube® para a desidratação de sedimentos contaminados *in shore* e *offshore* (Tencate Geotube® Case Studies, 2021).

Trata-se de uma técnica com alguma aplicação já um pouco por todo o mundo, verificando-se aplicações da mesma, por exemplo, na remediação de rios nos Estados Unidos na América e na Malásia, representados pelas figuras 36 e 37, respetivamente.



Figura 36 – Aplicação da tecnologia Tencate Geotube® na remediação de um rio na Malásia (Tencate Geotube® Case Studies, 2021).



*Figura 37 – Aplicação da tecnologia Tencate Geotube® na remediação de um rio nos Estados Unidos da América (Tencate Geotube® Case Studies, 2021).*

No caso da figura 36, na Malásia a tecnologia Tencate Geotube® foi aplicada no rio Mekala. Devido à industrialização e ao desenvolvimento económico verificou-se um aumento das descargas de esgoto bruto e de outros resíduos neste curso de água, contribuindo para uma turvação considerável e outros tipos de problemas ambientais. Após aplicação da tecnologia Tencate Geotube®, foram detetadas, no filtrado resultante do processo, quantidades de nutrientes e de sólidos suspensos totais muito inferiores aos sedimentos contaminados antes do tratamento, demonstrando assim a elevada capacidade de remediação ambiental desta tecnologia (Tencate Geotube® Case Studies, 2021).

No caso do rio Ashtabula, nos Estados Unidos da América, evidenciado na figura 37, este foi contaminado de forma descontrolada entre as décadas de 1940 e 1970 devido à elevada industrialização no local, resultando na contaminação dos sedimentos do rio. Os principais poluentes eram metais pesados, assim como alguns compostos orgânicos clorados. Devido a elevada contaminação do rio, a dragagem de sedimentos contaminados não era feita de forma regular devido à incapacidade de fazer a sua deposição de forma segura. Após aplicação de tecnologia Tencate Geotube®, para além de ter melhorado a qualidade da água do rio, também aumentou a sua profundidade, permitindo assim a navegação no mesmo para fins comerciais (Tencate Geotube® Case Studies, 2021).

### **3.5 Eficiência deste sistema**

A eficiência do sistema Tencate Geotube® irá ser avaliada em dois aspetos distintos: energética e processual. Para efeitos de comparação com outras técnicas de desidratação, foram excluídos fatores como o transporte das lamas e o seu destino final.

#### **3.5.1 Eficiência energética**

A eficiência energética avalia a viabilidade do processo tendo em conta a quantidade de energia gasta na desidratação das lamas.

No caso da tecnologia Tencate Geotube®, o único gasto energético está associado à utilização da bomba das lamas e da bomba de polímero floculante. O resto do processo não envolve qualquer gasto energético pois consiste apenas na filtração natural das lamas através do material que constitui a unidade Geotube®. A bomba de polímero deve ter um valor estabelecido consoante a dosagem ideal de floculante, enquanto o caudal bombeado de lamas pode ser variável consoante a velocidade de enchimento do Geotube® pretendida. Todavia, caso haja alguma alteração de caudal de lamas, deve haver um reajuste do caudal da bomba de polímero, preservando assim a relação entre ambos.

Relativamente às centrífugas e aos filtros de banda ou de prensa, dado que se tratam de processos que utilizam equipamentos mecânicos, para além dos gastos associados às bombas de lamas e de polímero existe também a energia consumida pela centrifugadora ou na compressão das lamas nos filtros de banda ou de prensa.

Para efeitos comparativos, será apenas tido em conta o processo de desidratação em si, excluindo fatores como as bombas de lama ou de polímero. Na tabela XX encontram-se os valores dos consumos energéticos para as tecnologias mecânicas, sendo que os consumos energéticos nos leitos de secagem e na tecnologia Tencate Geotube® podem considerar-se nulos.

*Tabela 1 - Consumos energéticos das tecnologias com processos mecânicos de desidratação de lamas (Andersen, 2001).*

<b>Tecnologia</b>	<b>Consumo energético (kWh/tonelada de matéria seca)</b>
<b>Centrifugação</b>	25 – 80
<b>Filtros de prensa</b>	30 – 40
<b>Filtros de banda</b>	35

### 3.5.2 Eficiência processual

A eficiência processual está principalmente relacionada com vários parâmetros que caracterizam um efluente e com a redução da humidade presente nas lamas a ser tratadas. Dado que a tecnologia Tencate Geotube® se foca na retenção de sólidos, os parâmetros a comparar face às outras técnicas são os sólidos totais e sólidos suspensos totais. Também serão analisados o pH, CQO e CBO dos filtrados obtidos. Serão feitas análises à redução da humidade das lamas após o tratamento e do volume ocupado, comparando as lamas desidratadas com o volume que ocupavam antes do tratamento.

A velocidade de desidratação também poderia ser um fator de comparação entre técnicas, sendo que a tecnologia Tencate Geotube® apresenta uma clara vantagem face às outras técnicas neste aspeto. Apesar da desidratação se dar de forma imediata numa unidade Geotube®, o período de consolidação onde as lamas se encontram no interior da estrutura, permite incrementar significativamente a sicidade das lamas desidratadas. Isto só é possível devido à capacidade dos sistemas Geotube® em armazenar as lamas no interior das unidades de desidratação.

## 4. Casos de estudo

### 4.1 Objetivos

Para a realização dos ensaios laboratoriais com a utilização da tecnologia Tencate Geotube®, foram recolhidas amostras de lamas húmidas de três ETAR diferentes, com efluentes e instalações diferentes. Deste modo, é possível comprovar a eficiência desta tecnologia em diferentes efluentes, assim como a sua versatilidade.

### 4.2 Caraterização dos casos de estudo

#### 4.2.1 ETAR em S. Jacinto

A primeira recolha de lamas foi feita numa ETAR em S. Jacinto que funciona por lagunagem, como está evidenciado na figura 38. Trata-se de uma lagoa de arejamento com 4 arejadores, como o da figura 39, sendo que apenas 2 deles se encontravam em funcionamento no momento da recolha.



Figura 38 – Lagoa de arejamento na ETAR em S. Jacinto.



Figura 39 – Arejador em funcionamento na ETAR em S. Jacinto.

Existem também algumas lagoas de maturação nesta ETAR como se pode comprovar na figura 40.



*Figura 40 – Lagoa de maturação na ETAR em S. Jacinto.*

Em 2019 foi aplicada a tecnologia de desidratação Tencate Geotube® na ETAR de S. Jacinto. Passados 2 anos, verifica-se que as lamas retidas no Geotube® consolidaram, formado uma estrutura dura. A possibilidade de a unidade Geotube® permanecer no local durante longos períodos de tempo é benéfico para o processo de desidratação, permitindo obter uma lama mais seca. Na figura 41 podem observar-se as unidades Geotube® que se encontram nesta ETAR, contendo uma lama extremamente seca e consolidada.



*Figura 41 – Unidades Geotube® instaladas na ETAR em S. Jacinto com lama consolidada no seu interior.*

#### 4.2.2 ETAR na Figueira da Foz

A segunda recolha realizou-se numa ETAR na Figueira da Foz, observável na figura 42, que utiliza a tecnologia Tencate Geotube® como processo de desidratação de lamas, sendo por isso possível observar o funcionamento desta técnica numa escala industrial.



Figura 42 – ETAR urbana na Figueira da Foz.

Trata-se de uma ETAR urbana, que recebe efluentes provenientes de indústrias de conservas, com elevada concentração de óleos e gorduras. As lamas recolhidas nesta ETAR eram provenientes do tratamento biológico por lamas ativadas, ou seja, tratam-se de lamas secundárias. Para além disso, antes da etapa de desidratação, as lamas são espessadas graviticamente.

A preparação do floculante é feita de forma automática utilizando o equipamento da figura 43. O floculante utilizado é catiónico e é em pó, apresentando características similares ao Geofloc C29 utilizado nos ensaios laboratoriais. Este é adicionado no recipiente de cor preta, à esquerda na figura, e o sistema vai retirando a quantidade necessária consoante a concentração definida (neste caso 1,0 g/L). Neste equipamento existe uma camara de maturação que é utilizada para o armazenamento da solução já preparada e onde a bomba de injeção recolhe o polímero floculante.



Figura 43 – Equipamento utilizado para preparação e dosagem de floculante da ETAR na Figueira da Foz.

A injeção do floculante é feita em linha com a bombagem das lamas. A mistura faz-se com o floculante a entrar em forma de Y na tubagem das lamas, como se pode ver na figura 44. A tubagem azul é aquela que encaminha o polímero floculante. Logo após a entrada do floculante, o circuito que as lamas percorrem é composto por vários joelhos na tubagem, como é observável na figura 45.



Figura 44 – Instalação da ETAR com bomba de lamas e entrada de polímero floculante pelo tubo azul.



*Figura 45 – Circuito da tubagem das lamas antes do encaminhamento para a unidade Geotube®.*

As curvas e joelhos verificados na tubagem servem para que o floculante seja mais facilmente misturado com as lamas. Normalmente, são utilizados misturadores estáticos para este propósito, mas esta configuração trata-se de uma alternativa mais económica que cumpre o mesmo propósito que um misturador estático.

A desidratação das lamas é feita usando a tecnologia Tencate Geotube®. A unidade Geotube® encontra-se sobre uma plataforma previamente construída dedicada à aplicação daquele tipo de unidades de desidratação Geotube®. Na figura 46 é possível verificar a escorrência de um fio de água numa das pontas, sendo que a água é encaminhada para tratamento da fase líquida.



*Figura 46 – Unidade Geotube® em funcionamento da ETAR na Figueira da Foz sobre uma plataforma construída para a estrutura.*

### 4.2.3 ETAR de Famalicão

A terceira e última instalação onde foi realizada a campanha de amostragem foi uma ETAR em Famalicão, visível na figura 47, onde para além da tecnologia da Tencate Geotube®, é utilizada como técnica de desidratação de lamas uma centrifugadora, observável na figura 48.



Figura 47 – ETAR urbana em Famalicão.



Figura 48 – Centrifugadora de lamas na ETAR em Famalicão.

Após centrifugação das lamas, estas são armazenadas em silos. No entanto, em algumas ocasiões a quantidade de lamas para desidratar era tão elevada que a ETAR teve necessidade de utilizar o Geotube® por incapacidade de resposta do sistema mecânico implementado.

### 4.3 Recolha de amostras

Na ETAR de S. Jacinto, as amostras de lamas foram recolhidas na lagoa de arejamento. Para obter uma maior quantidade de lamas a recolha foi feita na maior profundidade possível. Como se poder ver na figura 49, a quantidade de lamas presentes nas margens da lagoa à superfície é muito baixa porque a deposição dá-se no fundo da lagoa, para além do facto de que a mesma ter sido intervencionada há pouco tempo.



*Figura 49 – Margem da lagoa de arejamento da ETAR em S. Jacinto onde foram recolhidas as lamas.*

Na ETAR da Figueira da Foz, foram realizadas duas recolhas. A primeira de lamas antes de serem injetadas com floculante através da tubagem verde que se encontra no fim do circuito das lamas bombeadas, como se pode verificar na figura 50.



*Figura 50 – Ponto de amostragem da ETAR na Figueira da Foz onde foram recolhidas as lamas.*

Posteriormente, foi também recolhida uma amostra do filtrado da unidade Geotube® em funcionamento nesta ETAR, como evidenciado na figura 51. Esta recolha serve para verificar a eficiência desta técnica numa escala industrial e comparar posteriormente com os resultados obtidos em laboratório assim como com as outras técnicas de desidratação mencionadas no capítulo 2.3.



