

Adaptação de paredes verdes ao tratamento de águas cinzentas com materiais reciclados

David Alexandre Hidalgo Martins

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadoras: Professora: Ana Fonseca Galvão

Professora: Maria Cristina De Oliveira Matos Silva

Júri

Presidente: Prof. Vítor Faria e Sousa

Orientadoras: Prof.^a Ana Fonseca Galvão

Vogal: Prof.^a Helena Maria Rodrigues Vasconcelos Pinheiro

Outubro de 2021

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer às professoras Ana Galvão e Cristina Matos, as minhas orientadoras deste estudo, pela todo o apoio e orientação dados, sem estes não seria possível ter realizado este estudo.

Gostaria também de agradecer à Minigarden, LDA pelo fornecimento dos módulos que constituem a parede Verde.

E por último gostaria de agradecer às minhas colegas Andreia Rodrigues e Joana Ferreira, por todo o apoio dado em termos laboratoriais.

Resumo

O aumento da população mundial e consequente aumento do consumo de água e de águas residuais, levam à necessidade de encontrar novos meios que permitam reduzir a pressão gerada sobre os recursos hídricos e sistemas de tratamento de águas residuais. Um dos meios que tem vindo a ganhar cada vez mais ênfase é a utilização de paredes verdes para o tratamento de águas cinzentas.

Esta dissertação tem como objetivo estudar a viabilidade de uma parede verde à escala laboratorial, adaptada para o tratamento de águas cinzentas, focando-se em analisar dois elementos importantes do sistema, meio de enchimento e espécie de plantas. Para cada um destes elementos foram utilizadas duas soluções diferentes, os meios de enchimento utilizados foram telhas cerâmicas com fibras de coco e por fim fibras têxteis de algodão. Relativamente às plantas as espécies utilizadas foram a *Adiantum capillus-veneris* e *Asplenium onopteris*. Foi feita uma análise para cada meio de enchimento e estudada a influência de cada uma das espécies de plantas em cada um dos meios de enchimento de modo a identificar quais os efeitos que estas podem ter na remoção de poluentes.

A instalação de paredes verdes, com meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco com a espécie *Asplenium onopteris*, apresenta um enorme potencial para o tratamento de águas cinzentas, mas que ainda pode ser otimizado. As fibras têxteis são um bom material para retenção de sólidos suspensos, mas não são o material mais indicado para a instalação de plantas.

Palavras-chave: água cinzentas, paredes verdes, sustentabilidade, reutilização, remoção de poluentes

Abstract

The increase of the world population and the consequent increase in the consumption of water and urban and domestic wastewater, lead to the need to find new means that reduce the pressure generated on water resources and wastewater treatment systems. One of the means that has been gaining more and more emphasis is the use of green walls for the treatment of greywater.

This dissertation aims to study the feasibility of a laboratory scale green wall, adapted for the treatment of greywater, focusing in analyzing two important elements of the system, filling media and plant species. For each of these elements, two different solutions were used, the filling medias used were ceramic tiles with coconut fibers and cotton textile fibers. Regarding the plants, the species used were *Adiantum capillus-veneris* and *Asplenium onopteris*. An analysis was carried out for each type of filling medium and the influence of each plant species in each one, in order to identify the effects they may have on the removal of pollutants.

The installation of green walls with filling media of ceramic tiles and coconut fibers with the *Asplenium onopteris* species, presents an enormous potential for the treatment of greywater, but it can still be optimized. Textile fibers are a good material for retaining suspended solids, but they are not suitable material for plant installation.

Keywords: greywater, green walls, sustainability, reuse, pollutant removal

Índice

Declaração	iii
Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice	xi
Índice de figuras	xiii
Índice de tabelas	xiv
Lista de acrónimos	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos da dissertação	1
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2. Revisão bibliográfica	3
2.1 Caracterização águas cinzentas	3
2.1.1 Definição águas cinzentas	3
2.1.2 Volumes produzidos	3
2.1.3 Tipos de reutilização.....	4
2.2 Qualidade das águas cinzentas	5
2.3 Legislação e normas de qualidade.....	9
2.4 Tecnologias de tratamento de águas Cinzentas	12
2.4.1 Tratamentos físicos	12
2.4.2 Tratamentos biológicos	15
2.4.3 Tratamentos químicos.....	17
2.4.4 Escolha de tecnologia intensiva para tratamento de AC	19
2.5 Sistemas de tratamento natural extensivo de águas cinzentas	20
2.5.1 Características hidráulicas	20
2.5.2 Meio de enchimento	23
2.5.3 Vegetação	23
2.5.4 Paredes verdes	24
2.5.5 Casos de estudo.....	25
3. Metodologia e materiais utilizados	29
3.1 Caracterização da parede verde	29
3.1.1 Meio de suporte	29
3.1.2 Meio de enchimento	31
3.1.3 Vegetação	32
3.1.4 Escoamento.....	33
3.1.4.1 Tracer test	35

3.2 Caracterização águas cinzentas	36
3.2.1 Amostras.....	37
3.2.2 Parâmetros e métodos	37
3.2.2.1 Parâmetros imediatos.....	37
3.2.2.2 SST e SSV	38
3.2.2.3 CQO.....	39
4. Resultados e discussão.....	41
4.1 Adaptação das plantas	41
4.2 Ensaio de porosidade	42
4.3 Tracer test	43
4.4 Parâmetro imediatos	44
4.5 SST e SSV	51
4.6 CQO.....	57
4.7 Comparação com estudos anteriores	59
5. Conclusão.....	61
5.1 Perspetivas futuras.....	62
Referências	63
Anexos.....	66
ANEXO A – Ensaio de porosidade	67
ANEXO B – <i>Tracer test</i>	68
ANEXO C – Ingredientes águas cinzentas	70
ANEXO D – Valores condutividade elétrica	71
ANEXO E – Valores de pH.....	72
ANEXO F – Valores de OD e %OD	73
ANEXO G – Valores de SST e SSV.....	74
ANEXO H – Valores de CQO.....	75

Índice de figuras

Figura 1 - Distribuição do consumo de água numa residência (Amman, 2006).	4
Figura 2 - Consumo de água por setor em Portugal (Fundação Calouste Gulbenkian, 2020.).....	5
Figura 3 - Seleção de tratamentos para utilização de águas cinzentas (fonte: de Almeida Soares et al., n.d.).	19
Figura 4 - Esquema de uma ZHCSSH (adaptação: Nivala et al., 2017).....	21
Figura 5 - Esquema de uma ZHCSSV (adaptação: Nivala et al., 2017).....	21
Figura 6 - Parede verde exterior, França.....	24
Figura 7 - Parede verde, Pune.....	25
Figura 8 - Parede verde, IST.....	27
Figura 9 - Módulo Parede verde Minigarden.	29
Figura 10 - Adaptação feita para isolamento entre potes.	30
Figura 11 - Adaptações feitas na base e no topo dos módulos.	30
Figura 12 - Meio de enchimento em telhas cerâmicas e fibras de coco (esquerda) e meio de enchimento em fibras têxteis (direita).	31
Figura 13 - Plantas utilizadas, <i>Adiantum capillus-veneris</i> (esquerda) e <i>Asplenium onopteris</i> (direita).....	33
Figura 14 – Sistema de bombagem.....	34
Figura 15 - Sistema de irrigação (esquerda) e de escoamento (direita).....	35
Figura 16 - Ensaio tracer test.	36
Figura 17 - Bidon utilizado para a produção de AC.	37
Figura 18 - Sondas utilizadas, A) YSI 556, B) Pro DO, C) Hatch EC5 DL e D) Hatch PH1.....	38
Figura 19 - Procedimento do ensaio de calculo dos sólidos suspensos: A – Sistema de filtragem; B – Mufla; C – Balança digital; D – Analisador de humidade.....	39
Figura 20 - Pormenor visto de cima da instalação de uma das plantas.	41
Figura 21 – Evolução das plantas ao longo do estudo.....	42
Figura 22 - Valores de pH ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.	45
Figura 23 - Valores de pH ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.	46
Figura 24 - Comparação de valores de pH, ao longo do tempo, entre meios de enchimento.	46
Figura 25 - Valores da temperatura ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco. ..	48
Figura 26 - Valores da temperatura ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.....	48
Figura 27 - Valores de OD ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.	49
Figura 28 - Valores de OD ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.....	50
Figura 29 - Valores de SST ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.	52
Figura 30 - Valores de SST ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.	52
Figura 31 - Remoção de SST ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.	53
Figura 32 - Remoção de SST ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.	54
Figura 33 - Valores de SSV ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.....	55
Figura 34 - Valores de SSV ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.....	55
Figura 35 - Remoção de SSV ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.....	56
Figura 36 - Remoção de SSV ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.....	56
Figura 37 - Valores de CQO ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.	58
Figura 38 - Valores de CQO ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.	58
Figura 39 - Remoção de CQO ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.	59
Figura 40 - Remoção de CQO ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.....	59

Índice de tabelas

Tabela 1 - Características das águas cinzentas e águas residuais (Lowe, 2009; Ramprasad et al., 2017; Metcalf e Eddy et al,1991).	6
Tabela 2 - Contribuição de CBO e CBO por diferentes fontes de água (fonte:Ghaitidak & Yadav, 2013).	7
Tabela 3 -Tipos de classe para uso de águas residuais tratadas (Decreto-Lei nº119/2019).	10
Tabela 4 - Normas de reutilização de águas residuais tratadas para os países descritos (de Almeida Soares et al., n.d.; Morel & Diener, 2006; Santos et al., 2012).....	11
Tabela 5 - Eficiência de remoção de alguns parâmetros para diferentes sistemas de tratamento físico de águas residuais (Gorgich & Nuno Formigo, 2016; Li et al., 2009).....	14
Tabela 6 - Eficiência de remoção de alguns parâmetros para diferentes sistemas de tratamento biológico de águas residuais (Boyjoo et al., 2013; Li et al., 2009)	16
Tabela 7 - Eficiência de remoção de alguns parâmetros para diferentes sistemas de tratamento químico de águas residuais (Li et al., 2009).	18
Tabela 8 - Desempenho das zonas húmidas construídas no tratamento de AC (adaptação Arden & Ma, 2018).	22
Tabela 9 -Eficiência de remoção de AC com alguns materiais de meio de enchimento (Masi et al., 2016).....	26
Tabela 10 - Valores médios ponderados de SST, SSV e CQO (Ribeiro Pissarra et al., 2019).	27
Tabela 11 – Resultados eficiência de remoção de cada meio de enchimento dos respetivos estudos	28
Tabela 12 - Características hidráulicas da parede verde.	34
Tabela 13 - Composição das águas cinzentas.....	36
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de porosidade nos materiais selecionados.	43
Tabela 15 – Valores de TRH de cada linha.	43
Tabela 16 - Resultados dos parâmetros imediatos de cada linha à saída (média ± desvio padrão).....	44
Tabela 17 - Resultados estatísticos da temperatura em cada linha (média ± desvio padrão).	47
Tabela 18 - Resultados estatísticos de OD e %OD em cada linha (média ± desvio padrão).	50
Tabela 19 - Resultados estatísticos de SST em cada linha (média ± desvio padrão).	51
Tabela 20 - Resultados estatísticos de SSV em cada linha (média ± desvio padrão).....	54
Tabela 21 - Resultados estatísticos de CQO em cada linha (média ± desvio padrão).	57
Tabela 22 - Valores médios de SST, SSV e CQO	60

Lista de acrónimos

AC	Águas Cinzentas
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CBO	Carência Bioquímica de Oxigénio
CAG	Carbono Ativado Granular
CE	Condutividade Elétrica
CF	Coliformes Fecais
CT	Coliformes Totais
CQO	Carência Química de Oxigénio
E.coli	<i>Escherichia coli</i>
FBR	<i>Fluidized Bed Reactor</i>
MBR	<i>Membrane Bioreactor</i>
MIEX	<i>magnetic ion exchange</i>
N	Azoto
NT	Azoto Total
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
OD	Oxigénio Dissolvido
OMS	Organização Mundial de Saúde
P	Fósforo
PG	Propileno Glicol
PT	Fósforo Total
DSS	Dodecil Sulfato de Sódio
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
TMA	trimetilamina
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor</i>

UFC	Unidade Formadora de Colónias
ZHC	Zonas Húmidas Construídas
ZHCS	Zonas Húmidas Construídas Escoamento Superficial
ZHCSSH	Zonas Húmidas Construídas Escoamento Subsuperfície Horizontal
ZHCSSV	Zonas Húmidas Construídas Escoamento Subsuperfície Vertical

1. Introdução

1.1 Motivação

Devido à crescente escassez de água potável e o crescimento contínuo da população mundial e do seu consumo de água, torna-se necessário de arranjar meios de equilibrar a pressão crescente sobre o meio ambiente e os seus recursos hídricos, de modo a satisfazer as necessidades do ser humano e garantir um crescimento sustentável sem pôr em risco o futuro das gerações seguintes.

Segundo a Unicef, cerca de 35% da população mundial não tem acesso a água tratada e 43% mundial não tem acesso a serviços básicos de saneamento tornando estas expostas a doenças como a febre tifoide e cólera. Segundo a WWF (*World Wild Fund for Nature*), 2 milhões de pessoas morrem todos os anos, sendo a maioria crianças, de diarreia devido à falta de água e de saneamento.

As alterações climáticas são um fator que também contribui para a escassez de água, com o aumento das temperaturas e consequentes períodos de seca mais frequentes, mais prolongados e mais abrangentes, tornam vários países e respetivos cidadãos mais suscetíveis à escassez de água. Segundo o *World Resources Institute*, numa projeção para 2040, indica que Portugal encontra-se com elevado risco de stress hídrico, principalmente o sul do país, em risco de não conseguir responder às necessidades do país.

Neste contexto, a implementação de novas alternativas que permitam a redução da pressão sobre a captação de água assume elevada relevância. A reutilização de águas residuais apresenta um enorme potencial, em particular em meio urbano onde apresentam um fluxo de produção aproximadamente contínuo, mas não constante, podendo ser utilizadas para diversos fins não potáveis, como autoclismos ou sistemas de incêndio. As águas cinzentas (AC) representam cerca de 70% do consumo doméstico, a reutilização destas seria uma solução que permitiria reduzir substancialmente a pressão sobre sistemas de drenagem e de tratamento.

A utilização de paredes verdes em meio urbano, constituem uma alternativa descentralizada aos sistemas de tratamento de águas residuais, para além de serem uma nova fonte de água recuperada, estas também contribuem para o incremento de estruturas verdes nas cidades.

1.2 Objetivos da dissertação

O objetivo da presente tese de mestrado prende-se com o estudo do funcionamento e viabilidade de uma parede verde que utilize materiais reciclados como meio de suporte das plantas, para o tratamento e posterior reutilização de AC, através de um modelo à escala laboratorial, para que sirva de base para futuros estudos em maiores escalas.

No mesmo estudo são comparados vários elementos constituintes da parede verde de modo a compreender qual a influência no desempenho do sistema, em termos da capacidade de tratamento das AC . Estes elementos podem ser divididos em dois grupos, primeiro o meio de enchimento e o segundo, vegetação.

No que diz respeito ao meio de enchimento foram estudados dois meios de enchimento diferentes: telhas cerâmicas com fibras de coco e apenas fibras têxteis. Relativamente à vegetação também foram estudadas duas espécies de vegetação, *Adiantum capillus-veneris* e *Asplenium onopteris*. Para além da avaliação do desempenho individual de cada um destes dois grupos também foi feita a avaliação da combinação de cada meio de enchimento com cada espécie de plantas a fim de se obter a melhor combinação destes dois para o tipo de tratamento que se pretende.

Como indicado, para a avaliação da eficiência da parede verde para o tratamento de águas cinzentas houve necessidade de avaliar alguns parâmetros das águas, entre os quais se incluem pH, sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos voláteis (SSV), Condutividade elétrica (CE), carência química de oxigénio (CQO), oxigénio dissolvido (OD) e temperatura.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos principais e ainda 2 capítulos adicionais respetivos às referências bibliográficas e aos anexos. O presente capítulo tem um carácter introdutório, explicando as motivações, os objetivos e a respetiva estrutura do estudo realizado.

No capítulo 2 será feita a revisão bibliográfica, fazendo uma revisão aprofundada dos conceitos fundamentais que suportam o estudo e compreensão da presente dissertação. Neste capítulo será feita uma introdução aos volumes de água consumidos diariamente, definição e caracterização das águas cinzentas e de todos os elementos precedentes à sua reutilização, desde os processos e tipos de tratamentos envolvidos, legislação atualmente em vigor e apresentando ainda alguns casos de estudo.

O capítulo 3 terá como objetivo fazer a caracterização da parede verde estudada, desde a sua estrutura aos materiais constituintes. Neste capítulo também será feita a caracterização e descrição de todos os métodos e processos utilizados para a realização e acompanhamento deste estudo de modo a atingir os objetivos do mesmo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos ao longo do estudo para cada um dos parâmetros medidos e as respetivas análises aos valores obtidos, estabelecendo uma comparação entre cada tipo de enchimento e espécies de plantas.

Por fim, no capítulo 5 serão tiradas as conclusões finais sobre a viabilidade deste estudo e ainda apresentadas algumas indicações e considerações quanto a possíveis trabalhos futuros.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Caracterização águas cinzentas

2.1.1 Definição águas cinzentas

As águas cinzentas são designadas como as águas residuais domésticas à exceção das águas provenientes de autoclismos, ou seja: águas provenientes de lavatórios, banheiras, chuveiros, máquinas de lavar roupa e de louça. Alguns autores consideram que águas provenientes de lavatórios de cozinha e de máquinas de lavar roupa e louça não são consideradas devido à sua elevada concentração de matéria orgânica, óleos, gorduras, fibras de roupa e detergentes, requerendo maior tratamento. Como tal, as AC podem ser divididas em águas cinzentas leves (*light*) e misturadas (*mixed*) que contêm então as águas provenientes dos lavatórios de cozinha e de máquinas de lavar roupa e de louça (Arden & Ma, 2018; Boano et al., 2020; Ghaitidak & Yadav, 2013).

2.1.2 Volumes produzidos

O volume de AC produzido está dependente de vários fatores tais como: os hábitos sociais e diários de cada população, abundância de água potável disponível e a localização geográfica (Amman, 2006, Kurniawan et al., 2021). Estima-se que em países mais desenvolvidos com maior acesso a água potável e mais infraestruturas, cada pessoa consome em média entre 90 a 120 litros de água por dia e em países em desenvolvimento, com menor acesso a água potável, cada pessoa consome em média entre 20 a 30 litros água por dia (Morel & Diener, 2006).

O consumo de água mesmo dentro de um dado país pode variar consoante a área de residência, onde geralmente cidades com maiores dimensões têm tendência a ter um maior consumo por pessoa do que cidades de menores dimensões, num estudo realizado na Hungria verificou se que em cidades de maiores dimensões, em média, cada pessoa consome entre 100 a 110 litros por dia e em cidade de menores dimensões, cada pessoa consome entre 50 a 70 litros por dia (Ungvári et al., 2019).

Estima-se que as águas cinzentas representam entre 50% a 80% do total de águas residuais domésticas produzidas o que representa uma grande percentagem de água com potencial de ser reutilizada, o que permitira uma grande redução do consumo de água potável (Eriksson et al., 2002; Oron et al., 2014). Na Figura 1 está representada a percentagem estimada dos tipos de consumo de água numa residência.

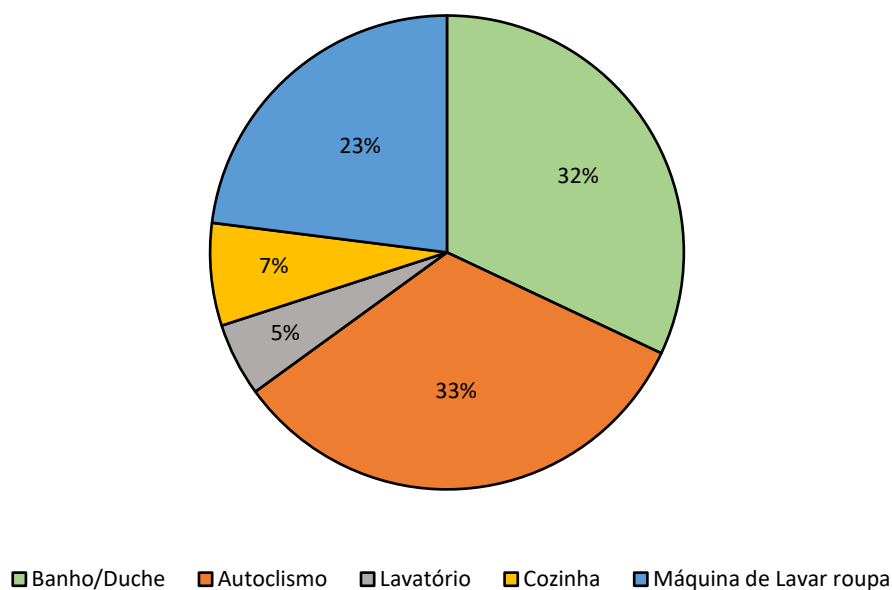


Figura 1 - Distribuição do consumo de água numa residência (Amman, 2006).

2.1.3 Tipos de reutilização

A reutilização de AC é um potencial meio de reduzir substancialmente a utilização de água potável para fins que não sejam de consumo humano ou outros fins que não necessitem de qualidade elevada para a sua reutilização. Existem várias possibilidades de reutilização, tais como: água para autoclismos, urinóis, rega de campos, jardins, entre outros.