*Figura 51 – Recolha de filtrado da unidade Geotube® na Figueira da Foz.*

Em Famalicão, como nas ETAR mencionadas anteriormente, foram recolhidas lamas por desidratar no ponto de amostragem evidenciado na figura 52. Estas lamas provinham da bomba que faz a sua recirculação após a recolha do fundo do decantador secundário, e não sofreram qualquer tipo de espessamento. Foram também recolhidas amostras do centrifugado no ponto de amostragem, marcado a vermelho na figura 53, e das lamas desidratadas após centrifugação.



Figura 52 – Local de recolha de lamas da ETAR em Famalicão.



Figura 53 – Ponto de amostragem onde foi retirado o centrifugado da ETAR em Famalicão.

## 4.4 Análises laboratoriais

O trabalho laboratorial teve como objetivos concluir sobre qual dos flocculantes seria mais adequado para cada um dos efluentes, assim como comprovar a eficiência da tecnologia

Tencate Geotube® na desidratação de lamas. Consistiu na determinação dos seguintes parâmetros:

- tempo de preparação do floculante;
- humidade das lamas antes e após desidratação;
- pH, CQO, CBO, ST e SST no filtrado resultante do tratamento e nos filtrados recolhidos.

Para além dos elementos referidos, foram também realizados dois testes distintos, normalmente utilizados para determinar a eficiência das unidades Geotube® na desidratação de lamas: Cone test e GDT test.

#### 4.4.1 Preparação do floculante

Foram utilizados cinco floculantes diferentes, cujas características se encontram na tabela 2.

*Tabela 2 – Propriedades dos floculantes utilizados e respetivas concentrações arbitradas.*

Nome	Tipo de floculante	Concentração arbitrada (g/L)
<b>Geofloc C29</b>	Catiónico em pó	
<b>Geofloc RG11</b>	Catiónico em pó	2
<b>Geofloc A25</b>	Aniónico em pó	
<b>Geofloc GT08</b>	Emulsão catiónica de base água	10
<b>Geofloc EC</b>	Emulsão catiónica de base óleo	3

Arbitrou-se um valor de concentração a usar para cada um dos floculantes, de acordo com os dados na tabela 2. A preparação foi feita em gobelés de 500 mL com água destilada.

No caso dos floculantes em pó, como demonstra a figura 54, a pesagem foi feita numa balança analítica.



*Figura 54 – Pesagem de um floculante em pó numa balança analítica.*

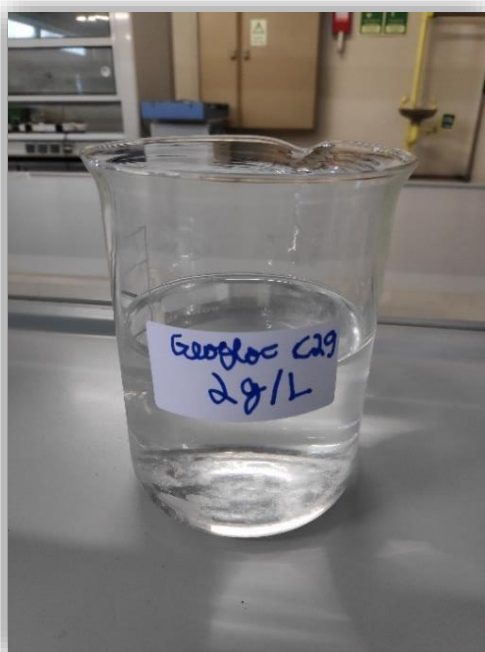
Considerou-se que os flocculantes em emulsão tinham uma densidade de  $1 \text{ g/cm}^3$  e mediu-se o volume com uma seringa, como é observável na figura 55.



*Figura 55 – Medição do volume de um flocculante em emulsão.*

A preparação dos flocculantes foi feita usando os agitadores mecânicos do Jar test até se obterem soluções homogêneas para todos os flocculantes.

Nas figuras 56 e 57 encontram-se dois casos de flocculantes preparados sendo que apenas o flocculante aniônico se encontra devidamente homogêneo pois no caso do Geofloc C29 observaram-se ainda alguns grumos no fundo do gobelé.



*Figura 56 – Flocculante Geofloc C29 com grumos depositados.*

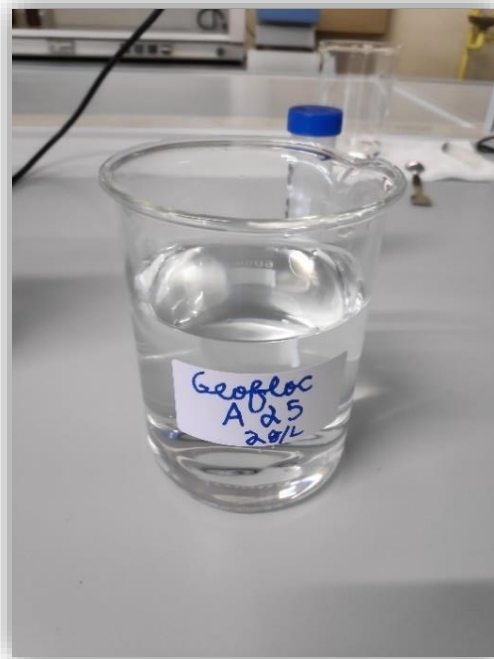


Figura 57 – Floculante Geofloc A25 devidamente preparado e homogêneo.

Posteriormente, prepararam-se duas soluções de ambos os floculantes em emulsão, seguindo o mesmo procedimento e com a mesma concentração dos floculantes em pó, ou seja, 2 g/L. Isto para que pudesse ser feita uma comparação entre o tempo de preparação de cada floculante, dado que quanto maior for a concentração de floculante maior a viscosidade da solução e, conseqüentemente, maior será o tempo de preparação. Nos ensaios de desidratação das lamas foram utilizadas as concentrações mencionadas na tabela 2.

#### 4.4.2 Análise de humidade

A determinação da humidade das lamas foi feita por pesagem antes e depois da secagem a 105°C. Este ensaio foi realizado às lamas recolhidas para determinar a sua humidade, assim como às lamas retidas nas unidades Geotube®, imediatamente após o Cone Test e GDT Test, e na amostra de lamas desidratadas por centrifugação na ETAR em Famalicão.

#### 4.4.3 Análise dos parâmetros dos filtrados

Os filtrados foram analisados seguindo os métodos descritos no livro 'Standard Methods for the Examination of Water and wastewater' (2017). A determinação da CQO no centrifugado e nos filtrados dos Cone test às lamas de Famalicão foi feita em gama baixa de concentrações (0 – 90 mg O<sub>2</sub>/L), enquanto que nas restantes análises foi sempre utilizada a gama alta (100 – 900 mg O<sub>2</sub>/L).

Na determinação dos sólidos suspensos totais, foram utilizados papeis de filtro da marca Reeve Angel® de gama 403.

## 4.5 Testes com a tecnologia Geotube®

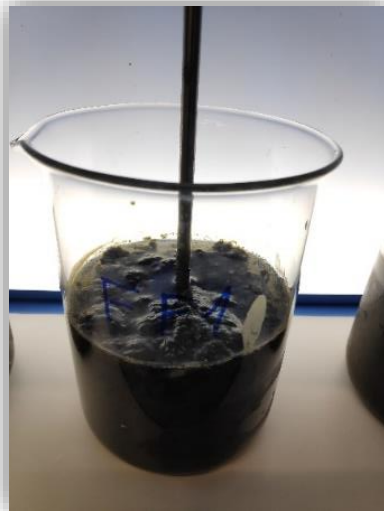
Para comprovar a eficiência da tecnologia de Tencate Geotube® na desidratação de lamas estão disponíveis vários testes. Neste trabalho usou-se o Cone test e o GDT Test, dado que eram disponibilizados pela empresa e os mais exequíveis num contexto laboratorial.

### 4.5.1 Cone Test

Para determinar a eficiência da tecnologia Tencate Geotube® na desidratação de lamas, existe um conjunto de testes sendo que, neste caso, o teste realizado chama-se Cone test.

Para fazer o Cone test, começou por se colocar uma amostra de lamas num gobelé de 500 mL. A amostra foi agitada no Jar-test de modo a permitir obter uma lama homogénea.

Para determinar a dosagem ideal de cada floculante adicionaram-se a cada gobelé sucessivamente 5 mL de floculante até se verificar a formação de flocos com as dimensões pretendidas, mantendo a agitação do Jar-test em 150 rpm, como se pode ver na figura 58. O ensaio foi repetido com volumes menores de solução de floculante e comparados os resultados.



*Figura 58 – Exemplo de uma boa formação de flocos após adição de floculante e agitação em Jar test.*

Determinada a dosagem ideal, após as lamas floculadas estarem sujeitas a uma agitação de 150 rpm durante 3 min, reduziu-se a velocidade de agitação para 30 rpm. Enquanto que a agitação rápida permite ao floculante dispersar-se na suspensão, a etapa de agitação lenta permite que os flocos formados se agreguem entre si. Passados 15 min de agitação lenta, as lamas ficaram em repouso durante 15 min para que os flocos se depositassem no fundo do gobelé, separando-se do sobrenadante.

Verificou-se em alguns ensaios o ‘bulking’ das lamas, ou seja, a flutuação de lama à superfície do sobrenadante devido à presença de bactérias filamentosas. Este fenómeno encontra-se evidenciado na figura 59.

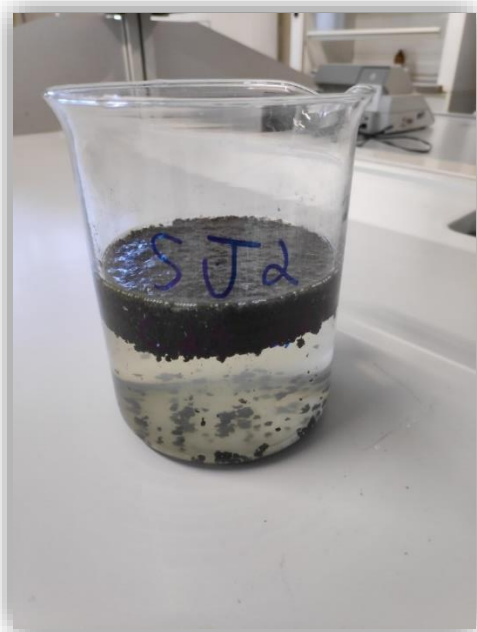


Figura 59 – Fenômeno de 'bulking' nas lamas floculadas da ETAR em S. Jacinto.

Obtida a lama floculada para desidratação, preparou-se um cone com uma membrana circular do mesmo material que as unidades Geotube® utilizadas em ETAR e colocou-se uma mola de modo a manter a estrutura evidenciada na figura 60.



Figura 60 – Esquema de montagem de uma instalação de Cone Test.

As lamas floculadas foram vertidas nas paredes do cone de forma lenta e gradual. Sempre que se verificou a presença de sólidos suspensos no filtrado, como se pode ver na figura 61, interrompeu-se o ensaio e começou-se o processo variando a dosagem de flocculante, até obter um filtrado nítido e sem sólidos suspensos visíveis como o da figura 62.

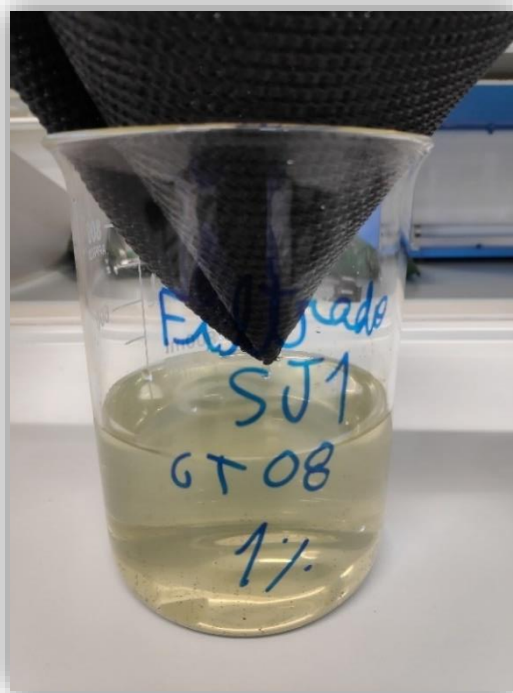


Figura 61 – Exemplo de um mau filtrado durante o Cone Test com sólidos em suspensão.

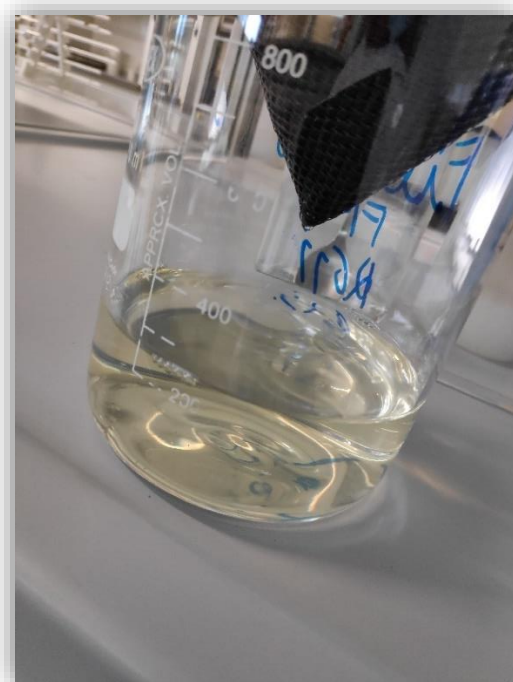


Figura 62 – Exemplo de um bom filtrado durante o Cone test.

Depois de vertida toda a quantidade de lamas e de não se verificar a presença de água em volta das lamas, como evidenciado na figura 63, foi feita pressão no fundo do cone de modo a simular a tensão a que as lamas estão sujeitas no interior do Geotube®.



*Figura 63 – Lamas no interior da membrana Geotube® antes de ser aplicada pressão.*

Deste modo foi possível remover uma maior quantidade de água das lamas e obter uma lama mais consolidada. Neste ponto, mesmo com a pressão exercida na unidade Geotube® não se verificou saída de quaisquer sólidos para o filtrado final. O ensaio foi dado por terminado quando o aumento da pressão não resultou em mais escorrência de água. Retirou-se uma amostra de lamas do interior do Geotube® e analisaram-se os parâmetros previamente definidos no filtrado.

#### **4.5.2 GDT Test**

O GDT test, da mesma forma que o Cone test, permite aferir a eficácia da tecnologia da Tencate Geotube® na desidratação das lamas e conseqüente redução do seu volume. Para este teste, é utilizada uma estrutura constituída por um suporte, um Geobag® e um tubo ligado a esta estrutura como se pode observar na figura 64.



*Figura 64 – Instalação do GDT test.*

As lamas, previamente floculadas, foram despejadas no topo do tubo e foi necessário segurar o mesmo de modo a que as lamas não transbordassem na parte superior do Geobag®.

Para a realização deste teste é necessária uma quantidade muito elevada de lamas. Foram utilizados 90 L de amostra e mesmo assim os resultados não foram totalmente satisfatórios. No final do ensaio, o Geobag® deve ficar em grande parte cheio de lamas para que se obtenham os resultados pretendidos. Este ensaio não foi repetido devido à falta de tempo para a sua realização e à elevada quantidade de lamas necessárias para a sua execução.

A recolha de filtrado neste teste foi realizada nos cantos da unidade de Geotube®. Depois de vertida toda a lama para o Geotube® retirou-se uma amostra para determinação da humidade. Repetiu-se este último passo 3 dias após o fim do ensaio, depois de analisado o interior da unidade Geotube®.

## 5. Apresentação e análise de resultados

No presente capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, sendo que no final é discutida a eficiência do sistema Geotube® e, posteriormente, comparada com as diferentes técnicas de desidratação.

### 5.1 Preparação de floculante

Na preparação do floculante foi necessário cronometrar o tempo de agitação necessário até se obterem soluções totalmente homogêneas. Os tempos de preparação para cada floculante com uma concentração de 2 g/L encontram-se na tabela 3, assim como as velocidades de rotação dos agitadores do Jar Test. Na figura 65 podem observar-se os 5 floculantes devidamente preparados.

Tabela 3 – Tempo de preparação dos vários floculantes em agitação no Jar test.

Floculante	Tempo de agitação a 150 rpm (min)	Tempo de agitação a 200 rpm (min)	Tempo de agitação a 300 rpm (min)	Tempo total de preparação (min)
<b>C29</b>	15	5	5	25
<b>RG11</b>	15	5	-	20
<b>A25</b>	15	5	7	27
<b>GT08</b>	4	-	-	4
<b>EC</b>	6	-	-	6

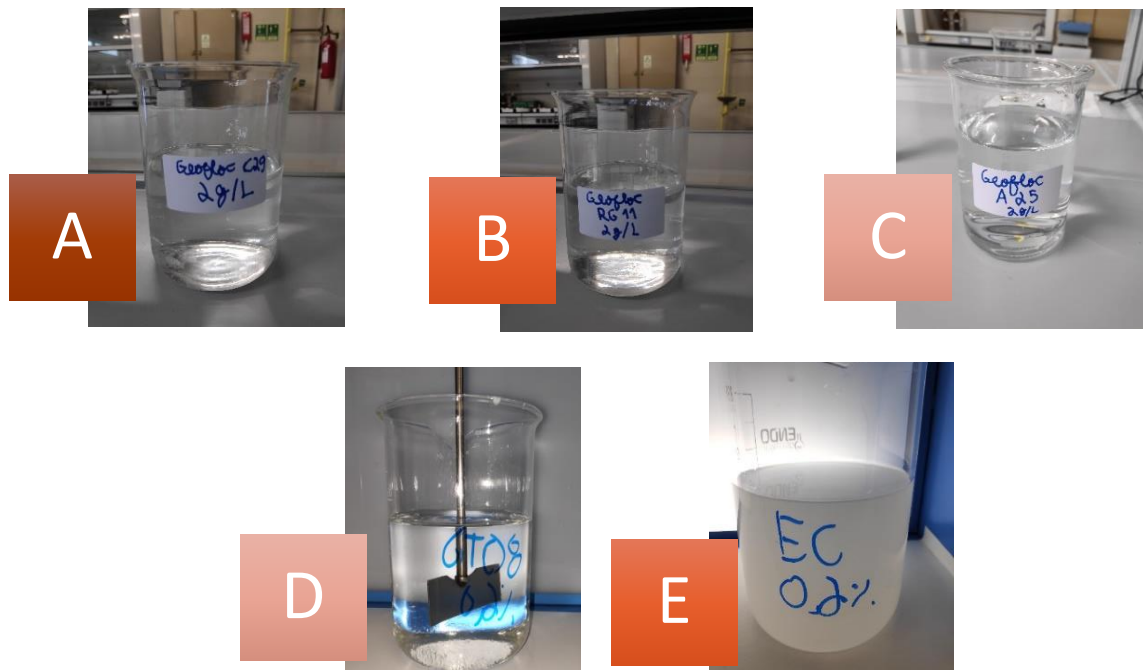


Figura 65 – Soluções de floculante devidamente preparadas: A) Geofloc C29; B) Geofloc RG11; C) Geofloc A25; D) Geofloc GT08; E) Geofloc EC.

Observando a figura 65 pode concluir-se que todas as soluções de floculante atingiram uma homogeneidade aceitável e podem ser consideradas devidamente preparadas.

Analisando a tabela 3, pode concluir-se que existe uma diferença substancial entre o tempo de preparação dos floculantes em pó e os floculantes em emulsão. Enquanto que para os floculantes C29, RG11 e A25 foram necessários cerca de 20 minutos de agitação, o GT08 e o EC ficaram preparados em 4 e 6 min, respetivamente. Posto isto, é possível afirmar que os floculantes em emulsão são preparados mais facilmente do que os floculantes em pó. Tal deve-se ao facto de se tratar de uma mistura líquido-líquido, enquanto no caso dos floculantes em pó estes têm de ser totalmente dissolvidos em água.

## 5.2 Percentagem de matéria seca nas lamias

Os resultados relativos à percentagem de matéria seca presente nas lamias antes de serem desidratadas das 3 ETAR onde foram feitas as recolhas encontram-se na tabela 4.

Tabela 4 – Matéria seca nas amostras de lamias recolhidas em ETAR.

Amostra	Massa de lamias húmidas (g)	Massa seca (g)	Massa seca (%)
SJ1	98,79	1,120	1,133
SJ2	99,41	0,8349	0,8399
SJ3	96,72	0,9115	0,9424
FF1	98,31	2,457	2,499
FF2	97,70	2,432	2,489
FF3	97,64	2,334	2,390
F1	74,83	0,2774	0,3707
F2	73,93	0,3125	0,4227
F3	73,72	0,3314	0,4495

As lamias da ETAR da Figueira da Foz apresentam as maiores percentagens de massa seca, enquanto as amostras de Famalicão apresentam o menor teor de matéria seca. Isto acontece porque na Figueira da Foz as lamias foram recolhidas depois do espessador, enquanto que em Famalicão não houve qualquer tipo de espessamento. Observando as lamias recolhidas na figura 66, verifica-se que estas tinham um aspeto mais aquoso.



Figura 66 – Recolha de lamias na ETAR em Famalicão.

Nas amostras de S. Jacinto, é possível verificar uma ligeira diferença entre as percentagens de matéria seca. Esta discrepância deve-se ao facto de cada amostra ter sido recolhida num local diferente da lagoa, a uma profundidade que permitisse uma recolha aceitável de lamas.

Quanto às lamas desidratadas por centrifugação na ETAR em Famalicão, os resultados obtidos relativos à percentagem de matéria seca encontram-se na tabela 5.

Tabela 5 – Matéria seca nas lamas desidratadas por centrifugação na ETAR em Famalicão.

Amostra	Massa de lamas desidratadas (g)	Massa seca (g)	Massa seca (%)
1	10,16	2,180	21,46
2	16,88	3,280	19,42

Em termos de matéria seca, as lamas desidratadas em centrífuga apresentam percentagens a rondar os 20%. Estes valores serão posteriormente comparados com os resultados da aplicação da tecnologia Tencate Geotube® no Cone Test.

## 5.3 Caracterização do centrifugado e filtrado do Geotube®

O centrifugado foi recolhido na ETAR de Famalicão, enquanto que o filtrado foi obtido através de uma unidade Geotube® em funcionamento na ETAR da Figueira da Foz.

### 5.3.1 Centrifugado

Os resultados das medições dos parâmetros de qualidade no centrifugado de Famalicão encontram-se na tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de qualidade da água medidos no centrifugado da ETAR em Famalicão (Valores médios de dois ensaios  $\pm$  desvio máximo).

pH	7,10
Sólidos Totais (g/L)	1,90 $\pm$ 0,05
Sólidos suspensos totais (mg/L)	100 $\pm$ 6
Carência química de oxigénio (mg O <sub>2</sub> /L)	42 $\pm$ 1
Carência bioquímica de oxigénio (mg O <sub>2</sub> /L)	29

Observando a tabela, verifica-se que o pH se encontra muito próximo da neutralidade, enquanto o valor de sólidos suspensos totais se encontra acima do permitido em alguns casos de descarga de águas residuais. Os sólidos suspensos totais presentes no centrifugado estão em maior concentração quando comparados com os restantes ensaios de SST realizados. Na figura 67 pode observar-se um papel de filtro utilizado na determinação de SST no centrifugado.