O uso de AC apenas para urinóis e autoclismos representa uma redução de cerca de 30% do consumo total de água de uma habitação. A sua reutilização poderá reduzir os custos e a quantidade de água necessária a ser tratada em ETAR ou em outro tipo de infraestruturas (Eriksson et al., 2002; Ungvári et al., 2019, Amman, 2006).

Apesar de a reutilização de águas cinzentas não ser para consumo humano, pode apresentar riscos se não houver cuidados relativamente ao tipo de uso a que será dado. A irrigação com AC para pode acarretar riscos ambientais, como a contaminação dos solos e poluição de poços de água.

Em Portugal, o consumo de água para a agricultura (incluindo a pecuária) é o sector que utiliza maior percentagem de água (Figura 2). Apesar do desenvolvimento de técnicas de irrigação mais eficientes que permitem a redução do desperdício de água para irrigação (Marecos Do Monte, 2007), a utilização de AC para irrigação de campos agrícolas iria permitir uma grande redução da quantidade de água potável utilizada para tal.

percentagem estimada da distribuição do consumo de água em Portugal

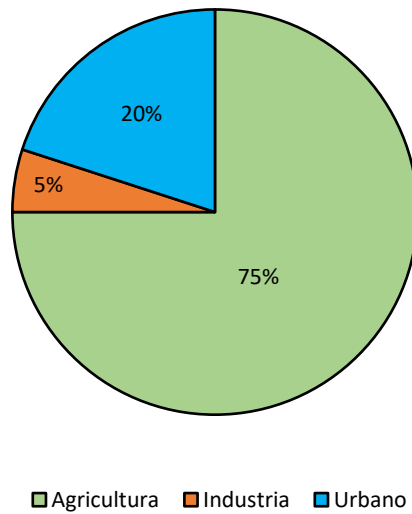


Figura 2 - Consumo de água por setor em Portugal (Fundação Calouste Gulbenkian, 2020.)

2.2 Qualidade das águas cinzentas

A qualidade das águas pode ser avaliada segundo parâmetros físicos, químicos e biológicos. A qualidade está fortemente dependente do tipo de utilização de onde esta provém, sendo necessário garantir os parâmetros de qualidade para o tipo de utilização onde será aplicada, sem pôr em risco a saúde pública e os ecossistemas.

Em comparação com as águas residuais domésticas, as AC apresentam concentrações bastante inferiores dos vários parâmetros utilizados para avaliar a qualidade das mesmas. Na tabela 1 é apresentada a comparação entre as ACs e águas residuais domésticas para os diferentes parâmetros analisados.

Grande parte das substâncias presentes nas AC provêm geralmente de produtos de limpeza, higiene pessoal, detergentes, peles, fibras de roupas, entre outras. Todas estas são facilmente biodegradáveis o que requer que o tratamento das AC não seja muito retardado, pois poderá desencadear reações que provocam maus cheiros.

Tabela 1 - Características das águas cinzentas e águas residuais (Lowe, 2009; Ramprasad et al., 2017; Metcalf e Eddy et al, 1991).

Parâmetro	Unidades	Águas cinzentas não	Águas residuais
		tratadas	domésticas
pH	—	7,24 – 8,34	6,4 – 10,1
CQO	mgO ₂ /L	216 - 320	139 - 4584
CBO	mgO ₂ /L	68 - 120	112 - 1101
SST	mg/L	50 - 300	22 - 1690
SSV	mg/L	10,9 – 137,5	-
NT	mg/L	17 – 28,82	9 - 240
NH ₄ ⁺	mg/L	10,28 – 14,56	2.1 – 121,1
NO ₃ ⁻	mg/L	12,32 – 7,84	0 – 37,6
PT	mg/L	2,934 – 3,84	0,2 - 32
CF	(UFC/100ml)	50 - 120	10 ⁶ – 10 ⁹
DSS	mg/L	14,95 – 35,89	-
PG	mg/L	11,58 – 46,59	-
TMA	mg/L	8,67 – 15,54	-

Em seguida será feita a descrição de alguns dos parâmetros mais importantes a ter em conta para a avaliação da qualidade da água.

pH

O pH é uma escala logarítmica que determina se uma solução é ácida, neutra ou alcalina, a partir da concentração de íões de hidrogénio presentes ((Morel & Diener, 2006).

Os valores de pH, das AC rondam valores neutros, estão diretamente dependentes do valor de pH da água que chega às residências e dos produtos utilizados em cada atividade. Existem diferenças entre o pH das águas provenientes de lavatórios e banhos/duches que apresentam valores próximos do neutro (entre 6.5 e 7.7) e o pH de águas provenientes das máquinas de lavar roupa e de loiça, estas últimas apresentam valores mais próximos de valores alcalinos (entre 8.2 e 9.3) (Ghaitidak & Yadav, 2013).

Sólidos suspensos

As AC, como é de esperar, têm menor concentração de sólidos suspensos em comparação com as águas residuais domésticas. A presença de partículas de comida, óleos, cabelos e fibras de roupa nas AC levam a que haja moderadas concentrações de sólidos suspensos na água. Um dos parâmetros a

analisar para avaliar a qualidade das AC é a turbidez, que é dependente do teor de sólidos suspensos totais (SST) e voláteis (SSV) na água.

A turbidez é uma propriedade física da água que se traduz na redução da sua transparência devido à presença de sólidos em suspensão. Segundo Arden e Ma (2018) os valores usuais de turbidez em AC variam entre 19 NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez) a 444 NTU.

A concentração de sólidos suspensos totais nas AC geralmente varia entre 50 mg/L e 300 mg/L, estando também bastante dependente da quantidade de água usada, sendo que são as águas provenientes das cozinhas e máquina de lavar roupa e loiça que têm maior contributo para este parâmetro (Morel & Diener, 2006).

Orgânicos

Os parâmetros orgânicos são a carência química de oxigénio (CQO) e carência biológica de oxigénio (CBO). A CQO é uma medição indireta da quantidade de matéria orgânica presente numa amostra de água, correspondendo à quantidade de oxigénio requerido para a oxidação completa da matéria orgânica de uma amostra.

A carência biológica de oxigénio (CBO) é quantidade de oxigénio usado por microrganismos na degradação de matéria orgânica de uma amostra. O CBO é um parâmetro indicador do grau de poluição de uma amostra, quanto maior for o seu valor, menor será a quantidade de oxigénio dissolvido presente na água.

O oxigénio dissolvido (OD) é um parâmetro relacionado com a carga orgânica que mede a quantidade de oxigénio que está dissolvido numa amostra ou é transportado por esta (Gorgich & Nuno Formigo, 2016).

As águas residuais apresentam maiores valores de CQO e CBO em comparação às AC. isto deve-se ao facto de as águas provenientes das sanitas conterem maior carga orgânica. A relação CQO/CBO, é um parâmetro que permite avaliar a biodegradabilidade da carga orgânica de uma amostra, um bom indicativo de biodegradabilidade será correspondente a valores abaixo de 2 ou 2.5. (Morel & Diener, 2006). Na tabela 2 está representada a contribuição de CQO e CBO por diferentes fontes de água.

Tabela 2 - Contribuição de CBO e CBO por diferentes fontes de água (fonte:Ghaitidak & Yadav, 2013).

Parâmetros	Unidades	Lavatórios	Chuveiro	Máquina lavar roupa	Lavatório de cozinha	Máquina de lavar loiça
CBO	mgO_2/L	155 - 205	40,2 - 424	44,3 - 462	40,8 - 890	470 - 4450
CQO	mgO_2/L	386 - 587	77 - 645	58 - 1339	58 - 1340	1296

Nutrientes

No estudo de tratamentos das águas residuais, os nutrientes relevantes para o mesmo são o azoto (N) e o fósforo (P). Ambos podem apresentar concentrações elevadas, tanto nas águas residuais domésticas como nas águas provenientes de indústrias, sendo necessário reduzir a sua concentração.

No tratamento das AC, as concentrações de nutrientes têm um peso menos significativo comparado a outros parâmetros, pois a sua concentração é inferior à concentração presente nas águas residuais domésticas (Ramprasad et al., 2017). Isto deve-se ao facto de o azoto ter origem maioritariamente da ureia que provém das águas das sanitas, sendo que não está incluída como AC, além disso, foi limitada a presença de fósforo nos detergentes, levando a uma baixa concentração de N e P nas AC, a nível nacional.

O P presente nas AC provém maioritariamente dos detergentes usados em máquinas de lavar roupa e loiça, tendo uma concentração entre 2.934 mg/L e 3.84 mg/L. O N geralmente apresenta valores de concentração entre 17 mg/L e 28.82 mg/L (Ramprasad et al., 2017).

Parâmetros biológicos

De modo a garantir que a reutilização de ACs não acarrete riscos de contaminação e coloquem em causa a saúde pública, é necessário identificar poluentes microbiológicos que possam estar presentes nas mesmas. Apesar de as fezes na água proveniente de sanitas serem as principais fontes de microrganismos patogénicos, as mesmas podem surgir nas AC por outros meios. Os principais agentes biológicos a ter em conta na caracterização das águas residuais são: a *Escherichia coli*, os *Enterococcus*, Protozoários, helmintos, coliformes totais (CT) e coliformes fecais (CF).

A quantidade de CT e CF presente nas AC é bastante variável e segundo (Morel & Diener, 2006) os valores de coliformes estão fortemente dependentes da distribuição de idades dos habitantes de uma dada residência, sendo que em residência com bebés e crianças, as mesmas terão maiores concentrações de coliformes.

Os vírus tal como os outros parâmetros também devem ser analisados como indicadores de qualidade das águas, mesmo apesar de haver em muito menor quantidade nas AC face às águas residuais. Este acarretam um grande risco devido à sua capacidade de se replicar facilmente dentro da célula do hospedeiro.

Outros parâmetros

Para além dos parâmetros descritos anteriormente, existem outros a ter em conta na avaliação da qualidade das AC. Um desses parâmetros será a presença de metais pesados, sendo que nas AC é pouco comum encontrar grandes concentrações dos mesmos.

Os tensoactivos são outros elementos presentes nas águas residuais domésticas que se devem ter em conta, estes são responsáveis pela espuma presente nas águas. Entre eles destacam-se propileno glicol (PG), Dodecil Sulfato de Sódio (DSS) e trimetilamina (TMA).

O uso de shampoo, produtos de limpeza e produtos de higiene pessoal contribuem para o aumento da presença de elementos como: cálcio (Ca), potássio (K), enxofre (S) e alumínio (Al). Existem ainda outros poluentes, que apesar de presentes numa concentração muito baixa, devem ter-se em conta dado que são difíceis de se degradar, pelo que podem ser encontrados em aquíferos e em águas superficiais, entre os quais se destacam: plásticos, microplásticos, aditivos de gasolina, entre outros.

2.3 Legislação e normas de qualidade

Apesar do aumento da procura de soluções que permitam a reutilização de águas domésticas e mesmo as provenientes da indústria e agricultura, ainda não existe muita legislação relativamente ao uso de AC. Atualmente, a grande maioria dos países apenas se focou na utilização e tratamento das águas residuais, não sendo específico para a reutilização de águas cinzentas.

A Organização Mundial de Saúde foi das primeiras organizações a criar diretrizes para uso seguro de águas residuais e AC, tendo inclusive lançado quatro volumes relativamente a este tema servindo de base para que cada país desenvolva as suas próprias diretrizes e regulamentação consoante a respetivas necessidades e possibilidades (Amman, 2006).

São poucos ainda os países que começaram a legislar e regulamentar normas e medidas para o tratamento e reutilização das AC e muitas dessas são apenas para casos específicos de reutilização. Alguns países como os EUA (apenas em alguns estados), Jordânia, China, Austrália, Japão, Reino Unido, entre outros.

Devido ao risco de escassez de água em algumas regiões, a União Europeia tem concentrado esforços em possíveis formas de reutilização de água e nas respetivas normas e legislação sem pôr em risco a saúde pública de modo a combater este problema. Esta matéria tem ganho cada vez maior relevância sendo que em 2015 foi publicado um relatório, "*closing the loop – Na EU action plan for the circular economy*", que fez um estudo sobre quais os meios mais adequados a nível europeu de modo a encorajar a reutilização de água bem como definir uma possível regulamentação que permitisse estabelecer normas comuns entre os vários estados-membros. Atualmente a União Europeia já possui alguma regulamentação relativamente à reutilização de águas residuais tratadas, mas é sobretudo para aplicação agrícola e espaços públicos, não abrangendo AC especificamente.

Em Portugal existem poucas normas relativamente ao tratamento e reuso de águas sendo que não existe legislação específica para o tratamento e reutilização de AC. Atualmente a norma disponível é a NP4434, 2006, e que diz respeito à utilização de águas residuais tratadas, não sendo específico a AC mas estas podem enquadrar-se dentro desta categoria. Existe também o decreto-lei nº 119/2019 em que foram definidas normas específicas para a reutilização de águas residuais tratadas para alguns 10

tipos de uso específico tendo por base uma avaliação do risco, tendo definido 6 tipos de utilização (tabela 3). Na tabela 4, estão representadas normas de reutilização de águas cinzentas de alguns países.

Em 2018 a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) elaborou um guia para a reutilização de água para fins não potáveis com o intuito de servir de base para modelos de gestão da produção e reutilização de água não potável e ainda orientação para políticas de gestão de risco das mesmas. Também a Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais (ANQIP) lançou um documento com especificações técnicas para sistemas de AC com uma gama de parâmetros que estas devem cumprir.

Tabela 3 - Tipos de classe para uso de águas residuais tratadas (Decreto-Lei nº119/2019).

Classe	Tipos de Uso
A	A Rega sem restrição de acesso (usos urbanos e agrícolas): rega de culturas consumidas em cru em que a parte consumível está em direto contacto com a água; rega de jardins públicos sem restrição de acesso; rega de jardins privados.
B	Rega com restrição de acesso (usos urbanos e agrícolas): rega de culturas consumidas em cru, que crescem acima do solo, e em que a parte consumível não está em direto contacto com a água; rega de culturas agrícolas destinadas a processamento e de culturas agrícolas não destinadas ao consumo humano, incluindo culturas destinadas ao consumo animal (produção de leite ou carne), exceto suínos; rega de jardins com restrição de acesso, incluindo áreas de lazer e desportivas (e.g. campos de golfe).
C	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): rega de culturas consumidas em cru, que crescem acima do solo, e em que a parte consumível não está em direto contacto com a água; rega de culturas agrícolas destinadas a processamento e de culturas agrícolas não destinadas ao consumo humano, incluindo culturas destinadas ao consumo animal (produção de leite ou carne), exceto suínos.
D	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): produção de sementes, incluindo sementes para uso industrial ou produção de energia
E	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): produção de sementes; rega de áreas de uso naturalmente restrito (e.g., sebes, áreas de contenção (prados em socacos).

Tabela 4 - Normas de reutilização de águas residuais tratadas para os países descritos (de Almeida Soares et al., n.d.; Morel & Diener, 2006; Santos et al., 2012).

		pH	CQO (mgO ₂ /L)	CBO (mgO ₂ /L)	SST (mg/L)	Coliformes fecais (ufc/100ml)	Coliformes totais (ufc/100ml)	E. Coli (ufc/100ml)
OMS	Irrigação restrita	-	-	-	-	-	≤ 10 ⁵	-
	Irrigação não restrita	-	-	-	-	-	≤ 10 ³	-
	Qualidade para beber	6,5 – 8,5	-	-	-	-	-	-
US (EPA – 2012)	Uso restrito	6 – 9	-	< 30	< 30	Não detetável	≤ 200	≤ 200
	Uso não restrito	6 - 9	-	< 10	-	-	≤ 200	-
Austrália		6 - 9	-	20	-	≤ 4	≤ 1	-
Itália		6 – 9,5	100	20	10	-	-	100
Japão		6 – 9	-	10	-	≤ 10	≤ 10	-
Jordânia		6 – 9	100	30	50	-	100	100
Reino Unido		5 – 9,5	-	-	-	-	10	-
Portugal	A	-	-	≤ 10	≤ 10	-	≤ 10	-
	B	-	-	≤ 25	≤ 35	-	≤ 100	≤ 100
	C	-	-	≤ 25	≤ 35	-	≤ 1000	≤ 1000
	D	-	-	≤ 25	≤ 35	-	≤ 10000	≤ 10000
	E	-	-	≤ 40	≤ 60	-	≤ 10000	≤ 10000

2.4 Tecnologias de tratamento de águas Cinzentas

O tratamento necessário a ser aplicado de modo a garantir a qualidade para a reutilização das AC é diferente consoante o tipo de utilização que se pretende dar às mesmas. Águas que tenham como finalidade para consumo humano terão de ter um nível de controlo de qualidade superior a águas cujo seu fim seja para alimentar sistemas de incêndios.

Os processos de tratamento podem ser classificados como: tratamento químico, físico, biológico ou mesmo uma combinação dos anteriores. Segundo (Gorgich & Nuno Formigo, 2016) existem 3 fases de tratamento: pré-tratamento, tratamento principal e pós tratamento.

O pré-tratamento é a primeira fase de tratamento e que tem como principal objetivo fazer a filtração de partículas de grandes dimensões, óleos e gorduras. Este é constituído por fossas sépticas, filtros ou outros elementos que possam reter partículas que poderiam levar ao entupimento de tubagens.

O tratamento principal terá como função reduzir a carga orgânica, que não é possível remover através do pré-tratamento, e os nutrientes (como o N e o P) em excesso nas águas.

Por fim o pós-tratamento terá como finalidade a desinfecção das águas e remoção de elementos microbiológicos e elementos que não sejam biodegradáveis, de modo a garantir concentrações de parâmetros microbiológicos que não apresentem riscos para a saúde humana e os ecossistemas (Gorgich & Nuno Formigo, 2016; Morel & Diener, 2006).

2.4.1 Tratamentos físicos

Os tratamentos físicos funcionam como barreiras que retêm partículas, sendo constituídos por 2 fases: filtração e sedimentação. Os tratamentos físicos não são suficientes para garantir a qualidade das AC, pois não garantem a desinfecção das mesmas nem a redução de nutrientes e tensioactivos. A eficiência deste tipo de tratamentos está dependente da dimensão dos poluentes e dos poros dos filtros. Filtros com menor dimensão de poros garantem melhor qualidade da água afluente. Estes processos de tratamento são geralmente usados na fase de pré-tratamento, podendo também ser usados na fase de tratamento principal.

A filtração pode ser feita através de membranas para reter partículas de menor dimensão, ou através de métodos mais grosseiros como: filtros de areia ou de outro tipo de solos, gradagens e zonas húmidas construídas. Os métodos mais grosseiros atingem resultados menos eficientes face a outros métodos como as membranas, pelo facto anteriormente indicado, de terem maior dimensão de abertura.

As membranas face a métodos mais grosseiras requerem maior manutenção por se colmatarem mais facilmente. O ideal seria usar um sistema que combinasse ambos os métodos. Na tabela 5 apresenta-se a eficiência de remoção de alguns parâmetros para cada tratamento físico. Os tratamentos físicos

representados, são sistemas avançados, alguns dos quais podem ser utilizados para produzir água com qualidade equivalente a água potável.

Tabela 5 - Eficiência de remoção de alguns parâmetros para diferentes sistemas de tratamento físico de águas residuais (Gorgich & Nuno Formigo, 2016; Li et al., 2009).

Sistema de tratamento	CQO (mgO ₂ /L)			Turbidez (NTU)			SST (mg/L)			
	Afluente	Efluente	%RE	Afluente	Efluente	%RE	Afluente	Efluente	%RE	
Sistema torre de Mulch	-	-	26	-	-	-	-	-	52	
Microfiltração (0.1 µm)	75,4	8,5	88,7	82	0	100	-	-	-	
Ultrafiltração	400 kDa	75 – 265	54 – 102	45,2	14,6 – 35,3	1 – 1,9	9,3	-	-	-
	300 kDa	42,2	5,6	86,7	6,9	0,2	97,1	-	-	-
	30 – 200 kDa	-	-	45 - 70	-	-	92 - 97	-	-	-
	15 kDa	41 – 85,9	7,2 – 15,6	68 – 91,6	6,2 – 18,1	0 – 0,7	96,1 - 100	-	-	-
Nano filtração (0.2 kDa)	226	15	93,3	29,5	0,6	98,1	27,6	0	100	

2.4.2 Tratamentos biológicos

Os tratamentos biológicos têm como função remover a carga orgânica transformando-a em biomassa sob a forma de matéria suspensa que pode posteriormente ser removida por processos de sedimentação e filtração. Para além da carga orgânica também reduzem nutrientes como o azoto e o fósforo.

Estes tipos de tratamentos podem envolver processos aeróbicos e/ou anaeróbicos, ambos geralmente usados no tratamento principal, funcionando à base de fauna microbiana bastante sensível às condições de alimentação, como: pH, oxigénio dissolvido e temperatura do sistema. A combinação de tratamentos aeróbicos seguido de tratamentos de filtração e posterior desinfecção, são vistos como os mais económicos e adequados para o tratamento das AC (Li et al., 2009).

Os processos aeróbicos degradam matéria orgânica através de microrganismos na presença de oxigénio resultando na produção de dióxido de carbono, água e minerais. Os processos aeróbicos são os mais utilizados no tratamento de águas residuais por serem mais rápidos face aos processos anaeróbicos e por obterem maior taxa de remoção de matéria orgânica (TÂNIA CRISTINA RIBEIRO DE SOUSA, 2016). Estes tipos de tratamentos permitem tratar águas com concentrações elevadas de substâncias orgânicas, apresentam menor riscos de emissões de odores face a outros tipos de tratamentos e maior capacidade de absorver substâncias mais difíceis de degradar, mas em contrapartida é necessário que o sistema tenha maior área de implantação para que estes sejam eficazes.