Figura 67 – Papel de filtro utilizado nos ensaios de determinação dos SST no centrifugado da ETAR em Fimalicão.

Quanto à CQO e CBO do centrifugado, pode dizer-se que a quantidade de matéria orgânica presente é baixa, resultando em valores de CQO e CBO numa baixa gama de concentrações.

Os parâmetros obtidos nos ensaios com o centrifugado em Fimalicão serão posteriormente comparados com os ensaios do Cone test realizados às lamas da mesma ETAR.

### 5.3.2 Filtrado da unidade Geotube® da Figueira da Foz

Quanto aos parâmetros do filtrado da Figueira da foz, os resultados encontram-se na tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de qualidade da água medidos no filtrado da unidade Geotube® da ETAR na Figueira da Foz (Valores médios de dois ensaios  $\pm$  desvio máximo).

pH	7,22
Sólidos Totais (g/L)	1,807 $\pm$ 0,006
Sólidos suspensos totais (mg/L)	49 $\pm$ 2
Carência química de oxigénio (mg O <sub>2</sub> /L)	240 $\pm$ 12
Carência bioquímica de oxigénio (mg O <sub>2</sub> /L)	68 $\pm$ 7

Enquanto o pH do filtrado se encontra próximo da neutralidade, os sólidos suspensos totais apresentam baixos valores de concentração. Na figura 68 pode observar-se um papel de filtro utilizado nos ensaios de determinação de SST no filtrado do Geotube®.



Figura 68 – Papel de filtro utilizado nos ensaios de determinação dos SST no filtrado da unidade Geotube® da ETAR na Figueira da Foz.

Observando a figura 68, pode concluir-se que a tecnologia Tencate Geotube® permite obter um filtrado com baixas quantidades de sólidos suspensos, devido à elevada capacidade de retenção de sólidos da unidade Geotube®.

Relativamente às análises de CBO e de CQO, pode dizer-se que este se trata de um filtrado com uma quantidade de matéria orgânica considerável, possivelmente devido aos efluentes de conservas que são encaminhados para tratamento na ETAR.

Estes resultados serão posteriormente comparados com os ensaios laboratoriais Cone Test realizados às lamas da mesma origem.

## 5.4 Cone test

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os resultados obtidos nos Cone Test realizados com as lamas das três ETAR em estudo, utilizando os cinco floculantes previamente preparados.

Nos ensaios com o floculante aniónico não houve formação de flocos em quantidade aceitável, mesmo para quantidades elevadas de polímero. Nas figuras 69 e 70 podem observar-se as soluções de lamas de cada ETAR após a introdução desse floculante.

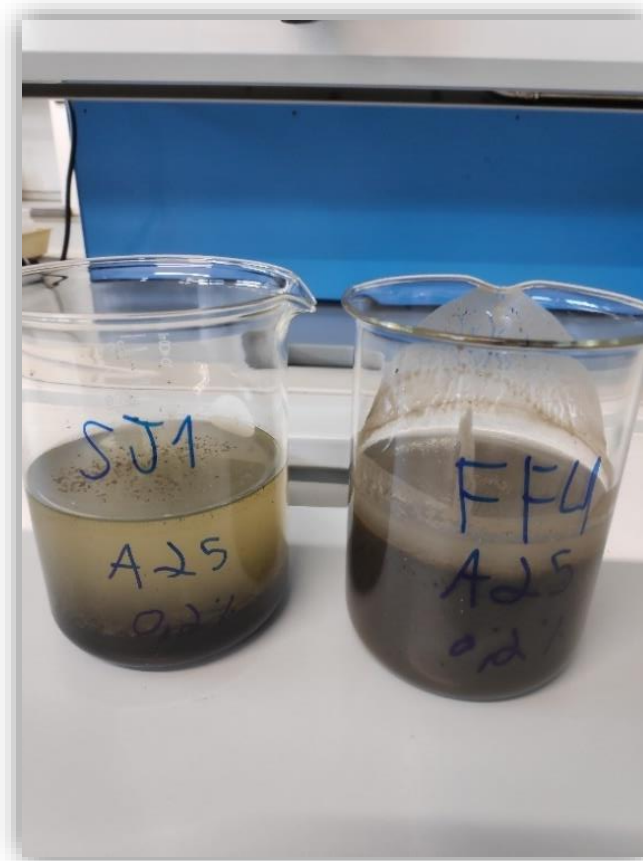


Figura 69 – Lamas das ETAR de S. Jacinto e Figueira da Foz após adição do floculante aniónico e agitação em Jar test.

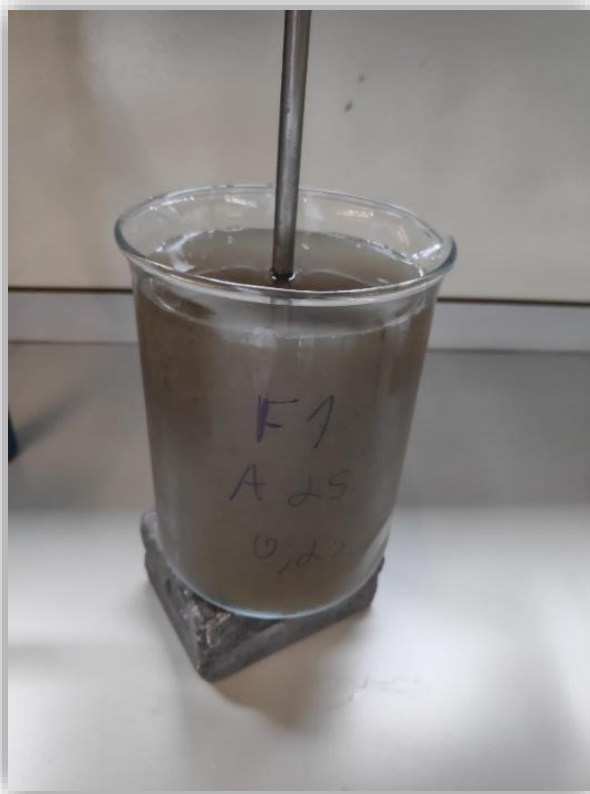


Figura 70 – Lamas da ETAR em Famacição após adição do floculante aniônico e agitação em Jar test.

Dado que a floculação representa uma etapa fundamental para o processo de desidratação através da tecnologia Tencate Geotube®, optou-se por não realizar o Cone test com estes três ensaios.

## ETAR em S. Jacinto

Determinada a quantidade ideal de floculante para o volume de lamas floculado, calcularam-se as dosagens ideais de cada floculante, tendo-se obtido os valores apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Determinação da dosagem ideal de floculante para as lamas recolhidas na ETAR em S. Jacinto.

Floculante	Concentração (g/L)	Volume de floculante usado (mL)	Quantidade de floculante usado (g)	Dosagem ideal de floculante (g/L de lamas)
<b>C29</b>	2	15	0,03	0,06
<b>RG11</b>	2	10	0,02	0,04
<b>GT08<sup>1</sup></b>	10 mL/L	40	0,40 mL	0,80 mL/L
<b>EC<sup>1</sup></b>	3 mL/L	20	0,06 mL	0,12 mL/L

<sup>1</sup> produto comercializado em emulsão

Tendo em conta as dosagens determinadas na tabela 8 e os floculantes com melhor desempenho nas lamas de S. Jacinto foram o Geofloc C29 e o Geofloc RG11. Conclui-se que os floculantes comercializados em pó são mais eficazes que os em emulsão na desidratação destas lamas com a tecnologia da Tencate Geotube®. No entanto, as análises aos parâmetros de

qualidade dos filtrados permitirão confirmar se estes são de facto os dois flocculantes mais adequados para as lamas de S. Jacinto.

Na tabela 9, encontram-se os dados relativos aos ensaios de Cone Test com as lamas de S. Jacinto, assim como as figuras ilustrativas das lamas flocculadas antes e após filtração e respetivos filtrados.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios Cone test às lamas recolhidas na ETAR em S. Jacinto.

Floculante	Lamas flocculadas	Lamas retidas no Geotube®	Filtrado final
C29 0,2%			
RG11 0,2%			
GT08 1%			
EC 0,3%			

Observando as figuras relativas às lamas floculadas antes da filtração, pode constatar-se que a floculação ocorreu da forma desejada com todos os floculantes. Existe uma boa formação de flocos, assim como uma distinção clara entre os flocos formados e o sobrenadante o que significa que a dosagem utilizada para cada um dos floculantes foi adequada.

Relativamente às lamas que ficaram retidas no interior do Geotube®, nos quatro ensaios verifica-se que estas se encontram bem consolidadas, podendo até notar-se os contornos da membrana do Geotube® na superfície da lama desidratada. A facilidade com que a lama desidratada é removida do Geotube® sem se desfazer também é um bom indicador de que o ensaio foi bem-sucedido.

No que diz respeito aos filtrados finais destacam-se a nitidez dos mesmos assim como a baixa presença de sólidos suspensos, sendo que os parâmetros de qualidade analisados serão apresentados e discutidos posteriormente.

Apresentam-se na tabela 10 os resultados referentes ao filtrado resultante da desidratação das lamas de S. Jacinto utilizando a tecnologia Tencate Geotube®.

Tabela 10 – Parâmetros de qualidade medidos no filtrado resultante do Cone test às lamas recolhidas na ETAR em S. Jacinto (Valores médios de dois ensaios  $\pm$  desvio máximo).

Floculante	pH Lamas	pH Filtrado	ST (g/L)	SST (mg/L)	CQO (mgO <sub>2</sub> /L)	CBO (mgO <sub>2</sub> /L)
<b>C29 0,2%</b>	7,01	7,24	1,42 $\pm$ 0,03	36 $\pm$ 8	102 $\pm$ 5	32
<b>RG11 0,2%</b>	7,08	7,16	1,39 $\pm$ 0,01	28 $\pm$ 6	96 $\pm$ 4	<LD
<b>GT08 1%</b>	7,07	7,26	1,48 $\pm$ 0,03	53 $\pm$ 3	255 $\pm$ 10	70
<b>EC 0,3%</b>	6,96	7,20	1,31 $\pm$ 0,02	34 $\pm$ 4	112 $\pm$ 2	37

LD – Limite de Detecção

O pH das lamas foi medido após a recolha, sendo posteriormente comparado com o pH final do filtrado após desidratação das lamas no Geotube®. É possível verificar uma subida ligeira do pH, mas o mesmo mantém-se ainda muito próximo da neutralidade, sendo que esta diferença pode ser considerada desprezável.

Com a exceção do filtrado onde se utilizou o Geofloc GT08, os restantes três ensaios apresentaram valores próximos de sólidos totais. Esta diferença na quantidade de sólidos totais poderá estar relacionada com a elevada quantidade do floculante GT08 utilizada, associada a uma concentração elevada do floculante na solução.

Como seria de esperar, tal como aconteceu nos sólidos totais, o filtrado onde foi utilizado o Geofloc GT08 apresenta um valor mais elevado de sólidos suspensos totais. Mesmo assim todos os filtrados apresentam valores relativamente baixos de sólidos suspensos totais, demonstrando a eficiência da tecnologia Tencate Geotube® na retenção de sólidos.

Uma vez mais, assim como aconteceu nos parâmetros anteriormente analisados, o filtrado cujo floculante utilizado foi o Geofloc GT08 a 1% apresenta valores de CQO consideravelmente elevados face aos restantes ensaios. Logo, poderá concluir-se que a concentração do floculante é diretamente proporcional à quantidade de matéria orgânica presente no filtrado final, uma vez que os floculantes são polímeros orgânicos.

Assim como aconteceu com a CQO, o filtrado com GT08 apresenta um valor de CBO mais elevado que os restantes filtrados. Por outro lado, o filtrado onde foi utilizado o RG11 apresentou um resultado inferior ao limite de deteção do equipamento no final dos 5 dias de análise. Isto poderá ter acontecido por causa de algum erro de leitura do equipamento, ou devido ao facto deste ensaio ter sido realizado alguns dias após os outros, resultando na inexistência de matéria orgânica biodegradável no filtrado final. As determinações da matéria orgânica deveriam ter sido realizadas no mesmo dia de modo a obter resultados mais próximos da realidade. Tal não aconteceu devido à falta de tempo para a repetição dos ensaios Cone Test e à escassez de lamas pois grande parte das mesmas foi utilizada para a determinação da dosagem ideal de floculante.

Os resultados obtidos nos parâmetros de qualidade do filtrado comprovam que, nas lamas de S. Jacinto, os floculantes mais eficazes são os floculantes em pó, o Geofloc C29 e Geofloc RG11, tendo em conta também as dosagens de floculante necessárias.

## ETAR na Figueira da Foz

Depois de floculadas as amostras de lamas da Figueira da Foz, obtiveram-se as dosagens ideais de floculante apresentadas na tabela 11.

Tabela 11 - Determinação da dosagem ideal de floculante para as lamas recolhidas na ETAR da Figueira da Foz.

Floculante	Concentração (g/L)	Volume de floculante usado (mL)	Quantidade de floculante usado (g)	Dosagem ideal de floculante (g/L de lamas)
<b>C29</b>	2	45	0,09	0,18
<b>RG11</b>	2	30	0,06	0,12
<b>GT08<sup>1</sup></b>	10 mL/L	60	0,60 mL	1,20 mL/L
<b>EC<sup>1</sup></b>	3 mL/L	35	0,11 mL	0,21 mL/L

<sup>1</sup> produto comercializado em emulsão

Analisando as dosagens ideais de cada floculante, pode concluir-se que o Geofloc GT08 será o floculante menos apropriado para as lamas da ETAR na Figueira da Foz pois apresenta uma quantidade de floculante por volume de lamas muito elevada comparativamente com os restantes floculantes.

Encontram-se na tabela 12 os resultados relativos aos ensaios de Cone Test das lamas da ETAR na Figueira da Foz, assim como as figuras relativas a cada uma das etapas dos processos de desidratação.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios Cone Test às lamas recolhidas na ETAR da Figueira da Foz.

Floculante	Lamas floculadas	Lamas retidas no Geotube®	Filtrado final
C29 0,2%			
RG11 0,2%			
GT08 1%			
EC 0,3%			

No que toca à floculação das lamas, as figuras mostram que os resultados obtidos foram adequados, tendo-se formado flocos de dimensões aceitáveis. Comparando com as amostras de S. Jacinto, verifica-se que estas lamas se encontram muito mais espessas, resultando numa lama floculada sem a formação de um sobrenadante destacado. No entanto, é possível comprovar a

boa floculação ocorrida inclinando ligeiramente o gobelé com as lamias para verificar a separação sobrenadante-flocos, como se pode comprovar pela figura 71.



Figura 71 – Exemplo de uma floculação adequada com separação evidente dos flocos formados e sobrenadante.

Em relação às lamias retidas na unidade Geotube® no Cone Test, concluiu-se que estas apresentaram-se bem desidratadas nos quatro ensaios, pela facilidade com que se separam das paredes da estrutura Geotube®, pela consistência das mesmas e pela forma como ficaram marcadas pelas saliências da estrutura, mostrando uma boa consolidação.

Os filtrados finais apresentaram-se nítidos e na tabela 13 estão registados os resultados obtidos dos parâmetros de caracterização.

Tabela 13 - Parâmetros de qualidade medidos no filtrado resultante do Cone test às lamias recolhidas na ETAR da Figueira da Foz (Valores médios de dois ensaios  $\pm$  desvio máximo).

Floculante	pH		ST (g/L)	SST (mg/L)	CQO (mgO <sub>2</sub> /L)	CBO (mgO <sub>2</sub> /L)
	Lamias	Filtrado				
<b>C29 0,2%</b>	7,05	7,67	1,87 $\pm$ 0,03	14 $\pm$ 2	331 $\pm$ 71	104
<b>RG11 0,2%</b>	7,07	7,23	1,85 $\pm$ 0,04	18 $\pm$ 2	538 $\pm$ 56	242
<b>GT08 1%</b>	7,04	7,47	1,67 $\pm$ 0,02	36 $\pm$ 4	267 $\pm$ 15	106
<b>EC 0,3%</b>	7,07	7,15	1,89 $\pm$ 0,04	17 $\pm$ 3	529 $\pm$ 16	225

Os pH das lamias apresentam-se muito próximos da neutralidade e, após o processo de filtração, registaram-se ligeiras subidas de pH. Isto poderá dever-se ao facto de nos ensaios com estes floculantes terem sido usadas maiores dosagens de floculante.

No que diz respeito aos sólidos totais, como seria de esperar os filtrados da Figueira da foz apresentaram valores mais elevados do que as amostras de S. Jacinto. Isto deve-se ao facto de ser tratarem de lamias mais espessas e, conseqüentemente, com maior quantidade de sólidos na sua constituição.

Relativamente aos sólidos suspensos totais, estes apresentam valores baixos, demonstrando assim a eficácia da tecnologia da Tencate Geotube® na retenção de sólidos suspensos. Apesar de os filtrados terem uma maior quantidade de sólidos totais face às outras ETAR, os valores de sólidos suspensos totais são mais baixos do que seria de esperar. Isto significa que a maior quantidade dos sólidos destes filtrados se encontra dissolvido na solução.

Relativamente à CQO e CBO dos filtrados, pode concluir-se que nos 4 ensaios existem quantidades elevadas de matéria orgânica. Dado o elevado espessamento das lammas desidratadas, seria de esperar uma quantidade mais elevada de matéria orgânica, sendo que o facto de o efluente tratado ser urbano e com uma quantidade considerável de efluentes de indústrias de conservas também contribui para a quantidade de matéria orgânica biodegradável encontrada nos filtrados finais.

É importante referir que nos casos do Geofloc RG11 e do Geofloc EC os valores apresentados na tabela foram medidos no terceiro dia, e não no quinto, pois a partir daí a quantidade de CBO era demasiado elevada para o aparelho fazer a leitura.

Comparando os resultados obtidos em laboratório com os parâmetros medidos no filtrado recolhido na unidade Geotube® na Figueira da Foz, verificam-se diferenças notórias na quantidade de matéria orgânica e nos sólidos suspensos totais. Enquanto que os valores de sólidos totais se encontram relativamente próximos, nos ensaios em laboratório foram obtidos filtrados com menos sólidos suspensos totais.

Em termos de matéria orgânica, nas análises ao filtrado retirado diretamente da ETAR, este apresenta menores quantidades que o filtrado obtido em laboratório. Tal seria de esperar, pois o filtrado analisado em laboratório foi medido imediatamente após o processo de desidratação, ao contrário do que foi recolhido em ETAR, sendo que também poderá estar relacionado com algum parâmetro qualitativo relativo à própria lama.

## ETAR em Famalicão

Nos ensaios de floculação das lammas da ETAR de Famalicão, determinaram-se as dosagens ideais de floculante apresentadas na tabela 14.

Tabela 14 - Determinação da dosagem ideal de floculante para as lammas recolhidas na ETAR em Famalicão.

Floculante	Concentração (g/L)	Volume de floculante usado (mL)	Quantidade de floculante usado (g)	Dosagem ideal de floculante (g/L de lammas)
<b>C29</b>	2	15	0,03	0,06
<b>RG11</b>	2	25	0,05	0,10
<b>GT08<sup>1</sup></b>	10 mL/L	30	0,30 mL	0,60 mL/L
<b>EC<sup>1</sup></b>	3 mL/L	30	0,09 mL	0,18 mL/L

<sup>1</sup> produto comercializado em emulsão

Tendo em conta as dosagens apresentadas na tabela 14, o floculante mais adequado para a desidratação destas lammas seria o Geofloc C29 pois apresenta a menor quantidade de floculante gasta por cada litro de lammas a tratar. No entanto, é importante referir que os floculantes apresentam dosagens relativamente baixas à exceção do Geofloc GT08. Estas dosagens estão associadas à baixa concentração de lammas das amostras recolhidas na ETAR de Famalicão.

Apresentam-se, na tabela 15, os resultados dos ensaios Cone test das amostras de lammas da ETAR em Famalicão e as respetivas imagens correspondentes a cada um dos floculantes.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios Cone test às lamas recolhidas na ETAR em Famalicão.

Floculante	Lamas floculadas	Lamas retidas no Geotube®	Filtrado final
<b>C29 0,2%</b>			
<b>RG11 0,2%</b>			
<b>GT08 1%</b>			
<b>EC 0,3%</b>			

Como evidenciado pelos resultados na tabela 15, a floculação das lamas ocorreu de forma adequada, verificando-se uma clara distinção entre os flocos bem formados e o sobrenadante. No entanto, note-se que a quantidade de lamas presente nos ensaios é baixa, dificultando assim o processo de desidratação como se pode ver nas figuras relativas às lamas retidas no Geotube®.

Este fator contribuiu para que a etapa onde a membrana é apertada não tivesse os mesmos resultados que os ensaios nas outras ETAR.

No caso do Geofloc EC e do GT08 podem observar-se que as lamas ficam espalmadas contra as paredes do Geotube®, sem formar uma lama mais compacta e bem consolidada. No ensaio onde foi usado o Geofloc C29 pode observar-se que as lamas retidas estão consideravelmente húmidas e com uma consistência pastosa.

Por fim, os filtrados de todos os quatro floculantes apresentaram-se límpidos e com uma quantidade insignificante de sólidos suspensos totais sendo que os parâmetros de caracterização se encontram na tabela 16.

*Tabela 16 - Parâmetros de qualidade medidos no filtrado resultante do Cone test às lamas recolhidas na ETAR em Famalicão (Valores médios de dois ensaios  $\pm$  desvio máximo).*

Floculante	pH		ST (g/L)	SST (mg/L)	CQO (mgO <sub>2</sub> /L)	CBO (mgO <sub>2</sub> /L)
	Lamas	Filtrado				
<b>C29 0,2%</b>	7,30	7,40	1,05 $\pm$ 0,05	38 $\pm$ 3	25 $\pm$ 3	<LD
<b>RG11 0,2%</b>	7,40	7,50	1,67 $\pm$ 0,03	15 $\pm$ 1	21 $\pm$ 1	<LD
<b>GT08 1%</b>	7,30	7,30	1,48 $\pm$ 0,03	60 $\pm$ 2	22 $\pm$ 4	21
<b>EC 0,3%</b>	7,40	7,40	1,21 $\pm$ 0,08	33 $\pm$ 3	24 $\pm$ 1	<LD

LD – Limite de Detecção

No que diz respeito aos pH das lamas e dos filtrados finais, ambos se encontram próximos da neutralidade, sendo que a diferença de pH entre antes e depois da desidratação é quase inexistente.

Quanto aos resultados dos ensaios de determinação dos sólidos totais nos filtrados, estes foram, entre os três Cone test, os ensaios onde houve maior diferença entre sólidos totais em cada um dos filtrados.

Os sólidos totais apresentaram os valores mais baixos nos filtrados onde foram utilizados o Geofloc C29 e o Geofloc EC. Logo, pode dizer-se que estes são os melhores floculantes no que toca à retenção de sólidos totais na membrana do sistema Geotube®.

De acordo com os resultados da tabela 16, a floculação com Geofloc RG11 produziu um filtrado com menor quantidade de sólidos suspensos totais e maior concentração de sólidos totais. Este resultado sugere que a utilização deste floculante promove a formação de partículas suspensas de maior dimensão que ficam retidas no filtro, em comparação com os restantes floculantes.