Por sua vez os processos anaeróbicos degradam matéria orgânica através de microrganismos, mas sem a presença de oxigénio, resultando na produção de metano, dióxido de carbono, água e biomassa. Sendo que a produção de biomassa é em menor quantidade face aos processos aeróbicos. Face aos tratamentos aeróbicos, o sistema necessita de menor área de implantação.

Existem vários sistemas de tratamento biológico que combinam processos aeróbicos e/ou anaeróbicos, entre os quais: *Rotating Biological Contactor* (RBC), *Fluidized Bed Reactor* (FBR), *Sequencing Batch Reactor* (SBR), Biorreatores de membranas (MBR), *Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor* (UASB). Na tabela 6 está representada a eficiência de remoção de alguns parâmetros para diferentes sistemas de tratamento biológico.

Tabela 6 - Eficiência de remoção de alguns parâmetros para diferentes sistemas de tratamento biológico de águas residuais (Boyjoo et al., 2013; Li et al., 2009).

Sistema de tratamento	TRH (h)	CQO (mgO ₂ /L)		Turbidez (NTU)		Coliformes totais (ufc/100ml)		NT (mg/L)		PT (mg/L)	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
FBR + desinfecção UV	-	-	-	-	-	1x10 ⁵	<1x10 ⁴	-	-	-	-
Sedimentação +RBC + desinfecção UV	-	-	-	-	-	10 – 1x10 ⁸	< 100	-	-	-	-
MBR	-	109	15	29	0.5	1,4x10 ⁵	68	15,2	5,7	1,6	1,3
UASB	12	645 – 1021	307 - 477	-	-	-	-	14 – 6,4	17 – 51	3,9 – 9,3	3,8 – 6,8
	7	623 – 1031	348 - 78	-	-	-	-	18,9 – 40,9	22 – 42	4,4 – 7,2	4,4 – 7,8
SBR	12	645 - 1021	35 - 129	-	-	-	-	14 – 68,4	11 – 51	3,9 – 9,3	2 – 6,8
	6	623 - 1031	67 - 133	-	-	-	-	18,9 – 40,9	13 – 39	4,4 – 7,2	4,1 – 7,5

2.4.3 Tratamentos químicos

Estes tipos de tratamentos têm ganho cada vez mais atenção, mas devido ao seu custo ainda não têm um peso tão representativo comparativamente aos tratamentos anteriormente referidos (Boyjoo et al., 2013). Com este tipo de tratamento é possível reduzir eficientemente os SST, matéria orgânica e tensioactivos presentes nas AC. Os principais processos químicos são: coagulação, floculação, eletrocoagulação, absorção por carvão ativado granulado (CAG) e zeólitos naturais, *magnetic ion exchange* (MIEX) e ainda processos avançados de oxidação como a foto catalítica.

A coagulação e floculação, são processos em que as partículas coloidais se aglutinam em flocos através de um floculante para que sejam removidas com maior facilidade. A coagulação conjuntamente com a absorção podem ser potenciais soluções para a remoção de matéria orgânica dissolvida.

A MIEX é usada no pré-tratamento das águas residuais, é um processo que consiste na troca contínua de iões, mantida em regime permanente pela retirada e regeneração da resina carregada e reutilização desta resina no processo. As propriedades magnéticas da MIEX diferem face a outros tipos de tecnologias de troca de iões tradicionais e pelo facto de as suas partículas terem dimensões 2 a 5 vezes inferiores, obtendo uma área de absorção superior, levam a que a MEIX tenha um processo aglutinação e sedimentação mais rápido e com maior absorção de matéria orgânica (Neale & Schäfer, n.d.).

A oxidação foto catalítica é um processo usado no pós-tratamento das águas residuais que funciona como desinfetante. Este processo consiste na oxidação dos poluentes orgânicos através da exposição de raios ultravioleta que funcionam como fonte de energia conjuntamente com dióxido de titânico (TiO_2) como catalisador.

Em geral o tratamento de águas residuais com recurso a tratamentos químicos permite reduzir significativamente a concentração de matéria orgânica, sólidos e surfactantes. A maioria destes processos também permitem reduzir significativamente patogénicos que possam estar presentes nas águas, mas em relação ao azoto apresentam uma eficiência bastante baixa (Tabela 7).

Tabela 7 - Eficiência de remoção de alguns parâmetros para diferentes sistemas de tratamento químico de águas residuais (Li et al., 2009).

Sistema de tratamento	CQO (mgO ₂ /L)		CBO (mgO ₂ /L)		Turbidez (NTU)		NT (mg/L)		SST (mg/L)		E. coli (CFU/100mL)		
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
MIEX	791	272	205	33	46,6	8,14	18	15,3	-	-	6,5x10 ³	8	
Eletrocoagulação + desinfecção	55	22	23	9	43	4	-	-	29	9	5,1x10 ³	0	
Coagulação + filtro de areia + CAG	280	20	195	10	-	-	2,8	2,6	35	<5	-	-	
Coagulação	Al	791	287	205	23	46,6	4,28	18	15,7	-	-	6,5x10 ³	<1
	Fe	791	288	-	-	46,6	5,2	18	17,9	-	-	6,5x10 ³	<1
Oxidação foto catalítica (TiO₂)	139	26	-	-	-	-	-	-	-	-	13,4x10 ⁴	1	

2.4.4 Escolha de tecnologia intensiva para tratamento de AC

Como indicado anteriormente existem vários tipos de tratamentos possíveis e vários parâmetros necessários de serem cumpridos de modo a garantir a qualidade das AC. A escolha do tipo de tratamento a ser utilizado está dependente da utilização final a que será dada às AC, da sua origem e composição química.

Cada tipo de tratamento tem as suas vantagens e desvantagens, sendo que na grande maioria das situações o mais indicado será combinar vários tratamentos de modo a obter a qualidade e requisitos necessários para a sua utilização final. Na figura 3 está esquematizado um exemplo de uma possível combinação de diferentes tecnologias para o tratamento de ACs para uso urbano não-potável não restrito.

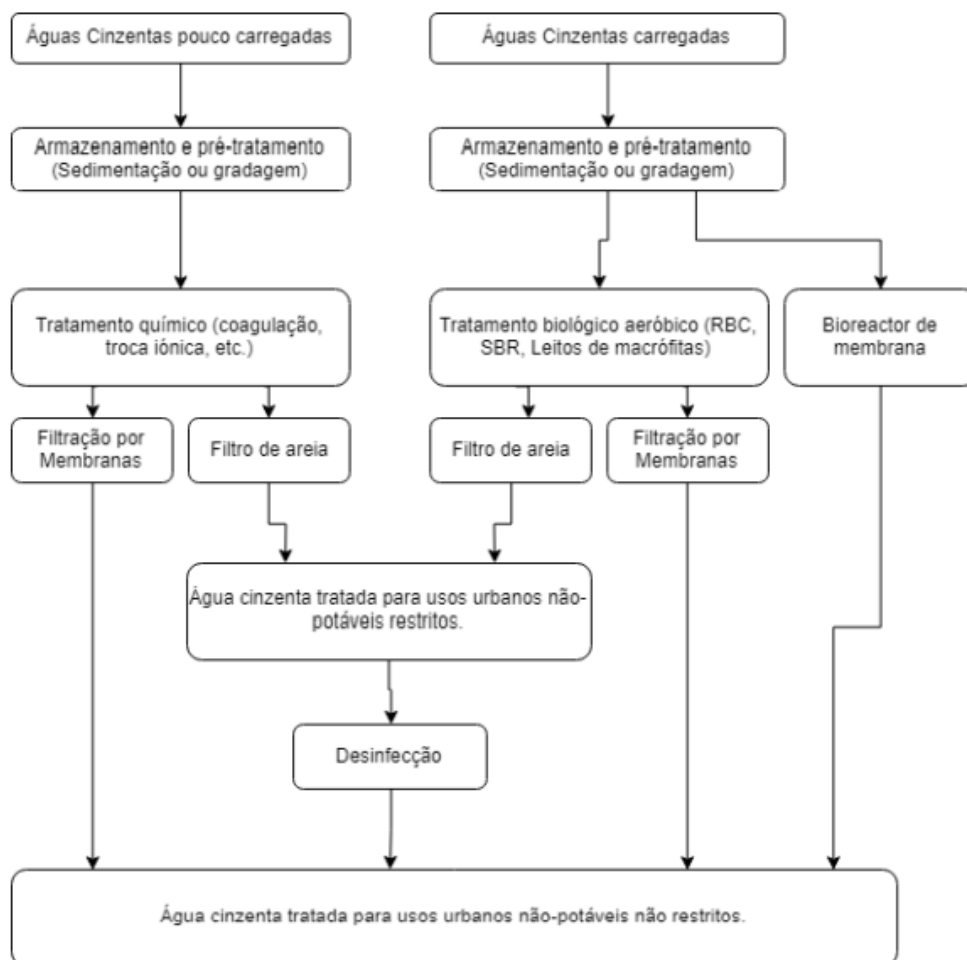


Figura 3 - Seleção de tratamentos para utilização de águas cinzentas (fonte: de Almeida Soares et al., n.d.).

2.5 Sistemas de tratamento natural extensivo de águas cinzentas

Cada vez mais os sistemas de tratamento natural de AC têm vindo a ganhar atenção e interesse, sendo vistos como uma alternativa aos sistemas convencionais de tratamento de água. Estes tipos de sistemas são considerados mais sustentáveis, com menor necessidade de manutenção, com menor custo de manutenção e de implantação face aos sistemas convencionais de tratamento de água (Arden & Ma, 2018; Ramprasad et al., 2017).

Um dos primeiros sistemas de tratamento natural concebidos para AC correspondem à instalação de zonas húmidas construídas. Posteriormente foram construídos outros sistemas como os telhados verdes e as paredes verdes. Estes tipos de sistemas foram posteriormente adaptados a paredes verdes para permitirem a sua utilização em meios urbanos, onde a disponibilidade de espaço é reduzida. No presente estudo a solução estudada é um sistema de parede verde com escoamento subsuperfície vertical.

A eficiência deste tipo de tratamentos deve-se à interação entre os seus vários constituintes que incluem o meio de enchimento e as plantas, promovendo a interação com o biofilme, as condições climáticas e de escoamento, e os nutrientes provenientes das AC, envolvendo a presença simultânea de uma ampla gama de processos físico-químicos e biológicos consoante o tipo de sistema (Boano et al., 2020b).

Seguidamente apresentam-se as principais características das zonas húmidas construídas aplicadas ao tratamento de AC, seguindo-se a descrição da sua adaptação a paredes verdes para o tratamento de AC.

2.5.1 Características hidráulicas

O comportamento hidráulico dos sistemas é um dos fatores fundamentais para o tratamento de águas residuais, estando diretamente ligado ao meio de enchimento, tipo de escoamento e à presença de vegetação.

O tipo de escoamento é uma das características do comportamento hidráulico dos sistemas, podendo ser feito à superfície, denominadas zonas húmidas construídas com escoamento superficial (ZHCS), ou subsuperficial, que se subdivide geralmente em escoamento horizontal, através das zonas húmidas construídas com escoamento horizontal (ZHCSSH), e em escoamento vertical, através das zonas húmidas construídas com escoamento vertical (ZHCSSV).

AS ZHCS são o tipo de sistema que mais se assemelha às zonas húmidas naturais, dado que o escoamento faz-se acima do substrato e à superfície, exposto ao ar livre.

Nas ZHCSSH, o escoamento é feito com fluxo contínuo e a abaixo da superfície através de um substrato poroso que se encontra saturado de água (Figura 4). A água entra por uma ponta do sistema e sai pela

ponta oposta. Devido à elevada saturação do substrato, os processos de degradação biológicos são maioritariamente processos anaeróbicos condicionando a sua eficiência em termos da redução de N, por outro lado são eficientes em processos de desnitrificação. Este tipo de sistema apresenta boas taxas de remoção de SST e CBO (Nivala et al., 2017).

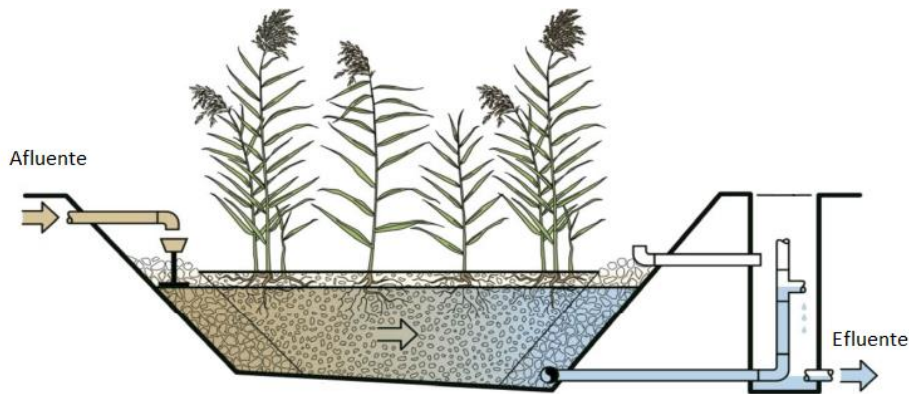


Figura 4 - Esquema de uma ZHCSSH (adaptação: Nivala et al., 2017).

Por sua vez nas ZHCSSV, a água entra pelo topo do sistema, percolando verticalmente pelo substrato poroso sendo por fim recolhida por um sistema de drenagem na base (Figura 5). Neste tipo de solução o fluxo de água que atravessa o sistema é intermitente, originando períodos de descanso, permitindo entrada de ar nos poros do substrato e este não se encontra tão saturado face às ZHCSSH. Devido aos fatores anteriormente indicados, os processos de degradação biológicos são maioritariamente processos aeróbicos, com condições elevadas de oxidação permitindo uma melhor eficiência de remoção de CQO, CBO e N (Nivala et al., 2017).

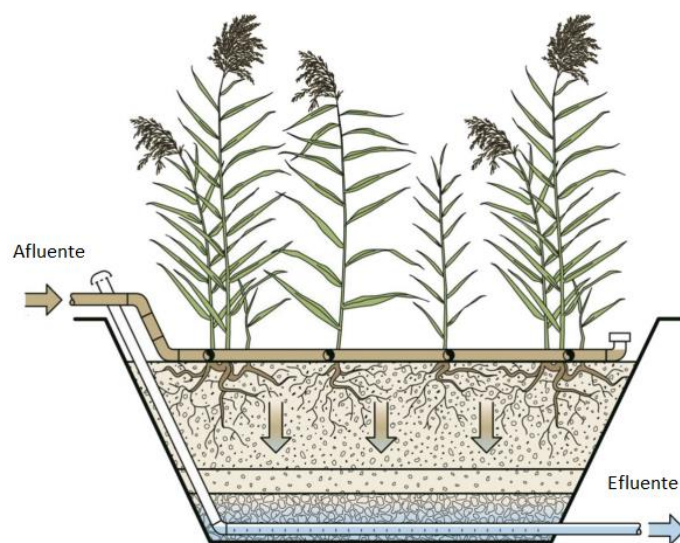


Figura 5 - Esquema de uma ZHCSSV (adaptação: Nivala et al., 2017).

Na tabela 8 estão representados os valores de afluentes, efluentes e taxas de remoção de CBO, SST, NT e *E.coli* para cada um dos 3 tipos de sistemas indicados anteriormente no tratamento de AC.

Tabela 8 - Desempenho das zonas húmidas construídas no tratamento de AC (adaptação Arden & Ma, 2018).

	ZHCS	ZHCSSH	ZHCSSV
TSS (mg/L)	Afluente	17	52
	Efluente	12	21
	RE	25%	64%
CBO (mgO₂/L)	Afluente	84	196
	Efluente	32	25
	RE	63%	87%
TN (mg/L)	Afluente	14	7,2
	Efluente	5,6	4
	RE	59%	44%
E.coli (mg/L)	Afluente	1x10 ⁴	1x10 ⁴
	Efluente	1x10 ^{2.9}	1x10 ^{2.6}
	RE	7,9%	7,9%

Sistemas em que o escoamento seja subsuperficial e horizontal apresentam menores custos de implantação e operação face aos sistemas do mesmo tipo mas com escoamento vertical. Isto deve-se ao fato de que os sistemas com escoamento subsuperficial vertical requererem um design e uma construção mais específica e exigente ao nível do sistema de alimentação, algumas tipologias necessitam de uma fonte de energia para a bombagem do afluente para a entrada do sistema levando à necessidade de uma maior manutenção. Em contrapartida os sistemas com escoamento subsuperfície vertical requerem menor área de implantação (Nivala et al., 2017).

O tempo de retenção hidráulica (TRH), é um dos parâmetros importantes para a eficiência destes sistemas, a qualidade das águas afluentes está fortemente dependente deste. Quanto maior o TRH mais longo é o tempo disponível para a ocorrência de reações químicas e biológicas a que a água estará sujeita, levando a maiores eficiências de remoção de poluentes. Os valores de TRH estão diretamente ligados ao tipo meio de enchimento, à presença e tipo de vegetação e à carga hidráulica.

2.5.2 Meio de enchimento

O meio de enchimento funciona majoritariamente como um sistema de tratamento primário, onde ocorrem processos de filtração. Como indicado anteriormente, o meio de enchimento afeta diretamente o desempenho hidráulico do sistema e conseqüentemente a qualidade de tratamento das águas efluentes. A porosidade do meio de enchimento é um fator a ter em conta, esta afeta a permeabilidade de um dado material.

Permeabilidades mais elevadas ou menos elevadas têm influência no tipo de tratamento a que as AC estão sujeitas. Para meios de enchimento com elevada permeabilidade, haverá menor probabilidade de ocorrer o entupimento do sistema, a água circula mais depressa pelo sistema levando a um TRH menor, sendo que os tipos de remoção de poluentes são majoritariamente processos físico-químicos (Prodanovic et al., 2017a).

Meios de enchimento com permeabilidades baixas, terão TRH mais alto sendo que a água permanece mais tempo dentro do sistema, permitindo que ocorram processos biológicos de degradação de poluentes. Como tal é necessário garantir um equilíbrio da porosidade do meio de enchimento para que haja um tratamento eficiente das águas.

Nos sistemas do tipo parede verde, tipo de sistema utilizado neste estudo, o meio de enchimento serve como suporte físico da vegetação, para este tipo de sistemas é necessário que sejam usados materiais leves de modo que o seu peso próprio não ponha em risco a estabilidade da estrutura de suporte.

2.5.3 Vegetação

Nos sistemas de tratamento natural de ACs a vegetação tem potência no desempenho e eficiência destes, estando fortemente dependente do tipo de vegetação utilizada, havendo necessidade de haver estudos relativamente ao desempenho de cada espécie de plantas de modo a ser utilizada a espécie ou espécies mais adequadas ao tratamento das ACs.

No tratamento de AC, as plantas desempenham várias funções, como: estabilização do substrato; diminuição da velocidade da água, permitindo a sedimentação e controlo do fluxo da água; prevenção do entupimento do substrato; troca de gases entre a atmosfera e sedimentos; e criação de ambiente propício ao crescimento microbiano (Shelef et al., 2012). Estudos realizados até à data indicam que as plantas são as principais responsáveis pela remoção de fósforo, azoto e outros tipos de sais através das suas raízes que absorvem os mesmos.

A escolha das espécies de plantas a usar num leito de macrófitas é de extrema importância, sendo necessário ter em conta vários aspetos: resiliência a condições de alagamento; tolerância às condições locais; tolerância a poluentes e capacidade de remoção dos mesmos; e bom estabelecimento e crescimento das plantas. Duas espécies de plantas que se destacam para o uso em macrófitas são: *Typha latifolia* e *Phragmites australis* (Tanner, 1996).

2.5.4 Paredes verdes

As paredes verdes são um tipo de sistema que tem ganho cada vez mais visibilidade, fazem parte do conceito de criar cidades mais sustentáveis devido aos seus benefícios sociais, ambientais e económicos. Estes tipos de sistemas incorporam vegetação que cresce nas paredes internas ou externas de edifícios ou através de estruturas independentes fixadas à parede (Figura 6).

Segundo (Fowdar et al., 2017) as plantas do tipo trepadeiras e ornamentais apresentam um enorme potencial para sistemas do tipo parede verde e plantas com crescimento rápido são especialmente eficientes na remoção de azoto e mais resistentes a alterações das condições de operação como os períodos de descanso, picos de carga e poluentes. Entre as espécies de plantas, algumas das mais indicadas são: *Adiantum capillus-veneris*, *Strelitzia Nicolai*, *Pandorea jasminoides*, *Ionífera Japónica*, *Canna lilies*, *Asplenium onopteris*, entre outras.

Segundo (Prodanovic et al., 2017a), os custos de construção e de manutenção acrescido ao elevando consumo de água ($0.5-20L/m^2/dia$) têm sido algumas das principais barreiras para implementação das paredes verdes em larga escala.

Uma das várias condicionantes para a implementação de sistemas de tratamento de AC em meios urbanos, é a falta de espaço para a implantação de sistemas que necessitam de uma grande área de implantação. As paredes verdes face a outros tipos de sistemas, como as zonas húmidas construídas, requerem menor área de implantação visto que são sistemas construídos na vertical tirando melhor proveito da sua reduzida área de implantação.

A implantação de paredes verdes traz várias vantagens, a começar pelos efeitos que têm na população em termos de conforto psicológico, o facto de ser um ambiente verde permite criar um ambiente mais próximo da natureza e pelo facto de também funcionarem como barreiras sonoras. Estas também têm um impacto positivo na saúde pública visto que as plantas absorvem CO_2 presente no ar, libertando O_2 e melhorando a qualidade do ar.