Quanto à CQO é possível observar que em todos os floculantes se registam valores semelhantes entre si e mais baixos do que os filtrados dos outros ensaios.

Como se pode observar na tabela, três dos filtrados apresentaram valores de CBO abaixo do limite de deteção. Isto poderá estar relacionado com o facto de as análises não terem sido realizadas logo após a recolha das amostras, apesar das mesmas terem sido conservadas no frio. Aliado ao facto de, como se pode ver nos resultados da CQO, a quantidade de matéria orgânica presente nos filtrados ser baixa. Apenas no Geofloc GT08 se verificou um resultado válido de CBO5, talvez devido à elevada concentração deste floculante.

A comparação entre os resultados dos parâmetros de qualidade do centrifugado da ETAR de Famalicão e dos filtrados dos Cone test com as lamas da mesma ETAR será feita no capítulo 5.8.

## 5.5 Velocidade de desidratação

Um das vantagens da tecnologia Tencate Geotube® prende-se com a sua capacidade em desidratar continuamente as lamas retidas no seu interior. Para verificar como se processa a desidratação de lamas no interior do Geotube® na fase de consolidação foram medidas as percentagens de matéria seca nas lamas de um ensaio durante vários dias consecutivos. Os resultados obtidos estão apresentados na figura 72.

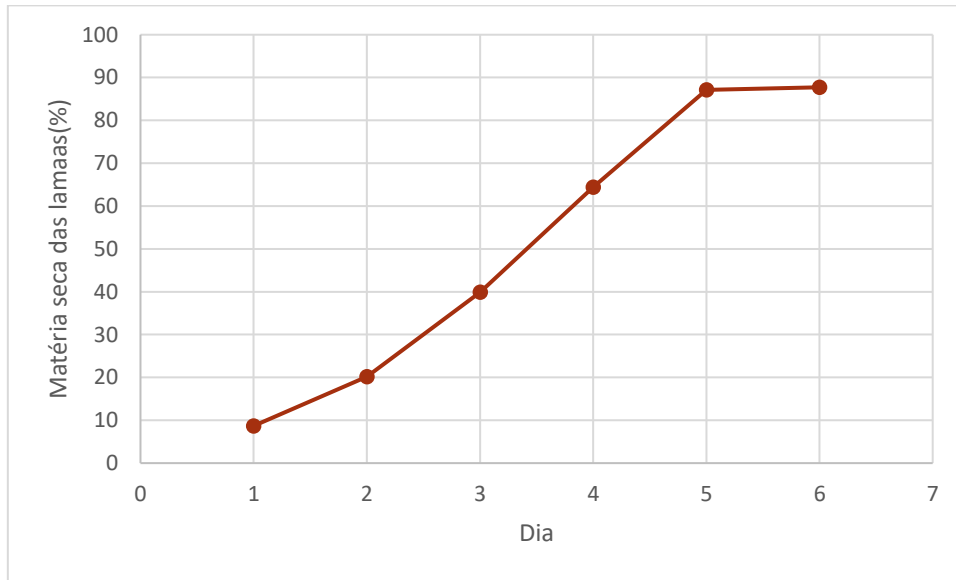


Figura 72 – Variação da matéria seca nas lamas desidratadas numa unidade Geotube® ao longo do tempo.

Como se pode observar no gráfico acima, a massa sólida das lamas no Geotube® aumentou abruptamente num período de 6 dias, demonstrando a capacidade do processo na desidratação contínua das lamas ao longo do tempo. A maior subida da percentagem de matéria seca ocorreu na passagem do dia 3 para dia 4, a partir daí foi aumentando até estabilizar nos 88%. Este valor, num contexto real de uma ETAR, não se aproxima da realidade pelo que não deve ser tomado como um valor de referência. O gráfico da figura 72 apenas permite validar a capacidade de drenagem contínua das unidades Geotube® após o processo de enchimento.

A amostra utilizada neste ensaio era da ETAR de Famalicão por isso tinha uma baixa concentração de sólidos. Este fator não só contribuiu para a dificuldade de retirar uma nova amostra de lama todos os dias, como também não permitiu retirar amostras de lamas secas durante um período de tempo mais longo. Foram utilizadas lamas da ETAR de Famalicão porque, das 3 ETAR visitadas, era a mais próxima do laboratório.

## 5.6 GDT test

Assim como nos ensaios de Cone Test, foram analisados parâmetros no filtrado resultante do GDT Test e também a percentagem de humidade das lamas após desidratação. As características das lamas utilizadas neste ensaio e os resultados do ensaio estão evidenciados na tabela 17.

Tabela 17 – Resultados obtidos no GDT test às lamas recolhidas na ETAR em Famalicão (Valores médios de dois ensaios  $\pm$  desvio máximo).

<b>Lamas de Famalicão</b>	pH	7,13
	Volume recolhido (L)	90,0
	Humidade (%)	99,1
<b>Filtrado do GDT Test</b>	pH	7,23
	ST (g/L)	1,16 $\pm$ 0,05
	SST (mg/L)	14 $\pm$ 2
	CQO (mg O <sub>2</sub> /L)	50 $\pm$ 12
	CBO (mg O <sub>2</sub> /L)	37,0
<b>Lamas de Famalicão 3 dias após o GDT Test</b>	Massa total (g)	13,4
	Massa seca (g)	1,34
	Humidade (%)	90,0

Dado que se trata de um volume de lamas muito elevado, não se determinou a quantidade de filtrado obtido a partir das lamas floculadas.

Comparando diretamente os resultados obtidos no GDT test com os ensaios relativos ao centrifugado, conclui-se que a tecnologia da Tencate Geotube® se revela mais eficiente do que a centrifugação no que toca à retenção de sólidos. Tanto os sólidos totais como os sólidos suspensos totais apresentam valores inferiores nos filtrados do GDT Test face ao centrifugado.

No entanto, é importante ressaltar que a medição final de humidade foi realizada após 3 dias de consolidação das lamas no Geotube® sendo que as lamas apresentaram uma humidade de 90%. Todavia, nenhuma aplicação do sistema Geotube® tem como objetivo retirar lamas após alguns dias do termino da bombagem. A etapa de consolidação das lamas no interior da unidade Geotube® é o que permite atingir valores de desidratação mais elevados. Nas figuras 73 e 74, é possível verificar que apesar de se verificar o contorno das paredes do Geotube® nas lamas, estas encontram-se relativamente húmidas.



Figura 73 – Lamas desidratadas após 3 dias de consolidação no Geobag®.



Figura 74 – Amostra de lamas desidratadas retirada do interior do Geobag® após 3 dias de consolidação no interior da estrutura.

Recomenda-se, portanto, que na realização deste teste seja utilizada uma quantidade considerável de lamas que deverão estar moderadamente concentradas.

## 5.7 Eficiência do sistema de desidratação TenCate Geotube® no tratamento de lamas de ETAR

De modo a comprovar a eficiência do sistema de desidratação Tencate Geotube® no tratamento de lamas de ETAR foram considerados dois principais parâmetros. O primeiro está relacionado com o volume de lamas desidratadas que se obtém a partir do volume de lamas inicial, permitindo obter a percentagem de redução de volume das lamas. O segundo parâmetro trata-se da percentagem de humidade presentes nas lamas que ficam retidas no Geotube®, demonstrando assim a capacidade da tecnologia de reduzir a humidade das lamas iniciais.

Os resultados relativos a estes dois parâmetros para os Cone test das três ETAR encontram-se apresentados na tabela 18.

Tabela 18 – Redução de volume e humidade nas lamas após o processo de desidratação por Cone test.

ETAR	Floculante	Redução de volume (%)	Humidade das lamas desidratadas (%)
<b>S. Jacinto</b>	C29 0,2%	95	85,8
	RG11 0,2%	99	86,7
	GT08 1%	92	85,9
	EC 0,3%	96	88,0
<b>Figueira da Foz</b>	C29 0,2%	83	85,8
	RG11 0,2%	74	88,4
	GT08 1%	88	86,6
	EC 0,3%	75	88,2
<b>Famalicão</b>	C29 0,2%	95	89,9
	RG11 0,2%	94	88,1
	GT08 1%	88	87,2
	EC 0,3%	95	89,8

Relativamente à redução do volume ocupado pelas lammas, pode dizer-se que as percentagens obtidas foram satisfatórias. Excetuando os casos do Geofloc EC e Geofloc RG11 nas lammas da Figueira da foz, todas as lammas apresentaram reduções de volume superiores a 80%. Nestes casos, havia uma quantidade maior de lammas na amostra utilizada, que resultou na obtenção de maiores volumes de lammas retidas no Geotube®. Comparando as lammas das 3 ETAR, pode dizer-se, de acordo com os dados da tabela, que as amostras de S. Jacinto foram as que registaram maiores reduções de volume ocupado pelas lammas com valores acima dos 92%.

Quanto à humidade das lammas desidratadas, os valores obtidos encontram-se entre os 85% e os 90%. Quando comparados diretamente com os valores de humidade verificados nas lammas centrifugadas, são valores mais elevados o que poderia sugerir que a centrifugadora permite obter uma lama mais seca. No entanto, é importante realçar que as determinações das humidades nos Cone test foram realizadas imediatamente após o ensaio de desidratação das lammas. Logo, seria de esperar que as humidades apresentassem valores mais elevados pois a amostra de lammas cuja humidade foi medida não permaneceu no interior do Geotube® onde continuaria o seu processo de desidratação de forma gradual, como aconteceu no ensaio dedicado à velocidade da desidratação de lammas. Nesse mesmo ensaio, após um dia de consolidação as lammas registaram descidas na sua humidade de cerca de 10%, ou seja, se o mesmo acontecesse com as lammas dos Cone test, os valores de humidade seriam inferiores aos da lama centrifugada.

Para fazer uma comparação adequada dos resultados da tecnologia da Tencate Geotube® e com a centrifugação as determinações de humidade deveriam ser realizadas de forma gradual ao longo do tempo, e não logo após a filtração das lammas floculadas. Numa centrifugadora, as lammas atingem uma determinada sidade, sendo que esse valor normalmente não se altera. Poderá haver casos onde as lammas possam ter a sua humidade influenciada pelas condições de armazenamento, por exemplo, se o mesmo for aberto e estas estiverem sujeitas a chuva.

## 5.8 Análise comparativa com as restantes técnicas de desidratação de lammas

Quando comparada com técnicas de filtração de banda e de prensa, a tecnologia Tencate Geotube® apresenta as seguintes vantagens:

- Enquanto a filtração por prensa permite obter uma percentagem de matéria seca entre os 30 e os 45% e os filtros de banda permitem obter um teor de sólidos mais baixo, entre os 15 e 25%, a tecnologia Tencate Geotube® consegue ultrapassar estes valores numa questão de dias após o início do processo de desidratação (Andersen, 2001);
- Em termos energéticos, ambas as técnicas mecânicas apresentam um custo energético entre os 30 e os 40 kWh por tonelada de matéria seca (Andersen, 2001) sendo que este valor pode variar consoante as características e a quantidade de lammas a desidratar, enquanto numa unidade Geotube® o consumo energético é praticamente nulo.

No entanto, é importante referir que as percentagens de matéria seca relativas aos processos de filtração são valores normalmente obtidos para este tipo de tecnologias. De modo a poder fazer uma comparação mais adequada, seria necessário recolher amostras de lammas

desidratadas por processos de filtração de uma ETAR, sendo que também seriam recolhidas lamas húmidas para posterior desidratação aplicando a tecnologia Tencate Geotube®. Deste modo, dado que as lamas desidratadas provinham da mesma ETAR, os resultados obtidos permitiriam comprovar com mais exatidão a eficiência da tecnologia Tencate Geotube®.

Relativamente à centrifugação, é possível fazer uma comparação direta entre os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais das lamas recolhidas em Famalicão e o centrifugado obtido na mesma instalação:

- A percentagem de matéria seca nas lamas desidratadas por centrifugação na ETAR em Famalicão ronda os 20% enquanto numa unidade Geotube® é possível obter percentagens superiores num curto espaço de tempo. Para além disso, no que toca à retenção de sólidos a tecnologia Tencate Geotube® apresentou menores quantidades de sólidos presentes nos filtrados em relação ao centrifugado. Sendo que o principal objetivo das técnicas de desidratação é a separação sólido-líquido, a tecnologia Tencate Geotube® revela-se mais eficaz neste aspeto do que as centrífugas.
- Em termos energéticos, a centrifugadora apresenta o maior custo das técnicas mencionadas, podendo atingir valores de 80 kWh por tonelada de matéria seca (Andersen, 2001).

Por último, resta comparar a tecnologia Tencate Geotube® com os leitos de secagem. Como mencionado anteriormente, os leitos de secagem são técnicas atualmente utilizadas em países em desenvolvimento onde as condições climáticas permitem uma desidratação aceitável. Apesar de não apresentar custos energéticos significativos, considerando-se apenas o processo de desidratação, é uma técnica que envolve uma mão de obra significativa na sua manutenção. Por outro lado, a instalação de uma unidade de Geotube® apesar de implicar alguma preparação do terreno para a colocação da estrutura, é versátil o suficiente para poder ser aplicada em qualquer local independentemente das condições climáticas. Apesar de no caso da instalação de uma unidade Geotube® ser necessária uma área considerável, nos leitos de secagem a área exigida é muito superior dado que é necessário colocar o volume total de lamas húmidas no leito. Para além disso, nos leitos de secagem, em dias de chuva, ocorrem perdas consideráveis de eficiência pois a lama fica mais húmida e também existem emissões de maus cheiros associados a esta técnica.

Em termos de percentagem de matéria seca, as lamas em leitos de secagem podem atingir valores a rondar os 40 %, 10 a 15 dias após a deposição das lamas. No entanto, este valor só se verifica com condições favoráveis como a baixa precipitação e elevadas temperaturas. Para além disso, a percentagem de matéria seca nas lamas é diretamente proporcional ao tempo que as mesmas ficam nos leitos de secagem, envolvendo longos períodos de tempo para obter uma lama devidamente desidratada (Climate Policy Watcher, 2021).

Por vezes, nos leitos de secagem, é possível utilizar o espaço destinado a esta técnica para a colocação de unidades de desidratação Geotube®. No mesmo espaço é possível aumentar consideravelmente o volume de armazenamento de lamas, visto que uma unidade Geotube® permite atingir alturas de armazenamento de lamas mais elevadas.

Concluindo, a tecnologia Tencate Geotube® apresenta-se como uma técnica de desidratação de lamas mais eficaz e com menores custos energéticos representando uma ótima alternativa às técnicas atualmente mais utilizadas.

## 6. Conclusões

Um dos principais desafios inerentes à gestão de lamas produzidas em ETAR é a elevada quantidade produzida deste subproduto. Por vezes ocorrem problemas com o armazenamento de lamas, como por exemplo a sobrecarga de silos. Quando depositadas em aterro, o transporte de lamas também representa uma problemática devido às infraestruturas necessárias.

As próprias características da lama produzida devem ser tidas em conta na desidratação das mesmas. Consoante a sua composição pode ser utilizado um floculante mais adequado que permita uma melhor floculação para posterior desidratação.

Nos testes laboratoriais realizados com as lamas recolhidas em três ETAR, alguns floculantes revelaram-se mais eficazes no que toca à formação de flocos de lamas. Entre os quatro floculantes utilizados, destaca-se o Geofloc C29 que permitiu obter resultados satisfatórios nos três Cone test, com uma dosagem, no geral, inferior à dos outros floculantes.

Nos ensaios Cone test e GDT test, os filtrados obtidos, aplicando a tecnologia Tencate Geotube®, apresentaram bons resultados no que toca à concentração de sólidos, com SST entre os 10 e os 65 mg/L, enquanto o centrifugado apresentava valores a rondar os 100 mg/L. As lamas obtidas apresentaram teores de humidade entre 85% e 90%, sendo que este valor iria diminuir ao longo do tempo de consolidação das lamas no interior na unidade Geotube®.

Relativamente aos teores de matéria orgânica, a ETAR de Famalicão apresentou os filtrados com menores concentrações (21-25 mg O<sub>2</sub>/L). O filtrado obtido a partir da lama recolhida na ETAR da Figueira da Foz foi o que apresentou maiores concentrações de matéria orgânica, de acordo com os valores medidos no filtrado recolhido na ETAR. As elevadas concentrações foram associadas ao facto de o afluente incluir águas residuais provenientes da indústria de conservas.

Embora tratando-se de ETAR diferentes, que recebem afluentes com características diferentes, compararam-se os resultados da caracterização do filtrado do geotube, recolhido na ETAR da Figueira da Foz, e do centrifugado da ETAR de Famalicão. O filtrado apresenta maiores valores de concentração de matéria orgânica e valores mais baixos para a concentração de sólidos, sugerindo uma maior eficiência do Geotube® para a remoção de sólidos. As quantidades elevadas de matéria orgânica medidas no filtrado da Figueira da Foz podem dever-se a maiores concentrações no afluente da ETAR, provenientes das indústrias de conserva de peixe.

No caso das lamas da ETAR de Famalicão, os filtrados obtidos em laboratório apresentaram menores quantidades de sólidos suspensos em comparação com o centrifugado recolhido. Embora o resultado possa sugerir um melhor desempenho do sistema Geotube® face à centrifugação, deverá ter-se em conta que a manipulação de pequenas quantidades de lama no laboratório torna mais eficiente o processo de filtração relativamente ao Geotube® na ETAR.

Quanto às reduções de volume das lamas, foram obtidos valores, em média, a rondar os 90%, confirmando assim a eficiência desta tecnologia.

Foi também possível verificar que, a etapa onde a desidratação de lamas ocorre de forma mais eficaz, trata-se da consolidação das lamas no interior da unidade Geotube®. No ensaio de velocidade de desidratação foi possível verificar que a drenagem na estrutura Geotube® ocorre de forma gradual encerrado o processo de enchimento.

O sistema de desidratação de lamas Tencate Geotube® apresenta várias vantagens na sua utilização:

- Trata-se de um sistema menos dispendioso em termos energéticos, consumindo energia, principalmente, no processo de bombagem das lamas e do floculante. Se for considerado apenas o processo de desidratação em si, pode dizer-se que o consumo energético é extremamente baixo dado que o processo é completamente natural.
- É um processo que permite confinar, desidratar e armazenar as lamas numa única estrutura.
- É também uma tecnologia que pode ser aplicada em conjunto com outras técnicas de desidratação como acontece com os leitos de secagem, apresentando uma baixa necessidade de manutenção da estrutura.
- Tendo em conta a problemática da quantidade de lamas produzidas, a tecnologia Tencate Geotube® proporciona enormes reduções de volume de lamas a enviar para destino final, permitindo assim tratar elevadas quantidades de lamas, reduzindo o espaço necessário para o seu armazenamento após desidratação, sendo que este armazenamento pode ser feito no interior da unidade Geotube®.
- É uma técnica de rápida e fácil aplicação, que requer uma baixa necessidade de mão de obra e manutenção, sendo que, quando devidamente preparada, se trata de uma tecnologia que oferece uma enorme segurança em termos operacionais. Apresenta, também, uma grande versatilidade no que toca à sua implementação, adaptando-se facilmente ao projeto designado.

Entre os principais obstáculos enfrentados na utilização do sistema Geotube®, destacam-se aqueles que foram apresentados ao longo dos ensaios laboratoriais:

- A determinação da dosagem ideal foi realizada de forma exaustiva, repetindo cada ensaio de modo a encontrar a quantidade mínima de floculante para obter uma boa floculação. Trata-se da etapa mais importante do processo, pois sem uma floculação adequada não seria possível atingir resultados positivos utilizando um sistema Geotube®;
- Os ensaios de determinação dos sólidos suspensos totais também revelaram outra dificuldade. Realizar uma filtração a vácuo imediatamente após o processo de floculação e desidratação das lamas, leva a que o floculante acelere o processo de colmatação do papel de filtro, dificultando e atrasando a realização do ensaio;
- A análise dos parâmetros de CQO e CBO deve ser feita o mais rápido possível após o processo de recolha e desidratação das lamas de modo a obter resultados mais fiáveis, dado que a quantidade de matéria orgânica, naturalmente, vai diminuindo ao longo do tempo;
- No GDT test, é necessária uma quantidade de lamas considerável para assegurar o enchimento da unidade Geotube®.

Quando se trata da aplicação desta tecnologia em contexto industrial, existem alguns obstáculos que devem ser mencionados:

- A instalação de uma unidade Geotube® no local implica, caso não existam condições criadas, a construção de uma plataforma que permita manter a estrutura estável antes e durante o processo de desidratação;
- É importante atentar que a altura de enchimento não seja ultrapassada de modo a evitar qualquer tipo de acidente. Para tal, é necessária monitorização de um operador em contínuo durante o processo de enchimento da unidade Geotube®.

Atualmente, com o aumento gradual da população e uma necessidade crescente de fornecimento de água às populações será de esperar um aumento da produção de lamas em ETAR. Por isso, processos como a desidratação de lamas são fulcrais para impulsionar o reaproveitamento da água presente neste subproduto, e a implementação de tecnologias como a Tencate Geotube® assumirão, com certeza, um papel preponderante neste setor.

## 7. Trabalho Futuro

Para além dos pontos abordados na presente dissertação, existem ainda algumas áreas onde poderiam ser realizados estudos no futuro.

A quantidade de lamas produzidas no tratamento de águas é cada vez maior, dada a quantidade de água que é necessário tratar. Portanto, na eventualidade deste cenário se continuar a verificar, proporia a realização de um estudo relativo ao impacte ambiental das tecnologias de desidratação de lamas. Por exemplo, uma comparação das pegadas de carbono entre técnicas de desidratação de lamas. Deste modo, seria possível comprovar quais as técnicas mais sustentáveis de forma a atenuar as consequências negativas para o meio ambiente.

Para além disso, seria pertinente realizar uma investigação profunda ao tipo de floculantes aplicados a diferentes tipos de ETAR onde a tecnologia Tencate Geotube® é utilizada para desidratação de lamas. Deste modo, seria possível maximizar a eficiência da técnica, assim como determinar qual o floculante mais eficaz e rentável.

Sugeria também um estudo relativo às aplicações da tecnologia Tencate Geotube® noutras vertentes, visto que esta apresenta uma enorme versatilidade e um elevado potencial no que toca à remediação ambiental.

Por fim, seria importante realizar um estudo da viabilidade económica da tecnologia Tencate Geotube® face às outras tecnologias de desidratação de lamas englobando todo o tipo de custos como o floculante, a unidade Geotube®, a mão de obra para a instalação dos sistemas Geotube®, entre outros.