Figura 6 - Parede verde exterior, França.

Outra das vantagens associadas à implantação de paredes verdes é que estas permitem controlar a temperatura envolvente. Estas são eficientes em termos de isolamento térmico dos edifícios e devido à evapotranspiração, as plantas são capazes de criar um microclima que reduz as temperaturas circundantes. Durante o verão a sombra criada por estas, e durante o inverno com a redução da circulação do ar, permite reduzir os ganhos ou perdas de calor, o que leva a uma redução de consumo energético para o aquecimento ou arrefecimentos dos edifícios o que contribui para a redução das emissões de gases de estufa.

Segundo Masi et al (2016), se for possível aplicar este tipo de sistemas em larga escala numa cidade, iria se traduzir numa menor dependência de sistemas tradicionais de tratamento de água como as ETAR.

2.5.5 Casos de estudo

A utilização de paredes verdes como sistema de tratamento de água residuais tem ganho cada vez mais atenção. Seguidamente apresentam-se alguns estudos abordam a influência dos vários tipos de materiais utilizados como meio de enchimento e a influência das diversas espécies de plantas.

Pune, India

Em 2016 foram instaladas duas paredes verdes numa das paredes exteriores do edifício de escritório da Maharashtra Jeevan Pradhikaran (departamento de abastecimento de água e saneamento de Maharashtra, India) para avaliar a eficiência de tratamento de AC para posterior reutilização das mesmas (Masi et al., 2016). Cada uma das paredes verdes é composta por uma matriz de 6x12 potes (6 potes em altura e 12 em comprimentos) (Figura 7).



Figura 7 - Parede verde, Pune.

As AC utilizadas foram recolhidas dos lavatórios das casas de banhos do 1º e 2º andar do edifício, sendo armazenadas num tanque de 300L. Diariamente a parede foi alimentada com 10L de AC por 1h. A alimentação da parede foi feita nos potes da linha superior, percolando até à base da base da parede e sendo as águas efluentes posteriormente recolhidas para um tanque com a finalidade de servirem para rega de um jardim adjacente.

O estudo foi dividido em 2 partes, em cada parte foram usados meios de enchimento diferentes. Na 1ª parte do estudo o meio de enchimento usado foi argila expandida (LECA), de modo a garantir que a única fonte de nutriente das plantas seria das AC e não do meio de enchimento. No entanto este meio de enchimento não apresentou resultados satisfatórios (Tabela 9), dado que a redução de CQO e CBO atingiram apenas 18% e 25% respetivamente.

Na 2ª fase do estudo foram usadas 2 combinações de meios de enchimento, uma delas foi 50% de LECA e 50% de fibra de coco e a 2ª foi 50% LECA e 50% de areia. A utilização de destas 2 combinações teve como objetivo aumentar o TRH e favorecer o crescimento de biofilme.

Tabela 9 -Eficiência de remoção de AC com alguns materiais de meio de enchimento (Masi et al., 2016).

		LECA			LECA – Fibra de coco			LECA – Areia		
		Entrada	Saída	% RE	Entrada	Saída	% RE	Entrada	Saída	% RE
SST	mg/L	-	-	-	58.8	45.6	22.4	53.8	48.1	10.6
CBO	mgO ₂ /L	39.7	29.9	24.6	17.1	6.7	53.7	18.6	11.0	44.3
CQO	mgO ₂ /L	84.9	69.4	18.3	48.8	21.4	53.3	43.9	27.7	42.0

Através da Tabela 9, podemos concluir que o acréscimo de fibras de coco e areia ao meio de enchimento base em LECA teve um impacto bastante positivo em termos do tratamento das AC, como indicado anteriormente devido ao aumento do TRH, favorecendo o crescimento de biofilme.

Em termos de comparação entre as 2 combinações, a combinação LECA e fibra de coco apresentou melhores resultados em todos os parâmetros face à combinação LECA com areia, atingindo uma redução de CQO e CDO de 53% e 54% respetivamente.

Parede verde, IST

Outro estudo a ter em conta, foi o estudo de uma parede verde realizado por Pissarra (2019). A parede utilizada foi uma adaptação de uma parede modular da empresa Minigarden, LDA, sendo as AC utilizadas provenientes das instalações sanitários do pavilhão de engenharia civil do IST.

A parede é composta por 3 linhas verticais, todas com meio de enchimento em cortiça granulada e cada uma com carga hidráulica de 0,023 m/h. A linha do meio (linha 2) é apenas composta por meio de enchimento e as linhas da ponta são compostas por meio de enchimento mais plantas. Na linha da esquerda (linha 1) a espécie de planta usada foi a *Asplenium onopteris* e na linha da direita (linha3) foi usada a planta da espécie *Adiantum capillus-veneris* (Figura 8).



Figura 8 - Parede verde, IST.

Na Tabela 10 podemos encontrar os valores médios medidos e eficiência de remoção de cada linha, relativamente a 3 parâmetros: SST, SSV e CQO. Em primeira análise podemos observar que a introdução de ambas as espécies de plantas tiveram um impacto positivo na parede, apresentando valores de eficiência de remoção superiores em todos os parâmetros face à linha só com meio de enchimento (linha 2). Relativamente às espécies de plantas podemos verificar que a linha 1 apresentou valores de eficiência de remoção de SST e SSV , 80% e 79% respetivamente, superiores face à linha 3 que apresentou valores de 79% e 71% respetivamente. Quanto ao CQO tanto a linha 1 e a linha 3 apresentaram valores semelhantes, 52% e 53% respetivamente.

Tabela 10 - Valores médios ponderados de SST, SSV e CQO (Ribeiro Pissarra et al., 2019).

		Entrada	Linha 1	Linha 2	Linha 3
SST	mg/L	19,4 ± 10,3	3,6 ± 2,5	6,1 ± 3,7	5,0 ± 3,2
	RE, %	-	80	64	71
SSV	mg/L	16,8 ± 7,5	3,2 ± 2,1	5,5 ± 3,2	4,4 ± 2,7
	RE, %	-	79	64	71
CQO	mgO ₂ /L	130,7 ± 115,6	47 ± 58,5	50,1 ± 53,3	46,3 ± 59,1
	RE, %	-	52	45	53

Comparando com o estudo referido anteriormente (Pune, Índia), podemos observar que relativamente aos SST todas as linhas apresentaram valores de eficiência de remoção superiores face a todas as soluções apresentadas no 1º estudo. Relativamente ao CQO, tanto a linha 1 e 3 apresentaram valores de eficiência de remoção bastante semelhantes face à solução LECA – fibra de coco que foi a que apresentou valores de remoção mais elevados.

Outros estudos

Nos últimos anos foram realizados diversos estudos destinados a perceber a contribuição de vários tipos de meio de enchimento para o tratamento de AC. Na tabela 11 apresentam-se as eficiências de remoção dos principais parâmetros analisados nos respetivos estudos.

Tabela 11 – Resultados eficiência de remoção de cada meio de enchimento dos respetivos estudos

Referência	Materiais	Eficiência de Remoção (%)				
		CQO	SST	TN	TP	
(Prodanovic et al., 2017b)	Lã de rocha, fibra de coco, perlite, argila expandida, areia de rio	22–70	80 - 90	30 – 75	10 - 60	
(Prodanovic et al., 2018)	Perlite: fibras de coco	1:3; 1:2; 1:1; 2:1	20 - 80	90 - 100	10 – 80	-152 - 42
		3:1; 4:1	40 - 60	79 - 95	20 - 50	-20 - 30
(Pradhan et al., 2020)	Perlite, fibras de coco, LECA, areia, sementes de tâmaras com borras de café	< 65	50 - 85	11 – 42	-	
(Boano et al., 2021)	Carvão ativado granular, biocarvão, poliacrilato	30 - 51	-	30 - 47	-	

3. Metodologia e materiais utilizados

No presente capítulo será feita uma descrição e caracterização da parede verde utilizada nos ensaios experimentais, abordando questões relacionadas com a adaptação da parede, o meio de enchimento e sua respetiva porosidade; bem como os parâmetros e os métodos utilizados.

3.1 Caracterização da parede verde

3.1.1 Meio de suporte

A parede verde utilizada é uma adaptação de um modelo de solução parede verde da empresa Minigarden, LDA (Figura 9), adaptada às condições de escoamento requeridas para este estudo.



Figura 9 - Módulo Parede verde Minigarden.

Cada módulo tem 3 níveis distintos sendo que em cada nível existem 3 potes que foram separados verticalmente por placas de PVC e colados com cola de silicone de modo a não permitir a passagem de água horizontalmente entre cada pote (Figura 10), com a finalidade de o escoamento das AC ser feito apenas na vertical, formando 3 linhas independentes e verticais de escoamento, em cada módulo. O módulo 1, da esquerda, contém as linhas 1 a 3 e o módulo 2, da direita, contém as linhas 4 a 6. A numeração de cada linha é feita da esquerda para a direita.



Figura 10 - Adaptação feita para isolamento entre potes.

Na base de cada nível, foram feitos furos, de modo a melhorar o escoamento entre cada nível, na base do módulo foi feito um furo em cada linha para a introdução dos tubos de saída da água. No topo da estrutura também foram feitos furos de modo a permitir a entrada de água pelo topo e dos respectivos tubos de bombagem (Figura 11).

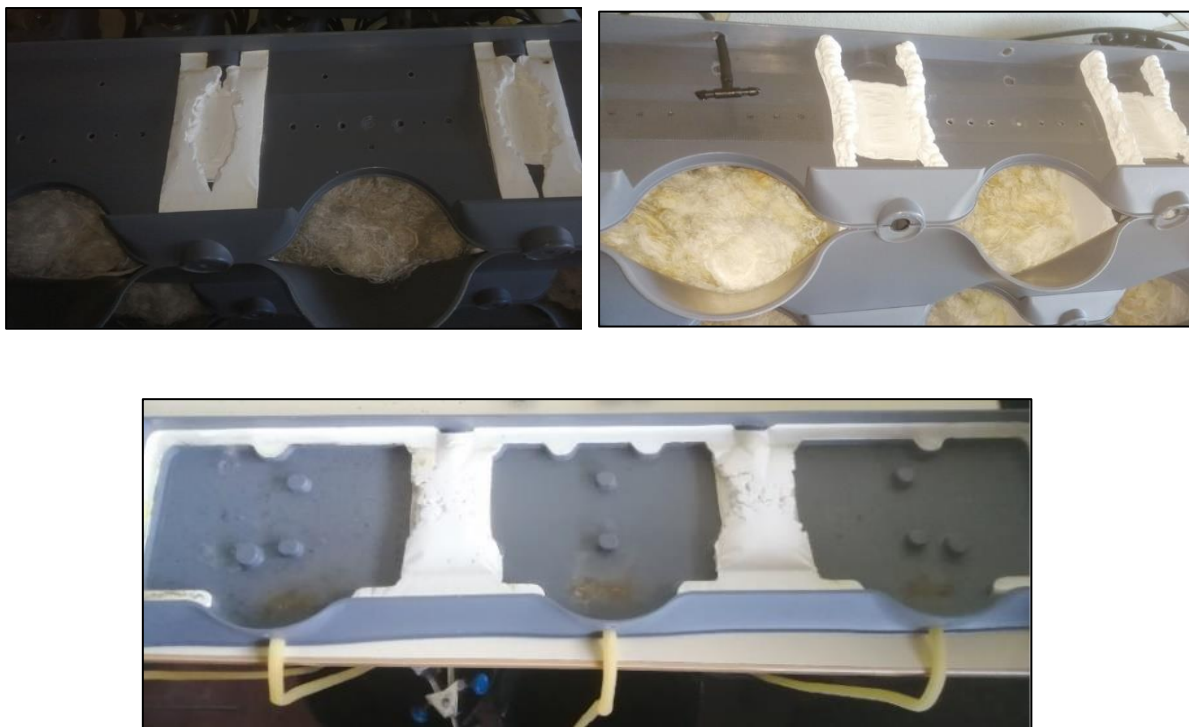


Figura 11 - Adaptações feitas na base e no topo dos módulos.

3.1.2 Meio de enchimento

Como indicado, no estudo foram usados dois módulos cada um com meios de enchimentos distintos: no módulo 1 foram utilizadas telhas cerâmicas britadas com fibras de cocô e no módulo 2 foram utilizadas fibras têxteis de algodão (Figura 12).



Figura 12 - Meio de enchimento em telhas cerâmicas e fibras de coco (esquerda) e meio de enchimento em fibras têxteis (direita).

O meio de enchimento é uma das características mais importantes da parede verde para o tratamento das AC, influenciando diretamente o TRH. Para se obter a proporção mais adequada entre telhas cerâmicas e fibras de coco, foram efetuados vários ensaios de porosidade para diferentes proporções de telhas cerâmicas e de fibras de coco, procurando que a porosidade efetiva do material fosse cerca de 30%. Este valor tem por objetivo assegurar que a água que entra na parede permaneça tempo suficiente para ser tratada. Após os vários ensaios, concluiu-se que a proporção ideal seria, 70% telhas cerâmicas e 30% de Fibras de coco, estes ensaios de porosidade foram realizados pela aluna do IST Joana Ferreira, ao abrigo do projeto Genesis (Rita Duque Ferreira & Ana Fonseca Galvão, Cristina Matos Silva, 2020).

No caso das telhas cerâmicas foi necessário proceder à sua britagem e peneiração tendo uma dimensão entre 4 a 8mm, seguindo de lavagem para a remoção de finos. No âmbito do presente estudo foram realizados ensaios de porosidade às fibras têxteis a fim de obter o grau de compactação para o qual a porosidade efetiva também fosse cerca de 30%.

No subcapítulo seguinte será explicado o método utilizado nos ensaios de porosidade das fibras têxteis.

Porosidade

Ao contrário das telhas cerâmicas e fibra de coco, a porosidade da fibra de têxtil está bastante dependente do seu grau de compactação. Para a determinação do grau compactação a usar para que o meio tivesse uma porosidade efetiva de cerca de 30%, foi necessário realizar vários ensaios de porosidade com diferentes graus de compactação, sendo as etapas deste ensaio:

1. Encher um goblé com um volume conhecido de fibra têxtil;
2. O goblé com a fibra têxtil é pesado;
3. Encher o goblé de água até as fibras estarem saturadas;
4. É feita uma nova pesagem;
5. A porosidade total (P_t) é calculada a partir das seguintes equações (Eq.1 e 2)

$$W_{H_2O} = W_{saturado} - W_{seco} \quad (\text{Eq.1})$$

$$P_t = \frac{V_{H_2O}}{V_{amostra}} = \frac{\left(\frac{W_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}\right)}{V_{amostra}} \quad (\text{Eq.2})$$

Sendo que W_{H_2O} representa o peso da água em gramas (gr), calculado pela diferença entre o peso da amostra saturada $W_{saturado}$ e o peso da amostra seca W_{seco} , ambos também em gramas (gr).

A porosidade total é calculada pelo quociente entre o volume de água (V_{H_2O}) e o volume da amostra ($V_{amostra}$), ambas em mililitros (ml). o volume de água é calculado pelo quociente entre o peso de água (W_{H_2O}) e o peso específico da mesma (ρ_{H_2O}).

Após o cálculo da porosidade total (P_t), é repetido o procedimento anterior após 24h, sendo que desta vez as fibras têxteis ao invés de estarem secas, estão humedecidas. O cálculo da porosidade efetiva é feito através da equação 2 e 3.

$$W_{H_2O,efetivo} = W_{saturado} - W_{humido} \quad (\text{Eq.3})$$

3.1.3 Vegetação

Como já mencionado neste capítulo, cada módulo é constituído por três linhas verticais, duas com vegetação – que se encontram nas extremidades de cada módulo – e uma sem vegetação – ao centro –, cuja função é de ponto de comparação entre cada tipo de plantas e de meio de enchimento. No estudo foram utilizadas duas espécies de plantas diferentes, da mesma forma que estudos anteriores o fizeram (Soares, 2018; Pissarra, 2019).

A escolha desta vegetação teve por base a sua adaptabilidade a ambientes húmidos e a sua disponibilidade em Portugal. Como tal, nas linhas da esquerda de cada um dos módulos (linha 1 e 4) foram usadas *Adiantum capillus-veneris* e nas linhas da direita (linha 3 e 6) optou-se por usar *Asplenium onopteris* (Figura 13).

A *Adiantum capillus-veneris*, de nome comum *avenca* ou *cabelo-de-vénus*, é uma espécie de feto que é comum em Portugal continental, Açores e Madeira. A *Asplenium onopteris*, também um feto, é comum na região mediterrânea e costa europeia ocidental. Qualquer um destes fetos tende a habitar locais húmidos e escuros, como, por exemplo, poços.



Figura 13 - Plantas utilizadas, *Adiantum capillus-veneris* (esquerda) e *Asplenium onopteris* (direita).

3.1.4 Escoamento

O sistema de bombagem é composto por 6 bombas peristálticas sendo que cada uma alimenta apenas uma linha de escoamento (Figura 14). Como indicado anteriormente, o escoamento é feito verticalmente e cada linha de escoamento é independente das restantes. O caudal de cada linha é diferente, de modo a assegurar aproximadamente a mesma carga hidráulica superficial em cada linha, dado que os potes centrais têm uma área de superfície inferior face aos potes das extremidades, linhas centrais (2 e 4), (Tabela 12).

Tabela 12 - Características hidráulicas da parede verde.

Linha	Área (m ²)	Caudal (L/h)	Carga hidráulica (m/h)
1	0.024	0.636	0.026
2	0.018	0.468	0.026
3	0.025	0.66	0.027
4	0.025	0.66	0.027
5	0.019	0.468	0.025
6	0.025	0.6	0.024



Figura 14 – Sistema de bombagem.

A alimentação de AC em cada linha é feita por gotejamento. Cada linha tem 4 pontos de saída distintos de modo a assegurar uma boa distribuição de água pela área de cada pote evitando que sejam originados caminhos preferenciais. Dois desses pontos de irrigação são dentro do pote de baixo da tampa de cada módulo e na zona mais recuada e os restantes 2 pontos encontram-se por cima da tampa dos módulos e no centro de cada pote, na figura 15 é possível observar estes 4 pontos de irrigação.

O sistema esteve em funcionamento 8 horas por dia, 5 dias por semana (de 2^a a 6^afeira), de modo a simular a utilização de um dia laboral de 8 horas. O período optado para o funcionamento do mesmo foi das 15h20 às 23h20, de segunda a sexta-feira.

Cada módulo da parede verde é alimentado pelo mesmo balde, tendo sido utilizados dois baldes de 26L, cada um com com 16L de Água Cinzenta (Figura 15).



Figura 15 - Sistema de irrigação (esquerda) e de escoamento (direita).

3.1.4.1 Tracer test

Para determinar o TRH de cada linha do sistema foram efetuados vários *tracer test* para cada uma das linhas. O primeiro teste foi realizado só com o material de enchimento sem qualquer planta, sendo realizado novo teste após a colocação das plantas e novamente no final do período de monitorização, de modo a perceber qual a influência das plantas no escoamento da água.

O ensaio de *tracer test* consiste em injetar continuamente água com uma concentração conhecida de sal, a partir do topo de cada linha de tratamento e registada a sua evolução à saída. Inicialmente foi usada uma concentração de sal de 0.25g/L e no final do estudo foi usada uma concentração de 0.5g/L.

À medida que a água é injetada, uma sonda à saída de cada linha de tratamento mede a condutividade da água que sai ao longo do tempo, através das curvas de calibração previamente obtidas, obtém-se o valor da concentração de sal a cada instante.

O método de cálculo do TRH, consiste em 2 diferentes passos. Primeiro, é calculada a curva de distribuição acumulativa, $F(t)$, construída com base na relação entre a concentração medida em cada instante ($C(t)$) sobre a concentração máxima (C_{max}) obtido ao longo de todo o ensaio (Equação 4).

$$F(t) = \frac{C(t)}{C_{max}} \quad (\text{Eq. 4})$$

O segundo e último passo, consiste no cálculo do TRH a partir da curva $F(t)$, através da Equação 5.

$$TRH = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt \quad (\text{Eq. 5})$$



Figura 16 - Ensaio tracer test.

3.2 Caracterização águas cinzentas

O arranque e monitorização da parede verde decorreu entre 7 de julho e 15 de setembro de 2021, um período que ficou marcado pela pandemia COVID-19, onde as medidas de combate à pandemia trouxeram consigo o ensino à distância, os recolhimentos obrigatórios e os isolamentos. Estas ações traduziram-se numa reduzida utilização das instalações sanitárias do IST e como tal, o volume de água seria insuficiente para satisfazer as necessidades de água das plantas, optando-se pela produção de Água Cinzenta sintética ao invés de se fazerem recolhas de água. Na tabela 13, estão representados todos os constituintes da AC e as respetivas quantidades utilizadas.

Tabela 13 - Composição das águas cinzentas.

Ingredientes	Peso (g/L)	Volume (ml/L)
Cloreto Amónio	0,029	-
Agente de limpeza - limpador de superfície	0,106	0,100
Detergente Loixa	0,132	0,125
Pastilhas máquina de lavar loiça	0,130	0,130
Sal Máquina de lavar loiça	0,100	0,100
Detergente máquina de lavar roupa	0,300	0,300
Amaciador Roupa	0,150	0,150
Shampoo + gel de banho	0,500	0,500
Condicionador	0,150	0,150
Pasta de dentes	0,030	0,030
Sabonete	0,110	0,100

A água cinzenta foi produzida às segundas, quartas e sextas-feiras, sendo que a água produzida às segundas-feiras e quartas-feiras era usada no respetivo dia e no dia seguinte, sendo produzidos 65

litros; às sextas-feiras eram produzidos 35L de água e que seria apenas para alimentar o sistema no respectivo dia (Figura 17).



Figura 17 - Bidon utilizado para a produção de AC.

3.2.1 Amostras

A recolha das amostras foi feita todos os dias para a água que entrava no sistema. Para a água que saía do sistema, eram feitas recolhas às terças e quintas-feiras, estas entravam e saíam do sistema no dia anterior e eram recolhidas amostras durante a manhã do dia seguinte à alimentação. No próprio dia em que eram recolhidas as amostras, eram testados alguns parâmetros imediatos.

3.2.2 Parâmetros e métodos

Para analisar o desempenho da parede verde, foram analisados vários parâmetros que permitissem fazer essa análise, entre os quais CQO, OD, pH, sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos voláteis (SSV), condutividade elétrica (CE) e a temperatura. Por razões de orçamento, neste estudo não foram feitas análise microbiológicas, patogénicas nem virológicas.

3.2.2.1 Parâmetros imediatos

Os parâmetros imediatos são os que foram medidos instantaneamente no próprio dia de recolha, entre os quais: pH, condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), OD (mg/L) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Cada um destes parâmetros foram medidos com recurso a sondas específicas, para a condutividade elétrica foram usadas duas sondas YSI 556 MPS e uma sonda Hatch EC5 DL, para o pH foi utilizada a

sonda Hatch PH1 L e para a medição do OD e temperatura foi utilizada a sonda YSI Pro DO (Figura 18).

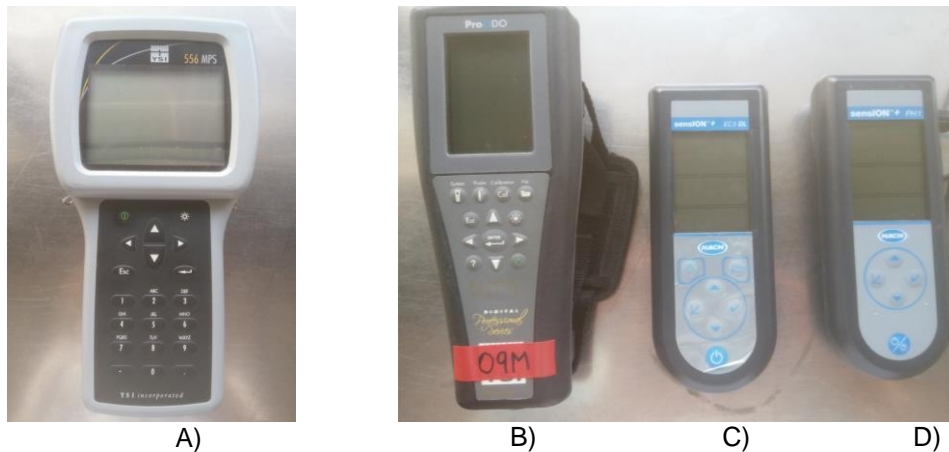


Figura 18 - Sondas utilizadas, A) YSI 556, B) Pro DO, C) Hatch EC5 DL e D) Hatch PH1.

3.2.2.2 SST e SSV

A medição dos SST e SSV foi feita através da filtração de amostras de AC recolhidas antes de entrar no sistema e após sair deste. O volume de cada amostra filtrada era variável e ajustado consoante a concentração de sólido estimada da mesma, variando ente 70mL e 400mL (Figura 19).

O ensaio começa por limpar filtros de fibra de vidro (Filters Fioroni, 0261A00004), com diâmetro de 47mm, com água destilada através de um sistema de filtração a vácuo (etapa A). Os filtros permitem a retenção de partículas com diâmetro não inferior a 1.2 μm . Após a limpeza dos filtros, estes são colocados numa mufla a 500°C durante 20 minuto a secar (etapa B). O passo seguinte passa por pesar os filtros secos através de uma balança analítica, sendo o valor desta pesagem o valor base de referência do peso de cada filtro para os cálculos subsequentes (etapa C).

Após a pesagem de cada filtro procede-se à filtragem das amostras, que é realizada usando o mesmo sistema usado no passo anterior. É feita uma filtragem para cada amostra de água com o seu respetivo filtro, sendo apontado o volume usado de cada amostra para posterior cálculo de sólidos.

Após a filtragem de cada amostra, cada filtro é colocado num analisador de humidade (MBT 64M, VWR) a secar a 105°C, que dispõe de uma balança incorporada. A secagem é completada quando a diminuição do peso ao longo do tempo for inferior a 0.01%, após sucessivas iterações (etapa D). Quando a secagem estiver completa, é feita uma nova pesagem com a balança analítica, obtendo-se o valor de SST, através da subtração do peso desta medição e do valor base de referência (etapa C).

Para se obter o valor de SSV é necessário colocar novamente os filtros na mufla durante 1H, a 500°C, para permitir a perda de matéria volátil (etapa B). É feita nova pesagem, sendo o cálculo dos SSV realizado por subtração do valor das últimas duas pesagens (etapa C).

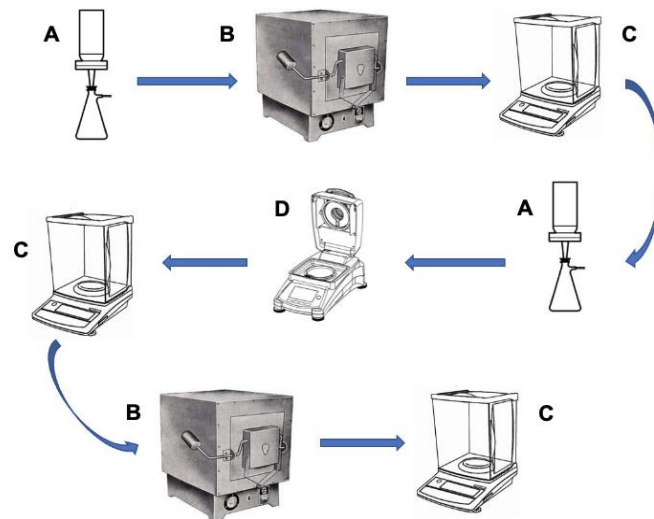


Figura 19 - Procedimento do ensaio de calculo dos sólidos suspensos: A – Sistema de filtragem; B – Mufla; C – Balança digital; D – Analisador de humidade.

3.2.2.3 CQO

Para a determinação da CQO foram recolhidas amostras de 50ml, sendo analisadas no próprio dia em que foram recolhidas. Quando tal não foi possível as amostras foram imediatamente congeladas para posterior análise.

A análise foi realizada através de um método colorimétrico (APHA, 1995). O método para obter a concentração de CQO começa por agitar as amostras e preparar a mistura para digestão em tubos de rosca de 16mm. Para cada amostra foram preparadas misturas com duas soluções digestoras, sendo adicionados os seguintes volumes para cada uma das misturas:

- 2.5 mL de amostra
- 1.5 mL de solução digestora
- 3.5 mL de ácido sulfúrico

Inicialmente foi utilizada a solução digestora do tipo L mas devido aos resultados obtidos, verificou-se que os resultados obtidos inicialmente estavam acima da gama de valores aceitáveis para essa

solução, tendo sido necessário repetir esses ensaios com a solução digestora do tipo H e daí em diante foi utilizada a solução do tipo H e L consoante os vários obtidos ao longo do estudo.

A gama de valores de CQO para cada solução digestora foi a seguinte:

- Solução L, para valores entre 200mg/L e 1000 mg/L de CQO.
- Solução H, para valores de 20 a 200mg/L de CQO.

Após a preparação das soluções, estas foram agitadas suavemente para facilitar a sua homogeneização. Em seguida, os tubos foram introduzidos num digestor (TR 320, Spectroquant) durante 2h e a 148°C. Após 2 horas no digestor, os tubos foram retirados e deixados a arrefecer à temperatura ambiente.

A absorvância foi medida através de um espectrofotómetro (spectroFlex series 6600 WTW), previamente calibrado. Para cada tubo foram feitas três medições, sendo que o valor final da absorvância é a média das três medições de cada tubo. A partir do valor final da absorvância, substituiu-se esse valor na equação de regressão (consoante a solução digestora utilizada), equação 4 e equação 5 e obteve-se o valor de CQO para cada tubo.

$$\text{Solução L: } CQO \left(\frac{mg}{L} \right) = \text{absorvância} \times 2579,9 - 19,452 \quad \text{Eq.4}$$

$$\text{Solução H: } CQO \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{\text{absorvância} - 0,0247}{0,0004} \quad \text{Eq.5}$$

O valor final da CQO para cada amostra é obtido através da média aritmética do valor de CQO medido em ambos os tubos com a mesma amostra.

4. Resultados e discussão

No presente capítulo será feita a descrição dos resultados obtidos e discussão dos mesmos. O estudo de tratamento de ACs através da parede verde começou no dia 7 de julho e prolongou-se até o dia 15 de setembro de 2021.

4.1 Adaptação das plantas

As plantas foram instaladas no dia 21 de junho de 2021, tendo sido necessário fazer pequenos orifícios em cada meio de enchimento para permitir a inserção das mesmas e de modo a poder cobrir parcialmente as raízes destas facilitando a intrusão das raízes no meio de enchimento (Figura 20).



Figura 20 - Pormenor visto de cima da instalação de uma das plantas.

Ambas as espécies de plantas tiveram uma boa adaptação ao sistema. A *Adiantum capillus-veneris* foi a espécie que apresentou um crescimento mais rápido e com maior dimensão comparativamente à *Asplenium onopteris*. Nas linhas 1 e 4 foram instaladas *Adiantum capillus-veneris* e nas linhas 3 e 6 *Asplenium onopteris*. Em ambas as espécies de plantas, pôde-se observar que algumas folhas dentro de cada pote ficaram secas e caíram pelo facto de não estarem tão expostas ao sol tendo um crescimento para fora do mesmo. Na Figura 21, está representada a evolução das plantas ao longo do estudo.



Semana 0



Semana 2



Semana 4



Semana 8

Figura 21 – Evolução das plantas ao longo do estudo.

4.2 Ensaios de porosidade

A porosidade do meio de enchimento é um aspeto bastante importante para um bom tratamento de AC, para tal é necessário que o sistema, e em especial o meio de enchimento, tenha uma permeabilidade adequada que permita obter bons valores de TRH. Como indicado anteriormente pretendeu-se que os materiais de enchimento tivessem uma porosidade efetiva na ordem dos 30%, tendo sido necessário efetuar vários ensaios de porosidade até se obter os valores pretendidos.

No caso das telhas cerâmica a permeabilidade desejada foi obtida através da combinação das percentagens de fibras de coco e telhas cerâmicas britadas. No caso das fibras têxteis por serem mais porosas, menos rígidas e mais deformáveis, a obtenção dos valores de permeabilidade desejados foi obtida através da relação peso/volume através da compactação manual das fibras. Na tabela 14 estão representados os valores finais obtidos para a permeabilidade desejável, encontrando-se no Anexo A os restantes ensaios de porosidade realizados.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de porosidade nos materiais selecionados.

	Telhas cerâmica e fibra de coco	Fibras têxteis
Peso amostra seca (g)	89	484
Peso gobelé + amostra seca (g)	317	755
Peso gobelé + amostra + água (g)	654	1088
Volume amostra (ml)	500	600
Porosidade Total (%)	67,4	55,3
Peso amostra húmida (g)	226	637
Peso gobelé + amostra húmida (g)	280	908
Peso gobelé + amostra + água (g)	389	1107
Volume amostra (mL)	350	600
Porosidade Efetiva (%)	31,1	32,8

4.3 Tracer test

Antes de serem feitos os ensaios de *tracer test*, foi necessário efetuar curvas de calibração para cada uma das sondas utilizadas. Estas curvas de calibração foram feitas ao início do estudo e no final do mesmo. Os ensaios foram realizados com NaCl, servindo de traçador, e medindo a condutividade elétrica do efluente sendo que as curvas de calibração das sondas serviram para obter a correlação entre a condutividade elétrica e a concentração de sal.

No anexo B estão representadas as curvas de calibração para cada uma das sondas. No total foram utilizadas 3 sondas, a HACH apenas foi utilizada nos ensaios iniciais, mas devidos a problemas técnicos esta deixou de estar operacional na fase final, a YSI 1 foi usada tanto nos ensaios iniciais e finais, e por último a YSI 2 foi apenas usada nos ensaios finais.

Como indicado no capítulo anterior, foram realizados vários *tracer test* ao longo do estudo de modo a calcular o TRH. Inicialmente foram feitos ensaios para todas as linhas ainda sem plantas e em seguida foram feitos novos ensaios para as linhas já com plantas. No final do estudo foram efetuados novos ensaios de modo a verificar se houve alterações do TRH (Tabela 15).

Tabela 15 – Valores de TRH de cada linha.

Fase	Unidades	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6
Sem plantas	min	147	107	133	75	72	80
Início do estudo	min	125	-	131	173	-	199
Fim do estudo	min	102	102	74	128	173	122

Inicialmente o módulo com apenas meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco e sem plantas apresentou valores de TRH superiores face ao módulo com apenas meio de enchimento de fibras têxteis. Após a introdução das plantas nas respectivas linhas, os valores de TRH passaram a ser superiores no módulo com meio de enchimento de fibras têxteis (linha 4 e 6).

Na linha 2 com apenas meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco não houve uma variação significativa do TRH ao longo do estudo, mas nas linhas 1 e 3 (com plantas) houve variações, sendo que no final do estudo os valores baixaram significativamente em ambas as linhas. Para a introdução de plantas foi necessário abrir pequenos orifícios para a introdução das mesmas o que pode ter favorecido o aparecimento de caminhos preferenciais, inicialmente a presença de terra agregada às raízes das plantas pode ter colmatada um pouco a esta redução de TRH, mas com o decorrer do estudo o arrastamento destes finos contribuiu para esta redução de TRH e a abertura de novos caminhos preferenciais.

No módulo com meio de enchimento de fibras têxteis, houve uma grande variação de TRH ao longo do estudo em todas as linhas, havendo uma grande alteração das características hidráulicas internas. Ao contrário da linha 2, a linha 5 apenas com meio de enchimento teve um aumento do TRH ao longo do estudo sendo a linha que apresentou um maior valor de TRH final, passando de 72 minutos para 173 minutos. O aumento do TRH neste módulo deve-se ao facto de as fibras ao absorverem água tornarem-se um material mais compacto criando uma maior retenção de água e próprio ambiente húmido das fibras têxteis são propícios para a origem de fungos que retêm sais.

4.4 Parâmetro imediatos

Como indicado no capítulo anterior, ao longo do estudo foram analisados vários parâmetros imediatos (Condutividade elétrica, pH, %OD, OD e temperatura. Na tabela 16 estão representados os valores médios e o desvio padrão de cada um destes parâmetros para cada uma das linhas da parede verde.

Tabela 16 - Resultados dos parâmetros imediatos de cada linha à saída (média ± desvio padrão).

	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	%OD	OD (mgO^2/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)
Afluente	643,4 ± 26,8	9,16 ± 0,19	104,5 ± 3,9	8,98 ± 0,43	23,1 ± 1,0
Linha 1	680,3 ± 55,1	7,46 ± 0,23	30,1 ± 20,9	2,59 ± 1,80	22,8 ± 1,0
Linha 2	674,2 ± 52,9	7,45 ± 0,18	22,9 ± 14,8	1,98 ± 1,28	22,6 ± 0,9
Linha 3	679,9 ± 56,5	7,42 ± 0,13	29,9 ± 19,2	2,57 ± 1,65	22,7 ± 0,9
Linha 4	681,2 ± 58,2	7,51 ± 0,25	38,1 ± 23,6	3,27 ± 2,01	22,7 ± 0,9
Linha 5	683,8 ± 66,7	7,65 ± 0,25	57,2 ± 16,6	4,93 ± 1,41	22,6 ± 0,9
Linha 6	677,4 ± 57,8	7,58 ± 0,17	47,8 ± 17,2	4,11 ± 1,48	22,8 ± 0,9

Em seguida será feita a descrição dos parâmetros imediatos medidos e a respectiva análise dos mesmos.

Condutividade elétrica

Em termos de condutividade elétrica os valores foram bastante semelhantes entre todas as linhas, não havendo grande diferença entre o tipo de plantas e de meio de enchimento. Em todas as linhas os valores obtidos foram ligeiramente superiores aos valores de CE das AC. Inicialmente os valores de CE dos efluentes eram inferiores aos das AC afluentes em ambas os módulos, mas com o decorrer do estudo a acumulação dos sais no meio de enchimento fez com que fossem obtidos valores superiores nos efluentes. No anexo D estão representados todos os valores da temperatura medidos ao longo do estudo em cada linha.

pH

À semelhança da CE, os valores médios de pH obtidos foram bastante semelhantes entre todas as linhas, havendo apenas uma pequena diferença entre o tipo de plantas e os meios de enchimento utilizados. Mas ao contrário da condutividade elétrica os valores do pH dos efluentes foram inferiores aos valores das AC Afluentes como se pode observar nas Figuras 22 e 23.

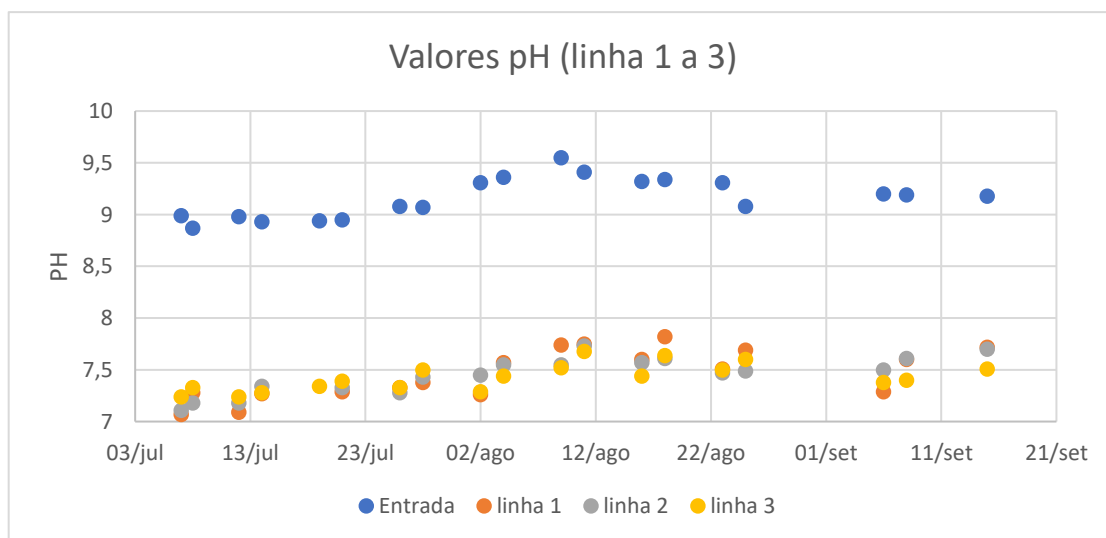


Figura 22 - Valores de pH ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.

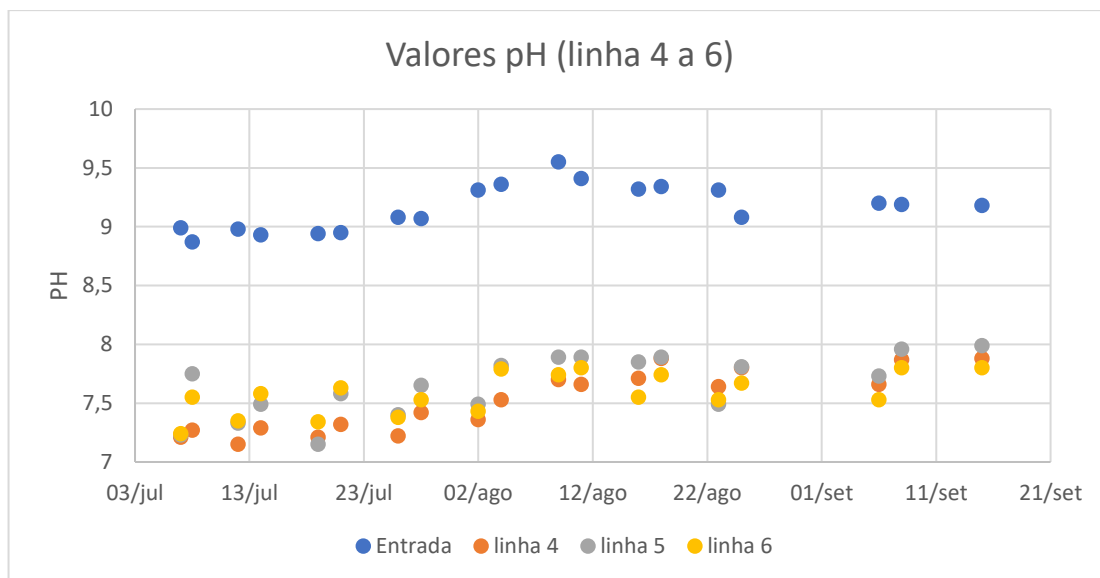


Figura 23 - Valores de pH ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.

As maiores diferenças de valores de pH foram observadas entre meios de enchimento onde podemos verificar que os valores obtidos no meio de enchimento composto por telhas cerâmica e fibras de coco (linha 2) apresentam valores mais baixos que os valores no meio em fibras têxteis (linha 5) (Figura 24). Pela Tabela 16, podemos também concluir que as plantas tiveram maior influência na redução do pH no módulo com meio de enchimento em fibras têxteis e em particular a *Adiantum capillus-veneris* (linha 4). No anexo E estão representados todos os valores de pH medidos ao longo do estudo em cada linha.