## 8. Referências

- AES Sludge Thickening (2020). Acedido a 31 de março de 2021 em: <https://www.aesarabia.com/sludge-thickening/>
- Águas de Ponta Preta. Acedido a 31 de março de 2021 em: <http://aguaspontapreta.cv/>
- Águas do Vale do Tejo. "Unidos pela água, unidos pelo progresso". *Grupo Águas de Portugal, ETAR de Torrão*, 2020.
- Alchetron. *Aqua Appia*. 31 de março de 2021. Acedido a 25 de maio de 2021 em: <https://alchetron.com/Aqua-Appia>.
- Ambitrevu. Acedido a 20 de junho em: <https://www.ambitrevu.pt/nutrofolium>
- Andersen, A. "Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge—Part 3: Scientific and Technical Report." *European Communities, Luxemburgo, UK, Report*.(2001).
- Angelakis, Andreas N., and Shane A. Snyder. "Wastewater treatment and reuse: Past, present, and future." (2015): 4887-4895.
- APA. "Classificação das massas de água." *Avaliação intercalar 2014-2017*. dezembro de 2019.
- Archive, Web. *Construção de aquedutos*. 17 de janeiro de 2008. Acedido a 12 de março de 2021 em: <https://web.archive.org/web/20080117202058/http://www.imperiumromanum.it/IR/ingegneria/ponti.htm>>.
- Babo, Maria João. *Cimpor quer usar resíduos têxteis e lamas para produzir em Alhandra*. Jornal de negócios (2020).
- Baird, Rodger B. *Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd*. Water Environment Federation, American Public Health Association, American Water Works Association, 2017.
- Bassan, Magalie & Dodane, Pierre-Henri & Strande, Linda. *Treatment Mechanisms*. 2014.
- Bibby, Miriam. "London's Great Stink." 2019. *Historic UK*. Acedido a 14 de março de 2021 em <https://www.historic-uk.com/HistoryUK/HistoryofBritain/Londons-Great-Stink/>.
- Cervantes, Francisco J., Spyros G. Pavlostathis, and Adrianus van Haandel, eds. *Advanced biological treatment processes for industrial wastewaters*. IWA publishing, 2006.
- Climate Policy Watcher, 16 de abril de 2021. *The Main Advantages of Sludge Drying Beds*. Acedido a 24 de julho de 2021 em: <https://www.climate-policy-watcher.org/wastewater-sludge/drying-beds.html>
- Decreto Lei nº 73/2011. Diário da República nº 116/2011 publicado a 17 de junho de 2011.
- Dodane, Pierre-Henri, et al. "Planted drying beds for faecal sludge treatment: lessons learned through scaling up in Dakar, Senegal." *Desalination* 1.8 (2011).
- ERSAR. "Tratamento de águas residuais." *Operações e processos de tratamento físico e químico*. Lisboa, dezembro de 2016.
- Geofabrics. Tencate Geotube®. Acedido a 25 de maio de 2021 em: <https://www.geofabrics.co/products/tencate-geotube%C2%AE>

Ginisty, P., R. Mailler, and V. Rocher. "Sludge conditioning, thickening and dewatering optimization in a screw centrifuge decanter: Which means for which result?." *Journal of Environmental Management* 280 (2021): 111745.

Gonçalves, Júlia, 2017. *Análise das tecnologias correntes para o tratamento e secagem de lamas de ETAR*. Mestrado em Engenharia de Ambiente na Especialidade de Tecnologias e Gestão do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Jordão, E.P.; Volchan JR., I. Tratamento de Esgotos Sanitários em Empreendimentos Habitacionais. 1º Ed. Brasília: CAIXA, 2009, 132p.

Limami, Houssame, et al. "Recycled wastewater treatment plant sludge as a construction material additive to ecological lightweight earth bricks." *Cleaner Engineering and Technology 2* (2021): 100050.

Macedo, Cristiana. *AEVO: Operadores reciclam 800 mil toneladas de Lamas de ETAR*. Ambiente Magazine (2021).

Maksimova, Svetlana, Dariya Kosourova, and Anna Pesheva. "Recycling of wastewater treatment plants sludge in urban landscaping in West Siberia." *Procedia engineering* 117 (2015): 232-238.

Naves, Filomena. *Águas residuais vão ajudar a prever novos surtos de covid-19*. Diário de Notícias (2020).

Portaria nº 209/2004. Diário da República nº 53/2004 publicado a 3 de março de 2004.

Rabie, Ghada Mourtada, Hisham Abd El-Halim, and Ehab Helmy Rozaik. "Influence of using dry and wet wastewater sludge in concrete mix on its physical and mechanical properties." *Ain Shams Engineering Journal* 10.4 (2019): 705-712.

Rabie, Ghada Mourtada, Hisham Abd El-Halim, and Ehab Helmy Rozaik. "Influence of using dry and wet wastewater sludge in concrete mix on its physical and mechanical properties." *Ain Shams Engineering Journal* 10.4 (2019): 705-712.

Sludge Processing, 18 de junho de 2020. *Sludge treatment – dissolved air flotation thickening*. Acedido a 4 de abril de 2021 em: <https://www.sludgeprocessing.com/sludge-thickening/dissolved-air-flotation-thickening>

Sludge Processing, 18 de junho de 2020. *Sludge treatment – gravity thickening*. Acedido a 4 de abril de 2021 em: <https://www.sludgeprocessing.com/sludge-thickening/gravity-thickening>

SMAS, Maia. Compostagem de lamas. Acedido a 25 de maio em: <https://www.smasmaia.pt/rede-e-infraestruturas/aguas-residuais/compostagem-de-lamas>

SNF Floerger®, *Sludge Dewatering*, 2003.

Sousa, Eunice. *CIIMAR e Águas do Porto “procuram” SARS-CoV-2 em águas residuais*. Notícias UP (2021).

Sousa, R., 2005. *Estratégias de gestão de lamas das estações de tratamento de águas residuais (ETAR). Extrusão de lamas para aplicação na agricultura*. Mestrado em Engenharia de Ambiente. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

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

Tencate Geotube® Brochure. *Têxteis industriais. Sistemas de desidratação. Tecnologias de desidratação Geotube®*, 2021.

Tencate Geotube®. *Environmental Dredging and Remediation Tencate Geotube® Case Studies*, 2021.

Turovskiy, Izrail S., and P. K. Mathai. *Wastewater sludge processing*. John Wiley & Sons, 2006.

União Europeia, Diretiva nº 91/271/1991 do Conselho, de 21 de maio de 1991, relativa ao tratamento de águas residuais urbanas. Jornal oficial L 135, 30 de maio de 1991.

Von Sperling, Marcos. *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. IWA publishing, 2007.

Wang, Lawrence K., Nazih K. Shamma, and Yung-Tse Hung. *Biosolids treatment processes*. Humana Pr Inc, 2007.

## ANEXOS

## Curvas de Calibração para determinação de CQO

Na figura 75 encontra-se a folha de calibração com a respetiva reta de calibração para determinação de CQO em gama alta.

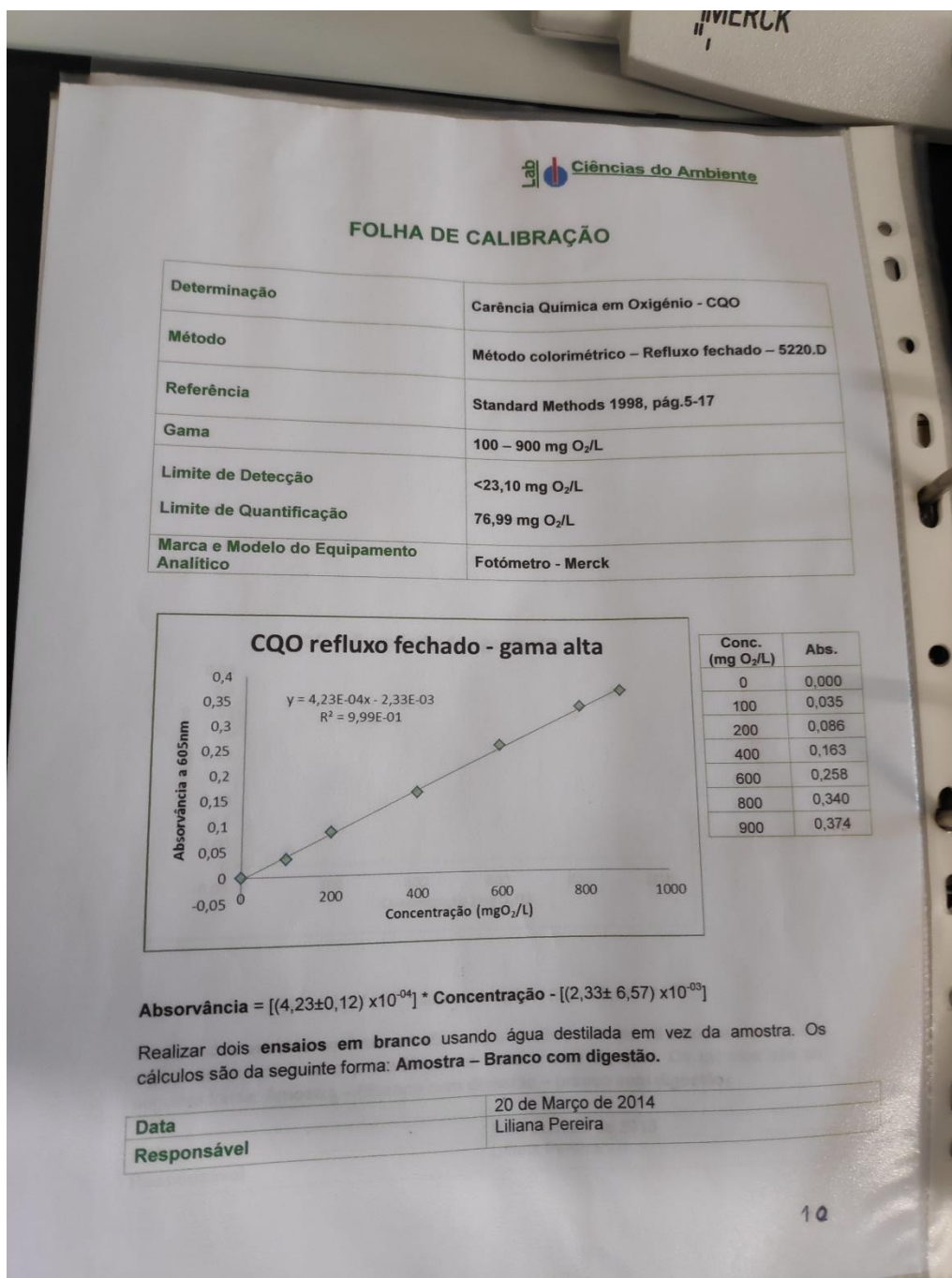


Figura 75 - Folha de calibração dos ensaios de determinação da CQO em gama alta

Quanto aos ensaios realizados em gama baixa, a curva de calibração utilizada encontra-se apresentada na figura 76.

## Curva de calibração da CQO

Método colorimétrico após digestão em refluxo fechado

Aparelho: UV - Visible Spectrophotometer UV-1603 SHIMADZU

Técnico(a): Cristina Santos

Data: 28/04/2021

C<sub>solução padrão</sub>: 500 mgO<sub>2</sub>/LV<sub>solução padrão</sub>: 50 mL

λ: 600 nm

Tabela 2 - Valores para gama baixa

CQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Abs
0	0
5	0,0082
10	0,0139
20	0,0212
50	0,0462
70	0,0583
90	0,0757

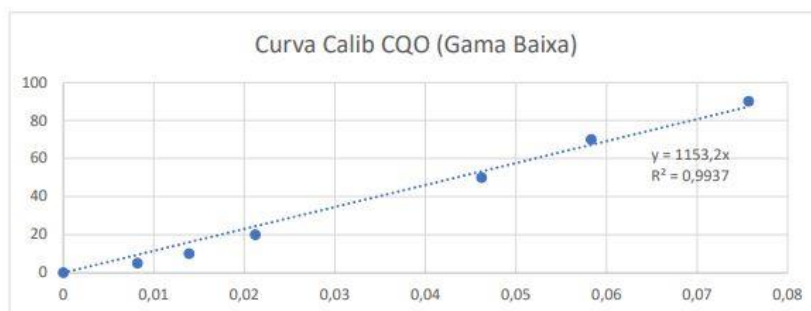


Figura 76 - Curva de calibração para determinação de CQO em gama baixa