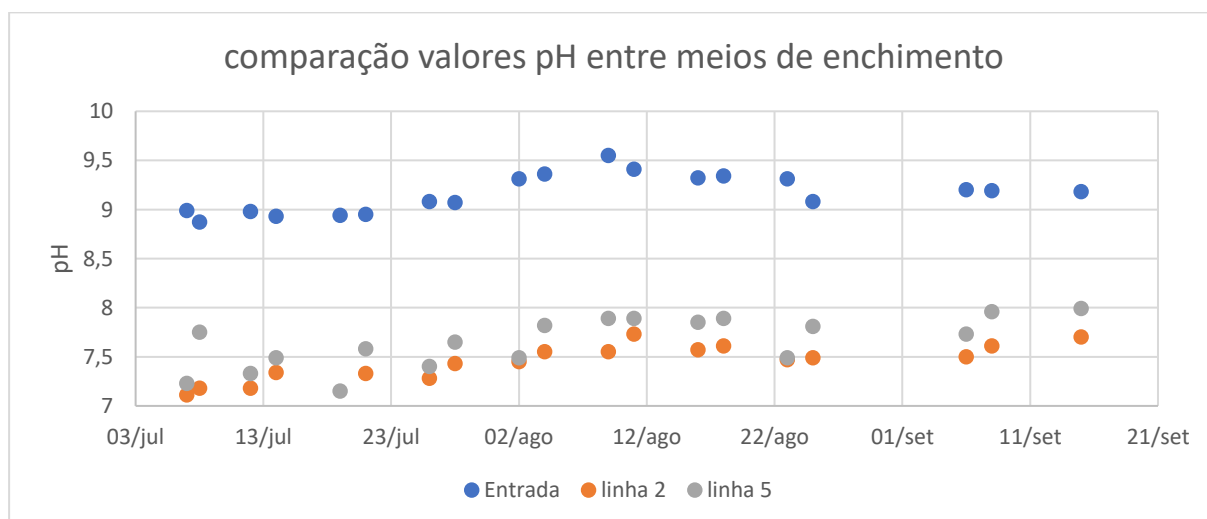


Figura 24 - Comparação de valores de pH, ao longo do tempo, entre meios de enchimento.

Temperatura

Outro dos parâmetros monitorizados neste estudo foi a temperatura das AC, tanto no efluente como nos afluentes. Apesar de o estudo ter decorrido entre o início de julho e meados de setembro e de ter havido alterações relativamente à temperatura exterior, não houve uma alteração significativa da temperatura do efluente. Isto deve-se às condições do próprio laboratório onde decorreu o estudo, tratando-se de um espaço que não está diretamente exposto ao sol, tem tetos altos, janelas grandes e não tem sistema de aquecimento.

A variação máxima da temperatura no efluente foi cerca de 4°C, variando entre 21°C e 25°C. Relativamente aos afluentes, na grande maioria das medições, as temperaturas registadas foram inferiores às medidas no efluente. Esta diferença de temperaturas entre efluente e afluentes não foi muito significativa sendo que a diferença máxima registada foi cerca de 2°C. A tabela 17 representa os valores médio e as respetivas variações da temperatura no efluente e nas várias linhas, enquanto as Figuras 25 e 26 representam os valores medidos em cada parede ao longo do estudo.

Tabela 17 - Resultados estatísticos da temperatura em cada linha (média ± desvio padrão).

	Nº de Amostras	Min (°C)	Máx (°C)	Média (°C)	Desvio padrão
Afluente	19	20.7	24.4	23.1	1.0
Linha 1	18	21.3	25.1	22.8	1.0
Linha 2	18	21.2	24.8	22.6	0.9
Linha 3	19	21.4	24.8	22.7	0.9
Linha 4	19	21.3	24.7	22.7	0.9
Linha 5	19	21.5	24.8	22.6	0.8
Linha 6	19	21.6	24.8	22.8	0.8

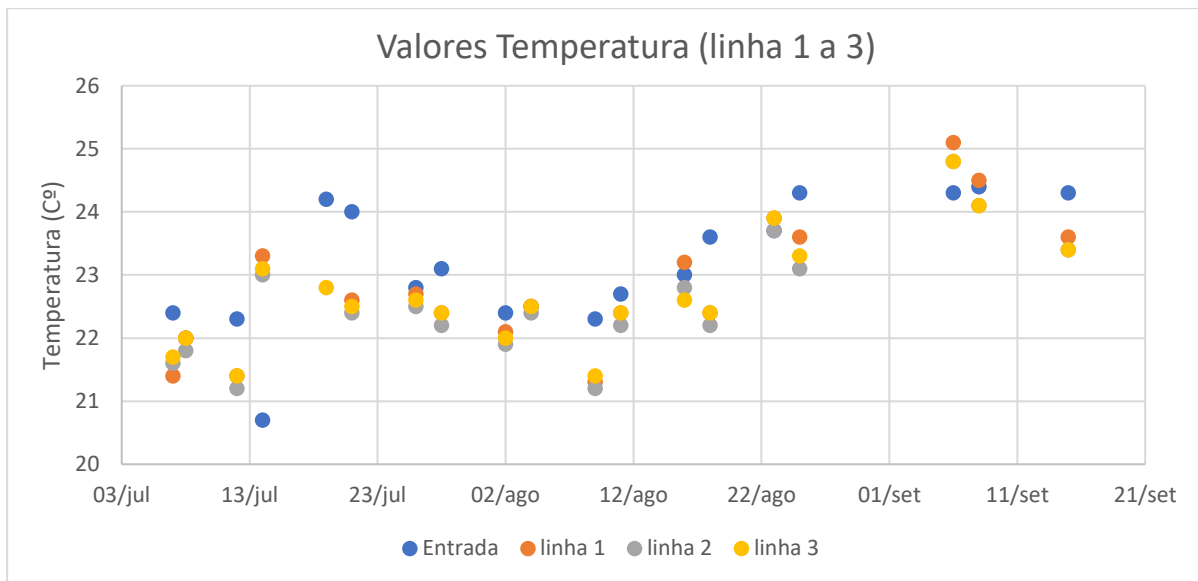


Figura 25 - Valores da temperatura ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.

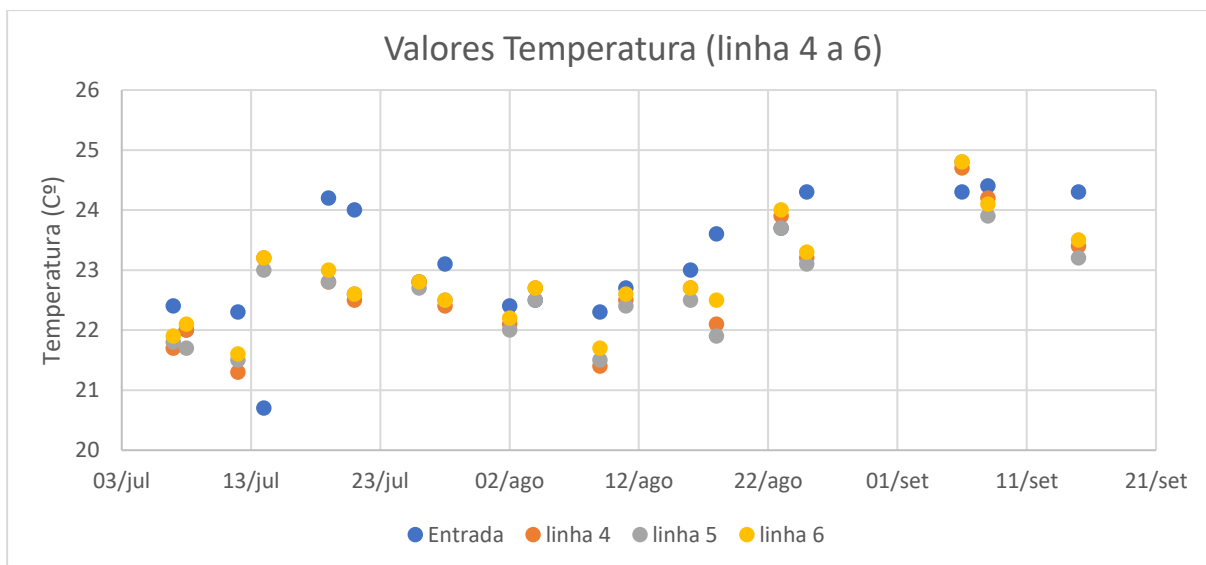


Figura 26 - Valores da temperatura ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.

Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido (OD) e a percentagem de oxigênio dissolvido (%OD) são 2 parâmetros interligados, que como indicado no Cap. 2, representam a quantidade de oxigênio que está dissolvido numa amostra ou é transportado por esta.

Os valores tanto de OD e %OD inicialmente eram reduzidos no módulo com meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco (Figura 27). Ao longo do estudo estes valores foram subindo sendo que tal se pode dever à degradação da matéria orgânica das fibras de coco do próprio meio de

enchimento e devido ao período de adaptação das plantas. No anexo F estão representados todos os valores de OD e %OD medidos ao longo do estudo em cada linha.

A análise apresentada apenas indicia tendências, carecendo de verificação pois as medições foram realizadas na manhã seguinte ao dia em que a água circulou no sistema, dado que a irrigação terminava às 23H, deste modo sendo a medição de oxigênio feita 9h depois, os valores medidos não correspondem diretamente às condições de saída do sistema, ainda assim pode-se observar uma evolução da concentração de OD em particular nas linhas 1, 2 e 3 que não acompanhou as flutuações de temperatura observadas, pelo que o principal fator influenciador do oxigênio na descarga seria a sua concentração à saída do sistema posteriormente influenciada pelo rearejamento.

Durante o período de adaptação das plantas estas foram deixando cair algumas folhas para dentro da parede, principalmente nas linhas 1 e 4 correspondentes à espécie *Adiantum capillus-veneris*, o que pode ter levado a um maior consumo de oxigênio para a degradação da respetiva matéria orgânica e consequentemente a menores valores de OD e %OD.

No caso do módulo com meio de enchimento de fibras têxteis a diferença de OD e %OD entre início e fim do estudo não foi tão expressiva exceto na linha 4 devido às razões indicadas anteriormente. As linhas 5 e 6 mantiveram valores relativamente constante entre 3.5mg/L e 5.5mg/L de OD (Figura 28), mas em algumas medições os valores obtidos foram um pouco inferiores. Entre estas duas, a linha 6 variou um pouco mais o que se pode dever à queda de algumas folhas da respetiva planta.

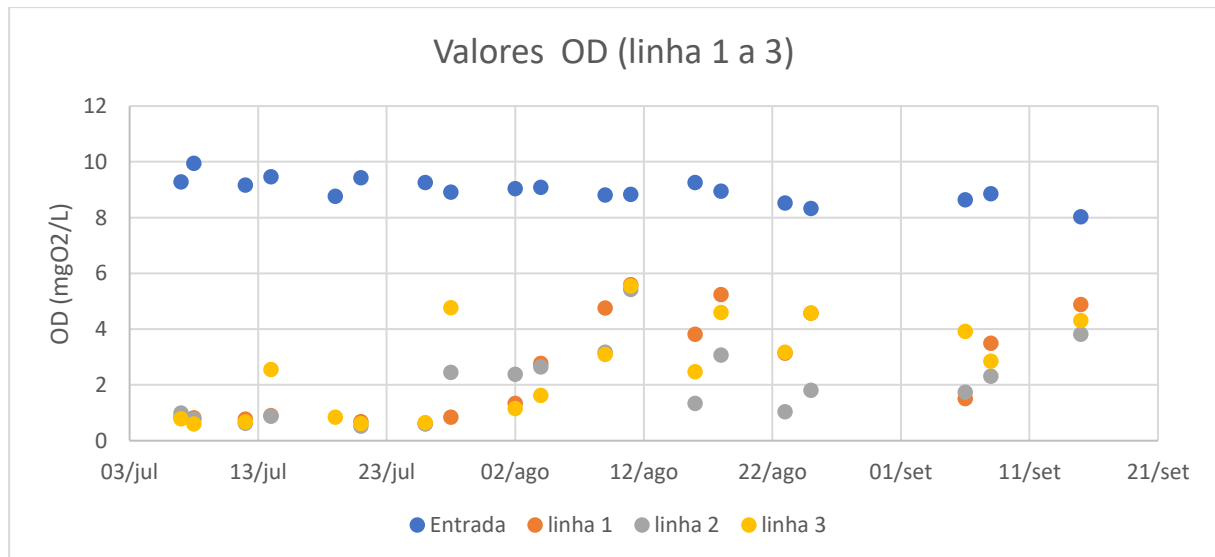


Figura 27 - Valores de OD ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.

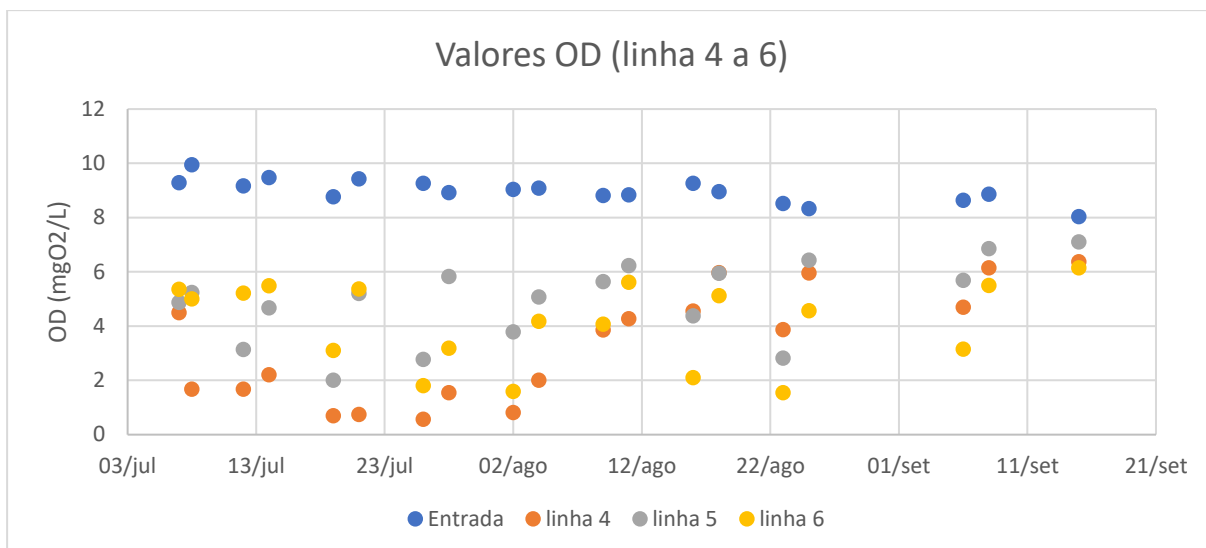


Figura 28 - Valores de OD ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.

Comparando os valores obtidos e representados na tabela 18 para cada linha, podemos verificar que no módulo com meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco as plantas tiveram um impacto positivo relativamente aos valores de OD e %OD face à linha com apenas meio de enchimento, sendo que ambas as espécies apresentaram valores relativamente idênticos. No que diz respeito ao módulo com meio de enchimento de fibras têxteis, este apresentou valores superiores face ao módulo com meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco, podemos no entanto, verificar que as plantas (linha 4 e 6) tiveram um impacto negativo para os valores de OD e %OD face à linha só com meio de enchimento (linha 5), que por sua vez foi a linha que apresentou melhores resultados para ambos os parâmetros.

Tabela 18 - Resultados estatísticos de OD e %OD em cada linha (média ± desvio padrão).

	OD				% OD				
	Nº de Amostras	Min (mg/L)	Máx (mg/L)	Média (mg/L)	Desvio padrão	Min (mg/L)	Máx (mg/L)	Média (mg/L)	Desvio padrão
Afluente	19	8,03	9,95	8,98	0,43	96,1	114	104,5	3,9
Linha 1	18	0,61	5,6	2,59	1,8	7,2	64,5	30,1	20,86
Linha 2	18	0,52	5,42	1,98	1,28	6	62,3	22,9	14,78
Linha 3	19	0,6	5,55	2,57	1,65	6,8	64	29,9	19,2
Linha 4	19	0,57	6,37	3,27	2,01	6,6	74,9	38,1	23,6
Linha 5	19	2,01	7,1	4,93	1,41	23,3	83	57,2	16,6
Linha 6	19	1,55	6,15	4,11	1,48	18,3	72,3	47,8	17,2

4.5 SST e SSV

As AC produzidas e utilizadas neste estudo apresentam valores relativamente baixos de SST, mas dentro da média característica de AC conforme se pode observar na Tabela 1. No caso dos SSV os valores obtidos estão dentro da gama de valores esperados. A grande percentagem de sólidos presentes nas AC produzidas são em grande maioria sólidos voláteis, que correspondem a cerca de 75% dos sólidos suspenso totais.

Através da tabela 19 podemos observar que as linhas que apresentaram maior eficiência na redução de SST foram as linhas que combinam o meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco e com plantas, em especial no caso da linha com a *Asplenium onopteris* (linha 3).

Tabela 19 - Resultados estatísticos de SST em cada linha (média \pm desvio padrão).

	Nº de Amostras	Min (mg/L)	Máx (mg/L)	Média (mg/L)	Desvio padrão	% remoção
Afluente	19	31	140	72	35	-
Linha 1	18	5	120	27	25	61,8
Linha 2	18	16	110	44	28	39,1
Linha 3	19	5	125	24	28	66,3
Linha 4	19	13	73	35	19	51,1
Linha 5	19	9	85	32	24	55,4
Linha 6	19	17	90	33	18	53,3

No módulo com meio de enchimento em telhas cerâmica e fibras de coco as plantas claramente tiveram um grande impacto na redução de SST, uma vez que na linha só com meio de enchimento (linha 2) a percentagem média de redução de SST foi de 39.1% e com a presença de plantas foi 61.8% para a linha 1 e 66.3% para a linha 3, ou seja, um aumento superior a 20% na redução de SST devido à presença das plantas. A percentagem média de redução foi obtida pela média de todos valores obtidos em cada dia ensaiado.

No caso do módulo com meio de enchimento de fibras têxteis podemos observar que as plantas não tiveram grande impacto na redução de SST, sendo que a linha 5 com apenas meio de enchimento obteve resultados ligeiramente superiores às linhas com plantas (linha 4 e 6) e até superior à linha com meio de enchimento de telhas cerâmica e fibras de coco (linha 2). Uma das razões para tal pode

prender-se com a criação de caminhos preferenciais gerados pela introdução das plantas no meio de enchimento levando a menor retenção de sólidos suspenso. Este pressuposto é suportado pelos valores TRH, que são inferiores nas linhas 4 e 6 face à linha 5.

Podemos assim concluir que as fibras têxteis por si só são um bom material de retenção SST, possivelmente pela formação de rede/malha que permite reter mais sólidos suspensos. As Figuras 29 e 30 representam a concentração de SST ao longo do estudo em cada um dos módulos.

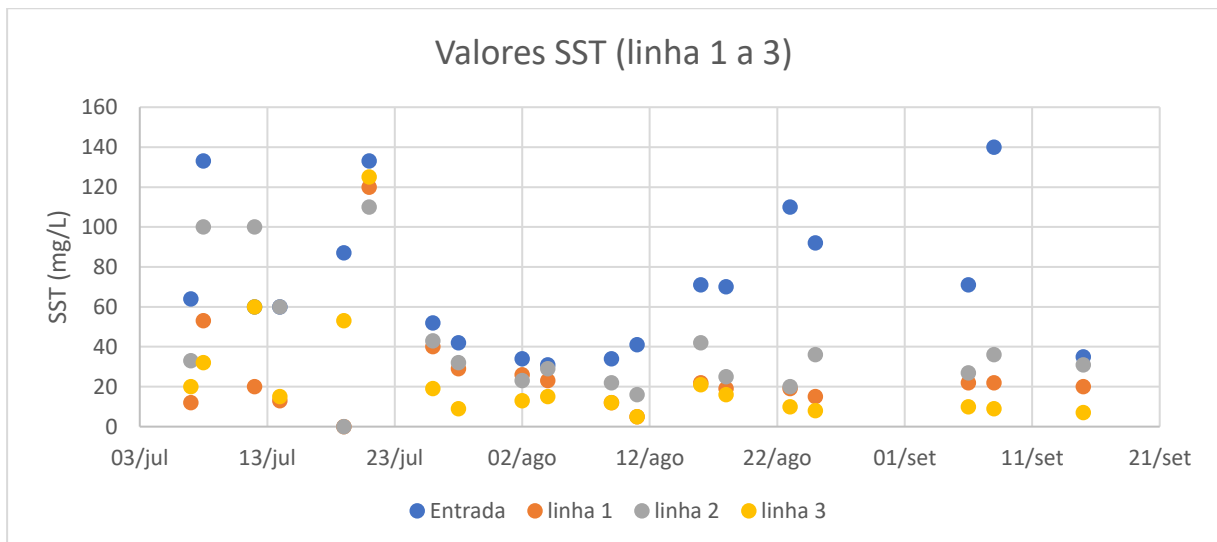


Figura 29 - Valores de SST ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.

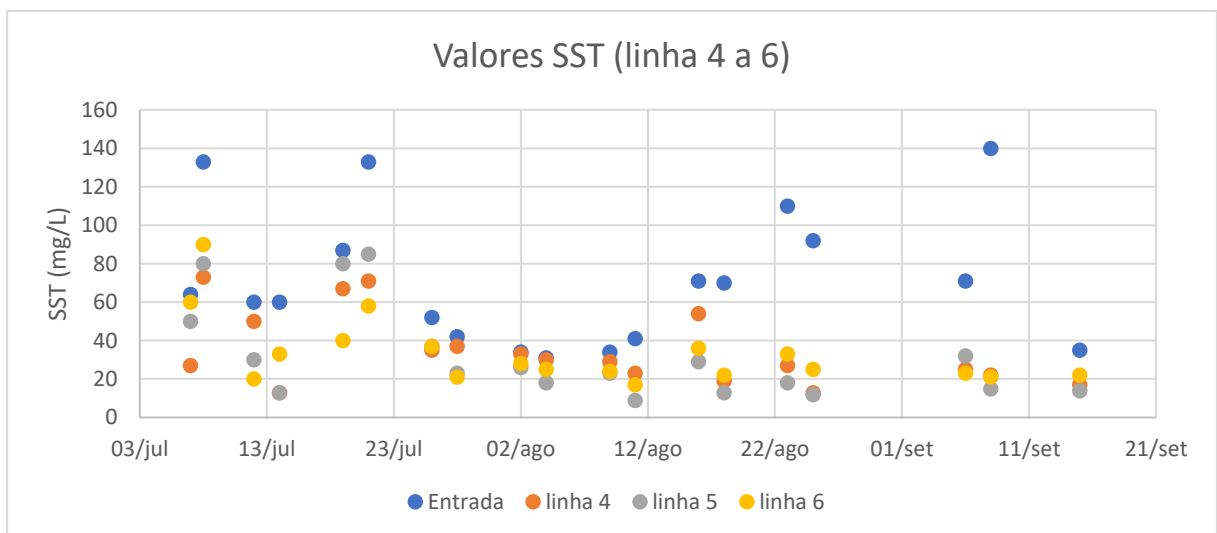


Figura 30 - Valores de SST ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.

Com a introdução das plantas na parede, estas tiveram um período de adaptação após o qual a percentagem de sólidos suspensos retidos foi aumentando ao longo do estudo em comparação com a

quantidade de sólidos suspensos presentes nas AC. A queda de algumas folhas durante o período de adaptação e a presença de terra agregada às raízes das plantas, levou a que houvesse um aumento de sólidos suspensos o que fez diminuir a percentagem de sólidos retidos, o mesmo se pôde verificar nas linhas sem plantas em que a presença de partículas levou a uma maior presença de sólidos no período inicial do estudo. As Figuras 31 e 32 representam a eficiência de remoção de SST para cada uma das linhas ao longo do estudo. Numa das medições da eficiência de remoção, a linha 2 apresentou um valor negativo que poderá dever-se a material solto proveniente do meio de enchimento ou devido a um erro de análise.

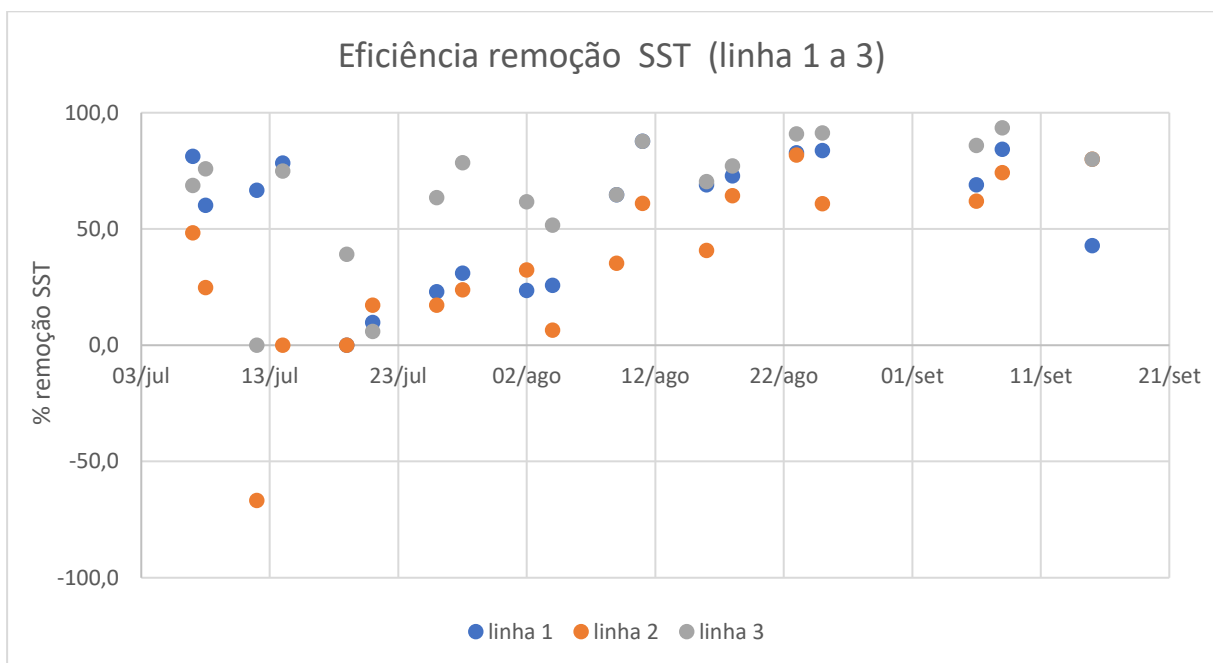


Figura 31 - Remoção de SST ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.

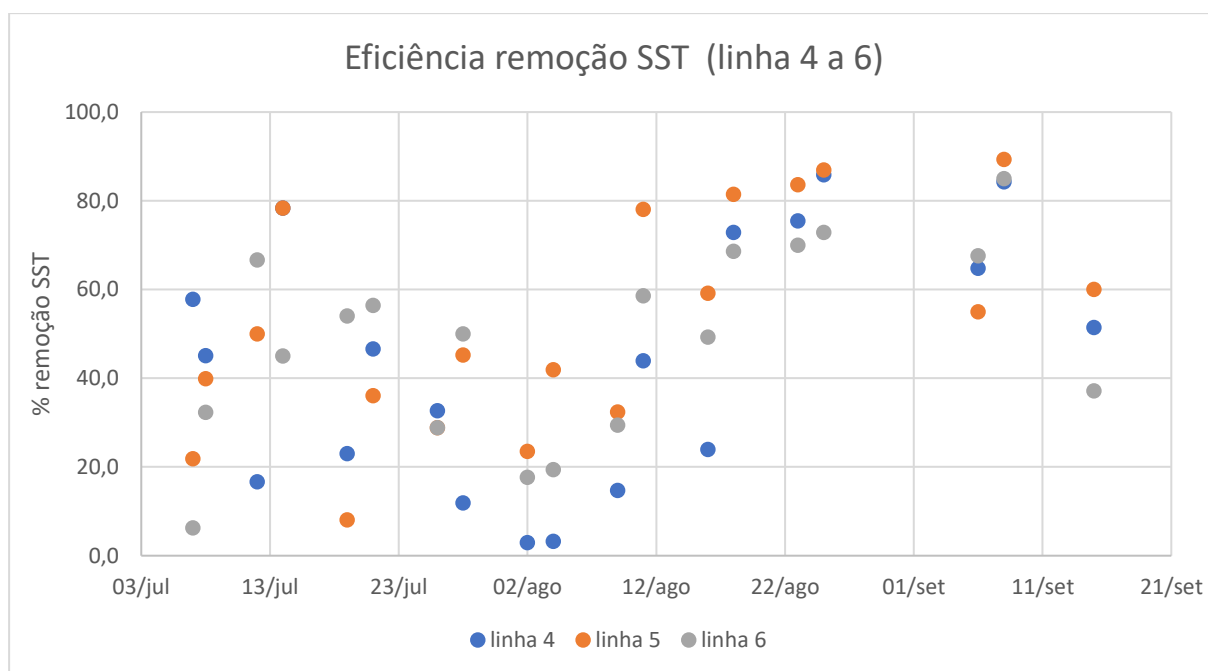


Figura 32 - Remoção de SST ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.

Tal como se pôde verificar para a redução de SST, as linhas com meio de enchimento em telhas cerâmicas e fibras de coco e com plantas (linha 1 e 3) e a linha apenas com meio de enchimento de fibras têxteis (linha 5) foram as linhas que apresentaram maior eficiência na redução de SSV (Tabela 20). Comparando estas três linhas, a linha 3 com a espécie *Asplenium onopteris* mais uma vez foi a linha que apresentou maior eficiência na redução de sólidos suspensos, atingido um valor médio de 85.1%. De notar que a linha 5, composta apenas por fibras têxteis sem qualquer planta apresentou um valor semelhante ao valor da linha 1.

Tabela 20 - Resultados estatísticos de SSV em cada linha (média \pm desvio padrão).

	Nº de Amostras	Min (mg/L)	Máx (mg/L)	Média (mg/L)	Desvio padrão	% remoção
Afluente	13	25	128	54	31	-
Linha 1	13	5	35	19	7	73,6
Linha 2	13	15	40	28	8	60,9
Linha 3	13	5	20	11	4	85,1
Linha 4	13	12	51	25	10	64,6
Linha 5	13	7	31	18	7	74,3
Linha 6	13	14	35	24	5	67

No módulo com meio de enchimento em fibras têxteis (linha 4 a 6), as plantas não tiveram efeito na redução de SSV, à semelhança dos SST, observando-se que a linha 5 apresentou maior eficiência do que a linhas 4 e 6 com plantas. Nas Figuras 33 e 34, podemos observar os valores obtidos para os SSV para cada uma das linhas.

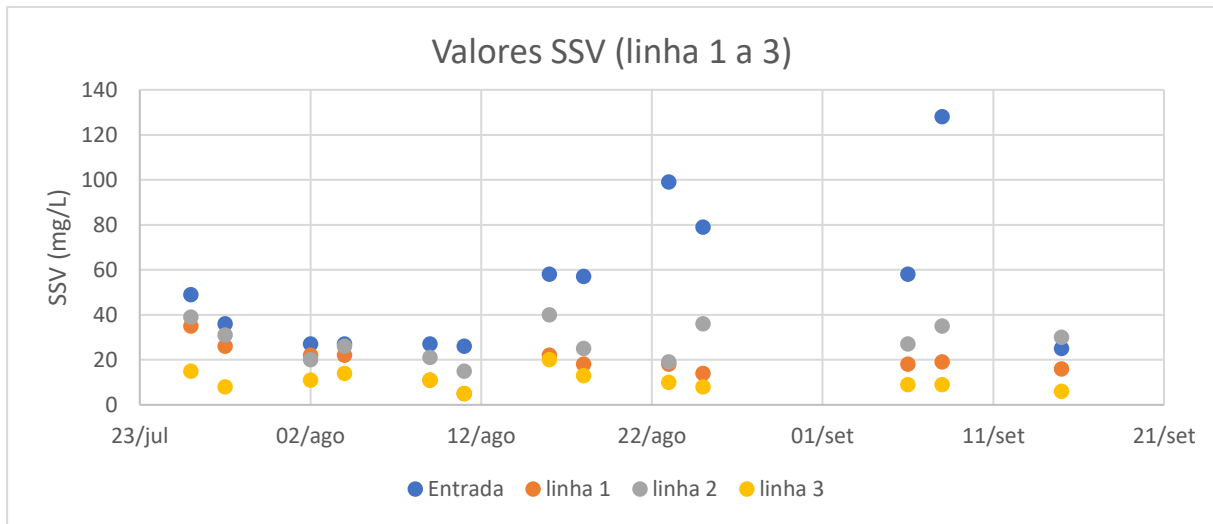


Figura 33 - Valores de SSV ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.

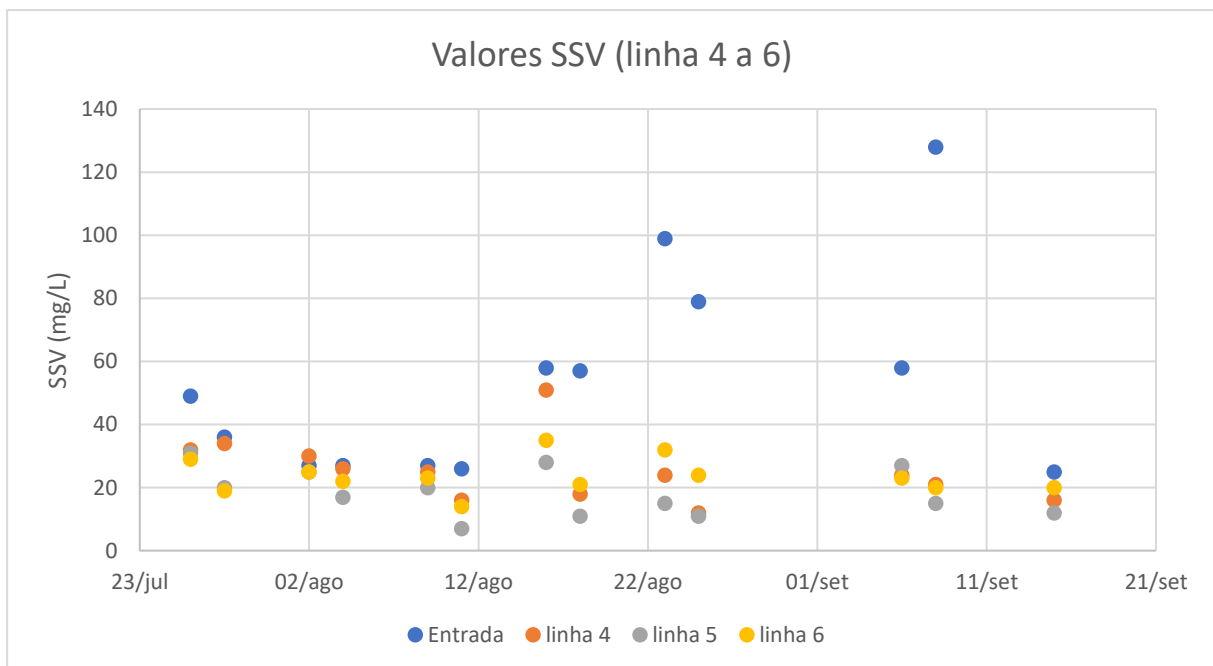


Figura 34 - Valores de SSV ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.

De modo geral e à semelhança dos SST, a eficiência de remoção de SSV foi aumentando ao longo do estudo. Isto deve-se à mesmas razões indicadas anteriormente relativamente aos SST. As Figuras 35

e 36, representam a evolução de eficiência de remoção de SSV para cada linha e ao longo do estudo. Numa das medições da eficiência de remoção, a linha 2 apresentou um valor negativo que poderá dever-se à acumulação de matéria ou devido a um erro de análise.

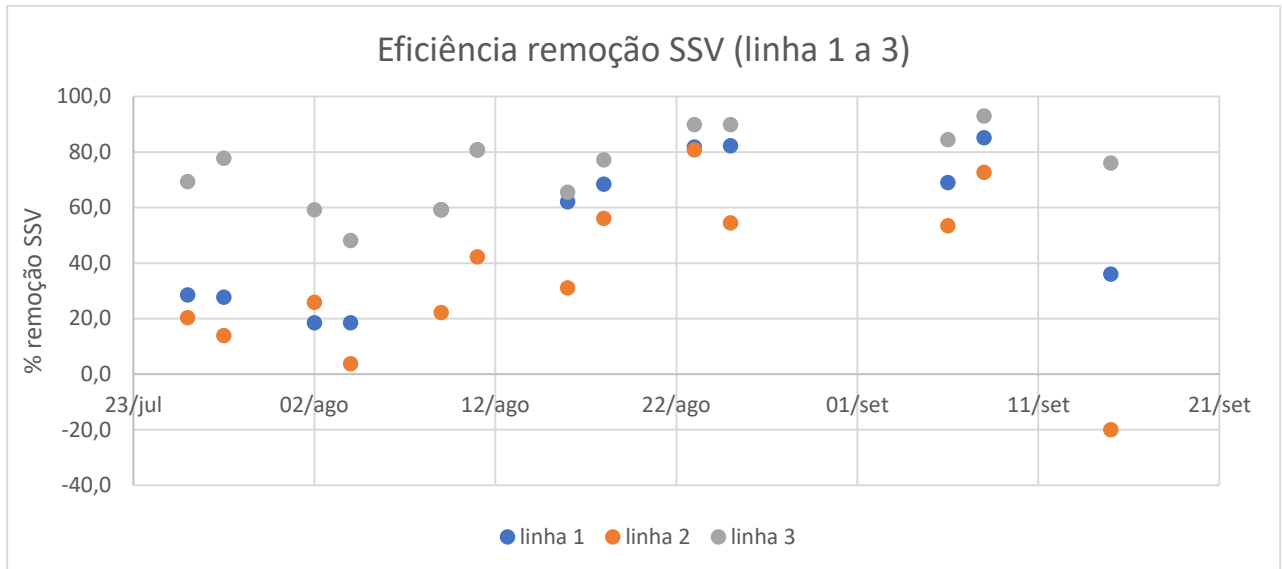


Figura 35 - Remoção de SSV ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.

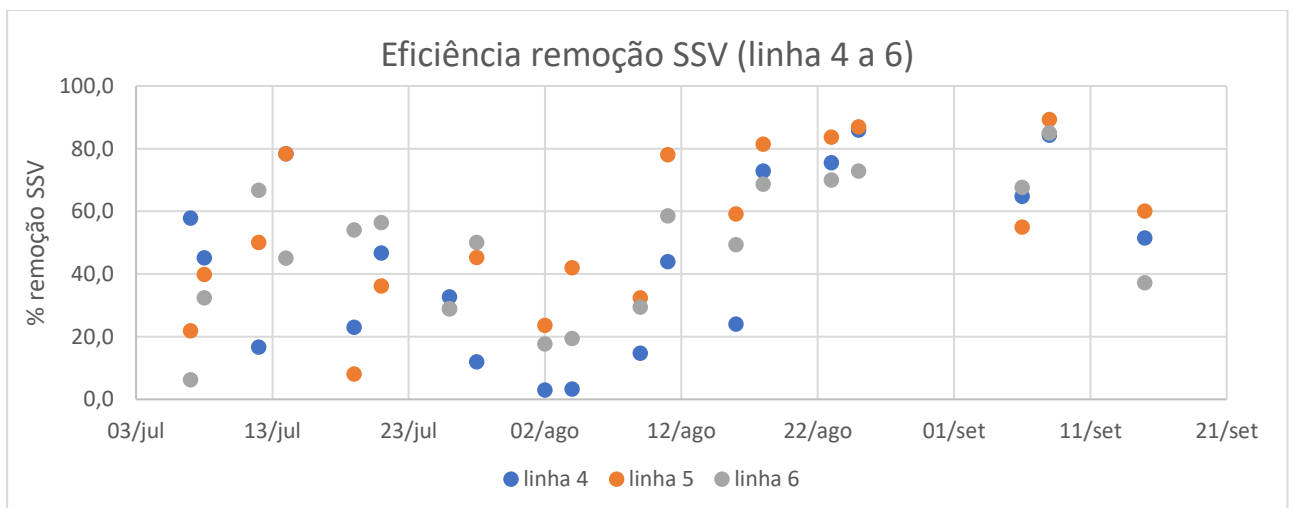


Figura 36 - Remoção de SSV ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.

De modo geral podemos concluir que para a redução de SST e SSV a solução que apresentou maior remoção de sólidos suspensos foi a linha composta por meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco e com a planta da espécie *Asplenium onopteris* (linha 3). No anexo G estão representados todos os valores de SST e SSV medidos ao longo do estudo em cada linha.

4.6 CQO

Pela Tabela 21 apresentam-se os resultados estatísticos obtidos de CQO, podendo observar-se que o módulo com meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco teve melhor desempenho em termos de redução de CQO face ao módulo com meio de enchimento de fibras têxteis, quer com e sem plantas. A linha 2 apenas com meio de enchimento de telhas cerâmicas e fibras de coco obteve melhores resultados face a todas a linhas do módulo com meio de enchimento em fibra têxtil, permitindo concluir que por este meio de enchimento é uma solução com melhor desempenho na redução de CQO do que o enchimento com fibras têxtil.

Tabela 21 - Resultados estatísticos de CQO em cada linha (média \pm desvio padrão).

	Nº de	Min	Máx	Média	Desvio padrão	% remoção
Afluente	18	429.1	1016.6	628.7	121.2	-
Linha 1	18	130.6	341.2	206.4	52.8	72.7
Linha 2	18	170.5	445.8	250.5	71.6	66.8
Linha 3	19	116.4	237.6	166.2	34.7	78
Linha 4	19	103.1	392	279.7	64.6	63
Linha 5	19	158.5	390.8	294.8	67	60.9
Linha 6	19	163.7	354.5	264.6	49.4	65

Relativamente à influência das plantas, podemos concluir que a planta da espécie *Asplenium onopteris* (linha 3 e 6) foi a espécie que obteve maior de redução de CQO em ambos os módulos face à planta da espécie *Adiantum capillus-veneris* (linha 1 e 4). Em ambas as espécies houve melhorias em termos de redução de CQO em comparação com repetitivas linhas sem meio de enchimento de ambos os módulos (linha 2 e 5).

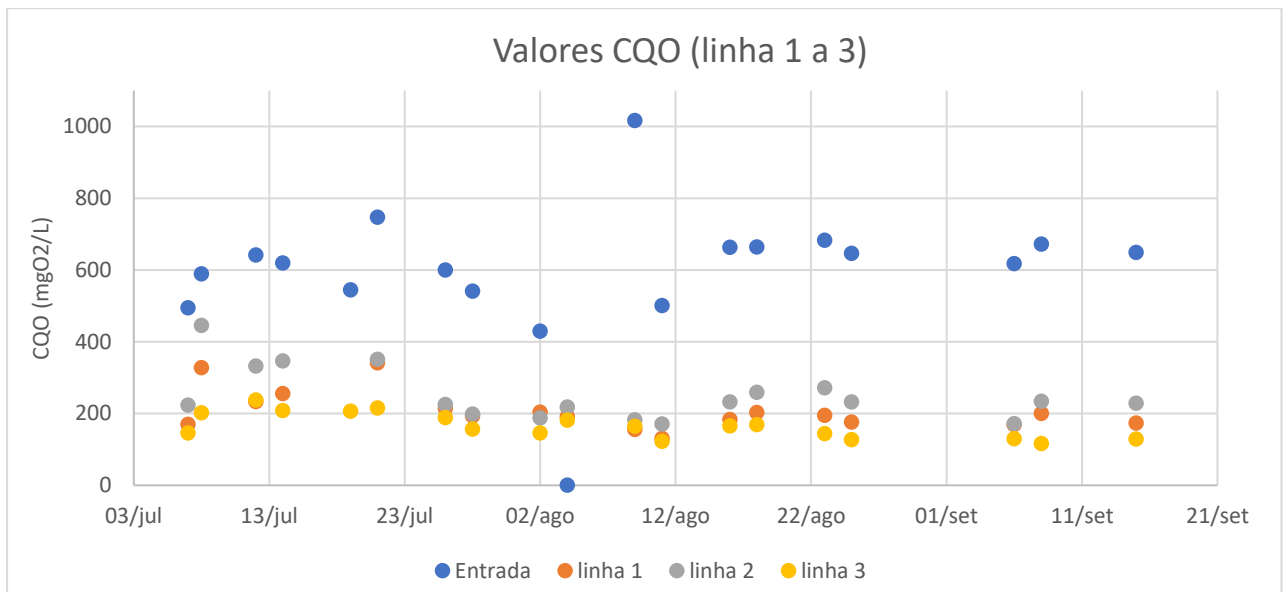


Figura 37 - Valores de CQO ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.

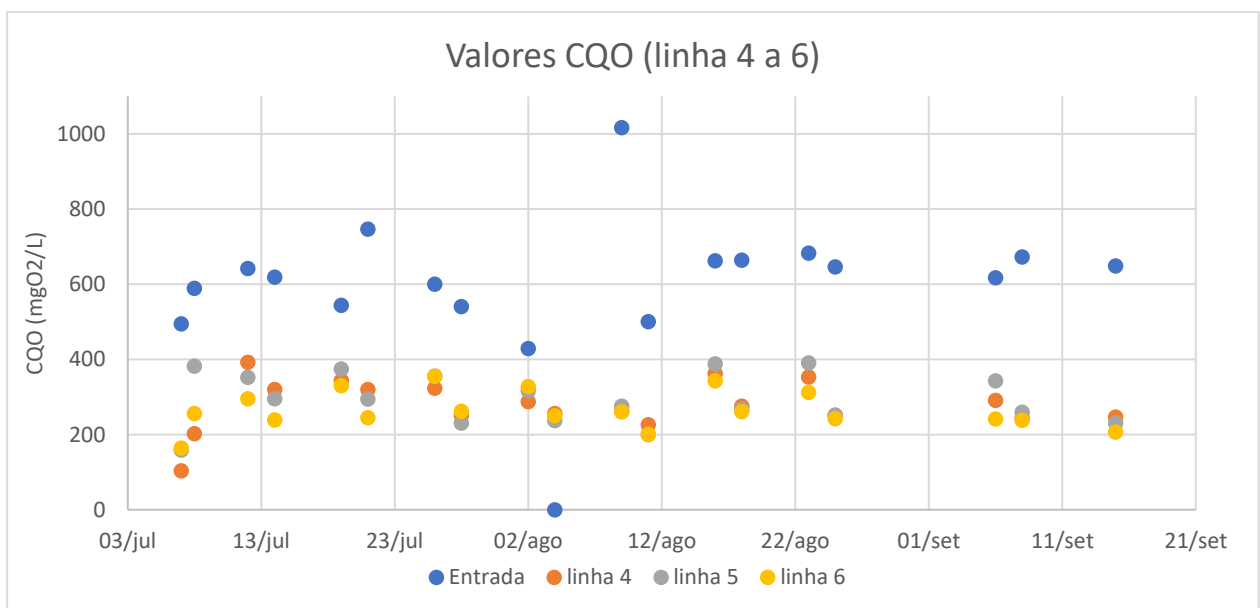


Figura 38 - Valores de CQO ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.

De modo geral houve um aumento da eficiência de remoção de CQO ao longo do estudo em todas as linhas (Figuras 39 e 40), apontando-se vários fatores que contribuíram para tal entre os quais a degradação de matéria orgânica como por exemplo as fibras de coco e folhas que foram caindo para dentro dos módulos da parede verde durante o período de adaptação das plantas levando a um maior consumo de oxigênio e conseqüentemente a maiores valores de CQO. Outro fator que terá contribuído para o aumento da redução de CQO no decorrer do estudo foi a evolução da comunidade bacteriológica ao longo do tempo. No anexo H estão representados todos os valores de CQO medidos ao longo do estudo em cada linha.

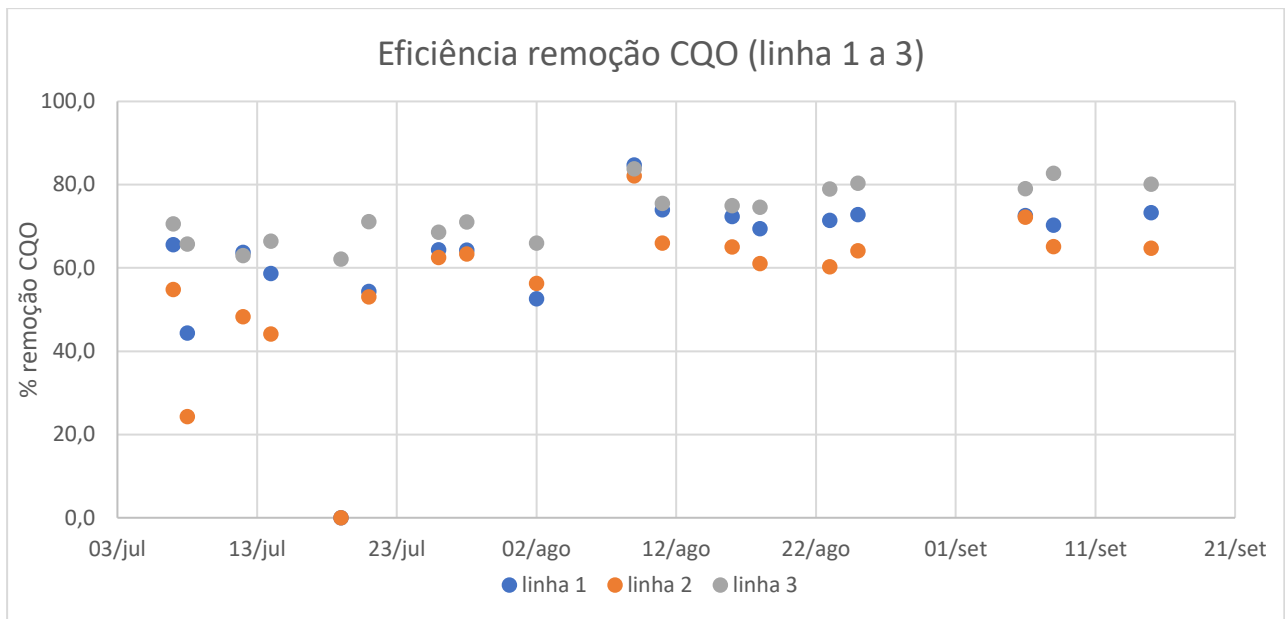


Figura 39 - Remoção de CQO ao longo do tempo no módulo com telhas cerâmicas e fibras de coco.

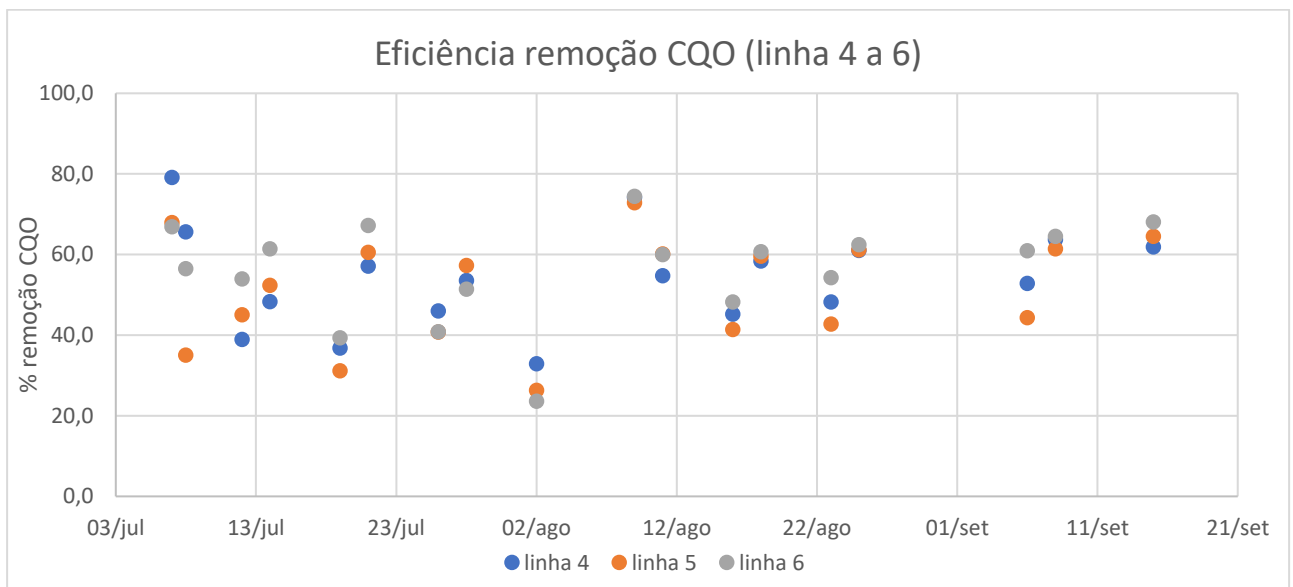


Figura 40 - Remoção de CQO ao longo do tempo no módulo com fibras têxteis.

4.7 Comparação com estudos anteriores

Para uma melhor compreensão do desempenho geral de cada linha da parede verde estudada, a Tabela 22 representa as concentrações médias e a percentagem média de eficiência de remoção de cada linha para os parâmetros SST,SSV e CQO.

Tabela 22 - Valores médios de SST, SSV e CQO

	Entrada	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Linha 5	Linha 6	
SST	mg/L	72	27	44	24	35	32	33
	RE, %	-	62	39	66	51	55	53
SSV	mg/L	54	19	28	11	25	18	24
	RE, %	-	74	61	85	65	74	67
CQO	mgO ₂ /L	629	206	251	166	280	295	265
	RE, %	-	73	67	78	63	61	65

Relativamente ao desempenho das plantas em comparação com os resultados obtido em Piçarra (2019) (tabela 9), estudo que usou as mesmas espécies de plantas e carga hidráulica semelhante, podemos verificar que todas as linhas da parede verde obtiveram resultados inferiores de eficiência de remoção de SST, mas no caso dos SSV obteve-se eficiências de remoção superiores nas linhas com meio de enchimento em telhas cerâmica com fibras de coco em ambas as espécies de plantas e resultados inferiores em ambas as espécies nas linhas com meio de enchimento de fibras têxteis. Em termos de eficiência de remoção de CQO todas as linhas da parede verde obtiveram resultados superiores ao estudo Piçarra (2019).

Comparando com Masi et al (2016), ambos os meios de enchimento do estudo apresentaram valores de eficiência de remoção superiores em todos os parâmetros. Comparando os meios de enchimento com Piçarra (2019), ambos os meios de enchimento do presente estudo apresentaram valores inferiores relativamente à eficiência de remoção de SST. As fibras têxteis apresentaram valores de eficiência de remoção superiores em termos de SSV, mas o mesmo não ocorreu com as telhas cerâmicas com fibras de coco que apresentou valores mais baixos. Ainda comparando com Piçarra (2019), ambos os meios de enchimento estudado apresentaram valores de eficiência de remoção de CQO superiores.

Comparando com os valores obtidos pelos estudos representados na tabela 10, os valores de eficiência de remoção de SST foram um pouco inferiores aos valores apresentados, sendo que na linha apenas com meios de enchimento de fibras cerâmicas com fibras de coco os valores foram bastante inferiores aos valores apresentados nos respetivos estudos. Relativamente ao CQO, os valores de eficiência de remoção estão dentro da gama dos resultados obtidos nos estudos anteriormente indicados.

5. Conclusão

A fim de avaliar a viabilidade da utilização de paredes verdes para o tratamento de AC, foi necessário analisar vários parâmetros de qualidade. Este estudo pretendeu também fazer a comparação entre 2 meios de enchimento e 2 espécies de plantas de modo a compreender a influência de cada um destes e como obter uma solução mais eficiente para cada um dos parâmetros de qualidade analisados.

A linha 3, composta por meio de enchimento em telhas cerâmicas e fibras de coco e com a espécie de planta *Asplenium onopteris*, foi a que apresentou melhores resultados para os parâmetros de CQO, SST, SST, apresentando valores médios de eficiência de remoção de 73.6%, 66.3% e 85.1% respetivamente. Podemos verificar que tal como indicado no Cap.2 relativamente a estudos realizado anteriormente (Ribeiro Pissarra et al., 2019), a *Asplenium onopteris* foi a espécie de planta que obteve melhores resultados.

Quanto ao OD e %OD, a linha 5 composta apenas por meio de enchimento em fibras têxteis foi a que apresentou melhores valores, neste caso valores mais altos em comparação com as restantes linhas da parede, apresentado valores de 4.93mgO₂/L e 57.2% respetivamente.

Olhando e comparando cada meio de enchimento, podemos verificar que de modo geral a utilização de fibras têxteis sem plantas teve um melhor desempenho face às telhas cerâmicas com fibra de coco, à exceção do CQO em que efetivamente as fibras têxteis tiveram um desempenho mais baixo. Relativamente aos SST e SSV a linha 2 apresentou valores de retenção mais baixos na fase inicial do estudo, sendo que estes, no final do estudo a sua percentagem rondava os 60% para ambos. Também podemos concluir que as fibras têxteis por si só são uma boa solução para retenção de sólidos suspenso.

Ainda relativamente aos meios de enchimento utilizados, podemos verificar que ambos apresentaram melhores resultados face às soluções estudadas no estudo realizado em (Masi et al., 2016).

Quanto às plantas, como indicado anteriormente, a planta da espécie *Asplenium onopteris* foi a espécie que apresentou melhores resultados em ambos os módulos. No módulo com meio de enchimento em telhas cerâmica e fibras de coco, ambas as espécies tiveram um impacto positivo. No caso do módulo com meio de enchimento em fibras têxteis estas não tiveram um impacto significativo, podendo concluir que as fibras têxteis não são o material mais indicado para as plantas, pois estas absorvem muita água, ficando muito ensopadas e as plantas preferem solos húmidos e arejados, mas não em excesso de água.

De modo geral podemos concluir que este estudo apresentou resultados bastante promissores, mas que ainda podem ser melhorados, necessitando de mais estudos para atingir os objetivos relativamente à qualidade da água necessária para os vários tipos de utilização a que esta é destinada.

5.1 Perspetivas futuras

Houve vários parâmetros importantes para avaliar a qualidades das águas que não puderam ser analisados neste estudo, mas que são tão importantes quantos os que foram analisados, como os parâmetros microbiológicos, azoto, fósforo e entre outros.

Existem ainda vários elementos a ser estudados no futuro que podem trazer melhorias a este tipo de sistemas, como o efeito de a recirculação da água efluente no sistema, algo que certos estudos indicam ser benéfico para a qualidade final das águas (Soares et al.,2018).

Este estudo teve a duração 2 meses durante o período de verão, sendo que durante as primeiras semanas do mesmo houve um período da adaptação das plantas o que condicionou um poucos os valores obtidos nesta fase de adaptação. Estudos por períodos mais longos devem ser realizados para permitir o estudo dos efeitos a longo prazo e como o próprio sistema se adapta às diferentes estações do ano e respetivas condições meteorológicas, visto que as plantas são sensíveis a estas mesmas, podendo perceber de que modo estes fatores afetam ou condicionam o desempenho das paredes verdes.

Outro fator que poderia ser bastante interessante de estudar, seria a combinação de vários meios de enchimento na mesma linha de escoamento, aproveitando as vantagens de cada solução no tratamento das AC. Como indicado anteriormente as fibras têxteis por si só são uma boa solução de retenção de sólidos suspensos e de OD, logo poderia ser interessante por exemplo na mesma linha combinar potes apenas com meio de enchimento em fibras têxteis (em número reduzido devido ao fraco desempenho noutros parâmetros) melhorando a capacidade de retenção de sólidos, aplicando fibras cerâmicas e fibras de coco com plantas nos restantes potes para tirar partido do desempenho em termos da redução de CQO.

Referências

- Amman, J. (2006). *Overview of greywater management Health considerations Discussed and approved at the regional consultation on national priorities and plans of action on management and reuse of wastewater.*
- APHA. (1995). *Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater.* Byrd Prepress.
- Arden, S., & Ma, X. (2018). Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 630, pp. 587–599). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.218>
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Piscoiro, J., Rizzo, A., & Masi, F. (2021). Assessment of the Treatment Performance of an Open-Air Green Wall Fed with Graywater under Winter Conditions. *ACS ES&T Water*, 1(3), 595–602. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00117>
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Piscoiro, J., Rizzo, A., & Masi, F. (2020a). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. In *Science of the Total Environment* (Vol. 711). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Piscoiro, J., Rizzo, A., & Masi, F. (2020b). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. In *Science of the Total Environment* (Vol. 711). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- Bojoo, Y., Pareek, V. K., & Ang, M. (2013). A review of greywater characteristics and treatment processes. In *Water Science and Technology* (Vol. 67, Issue 7, pp. 1403–1424). <https://doi.org/10.2166/wst.2013.675>
- de Almeida Soares, C. (2018). *TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZENTAS DOMÉSTICAS ATRAVÉS DE PAREDES VERDES Engenharia do Ambiente Outubro 2018.*
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4(1), 85–104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Fowdar, H. S., Hatt, B. E., Breen, P., Cook, P. L. M., & Deletic, A. (2017). Designing living walls for greywater treatment. *Water Research*, 110, 218–232. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.018>
- Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. (2013). Characteristics and treatment of greywater-a review. In *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 20, Issue 5, pp. 2795–2809). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0>
- Gorgich, M., & Nuno Formigo, S. (2016). *A Study on the Possibility of Using Greywater in Irrigation of Agricultural Products.*
- Kurniawan, S., Novarini, Yuliwati, E., Ariyanto, E., Morsin, M., Sanudin, R., & Nafisah, S. (2021). Greywater treatment technologies for aquaculture safety: Review. In *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. King Saud University. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.014>
- Marecos Do Monte, M. H. F. (2007). Guidelines for good practice of water reuse for irrigation: Portuguese standard NP 4434. *NATO Security through Science Series C: Environmental Security*, 253–265. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6027-4_25
- Masi, F., Bresciani, R., Rizzo, A., Edathoot, A., Patwardhan, N., Panse, D., & Langergraber, G. (2016). Green walls for greywater treatment and recycling in dense urban areas: A case-study in

- Pune. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 6(2), 342–347.
<https://doi.org/10.2166/washdev.2016.019>
- Morel, Antoine., & Diener, Stefan. (2006). *Greywater management in low an [i.e. and] middle-income countries : review of different treatment systems for households or neighbourhoods*. Sandec at Eawag.
- Neale, P. A., & Schäfer, A. I. (n.d.). *Magnetic ion exchange: Is there potential for international development?* <https://doi.org/10.1016/j.desal.0000.00.000>
- Nivala, Jaime., Puigagut, Jaume., von Sperling, Marcos., Dotro, Gabriela., Stein, Otto., Molle, Pascal., & Langergraber, G. (2017). *Treatment Wetlands*. IWA Publishing.
- O USO DA ÁGUA EM PORTUGAL OLHAR, COMPREENDER E ACTUAR COM OS PROTAGONISTAS CHAVE. (n.d.).
- Oron, G., Adel, M., Agmon, V., Friedler, E., Halperin, R., Leshem, E., & Weinberg, D. (2014). Greywater use in Israel and worldwide: Standards and prospects. *Water Research*, 48, 92–101.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.032>
- Pradhan, S., Helal, M. I., Al-Ghamdi, S. G., & Mackey, H. R. (2020). Performance evaluation of various individual and mixed media for greywater treatment in vertical nature-based systems. *Chemosphere*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125564>
- Prodanovic, V., Hatt, B., McCarthy, D., Zhang, K., & Deletic, A. (2017a). Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal. *Ecological Engineering*, 102, 625–635. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.045>
- Prodanovic, V., Hatt, B., McCarthy, D., Zhang, K., & Deletic, A. (2017b). Green walls for greywater reuse: Understanding the role of media on pollutant removal. *Ecological Engineering*, 102, 625–635. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.045>
- Prodanovic, V., Zhang, K., Hatt, B., McCarthy, D., & Deletic, A. (2018). Optimisation of lightweight green wall media for greywater treatment and reuse. *Building and Environment*, 131, 99–107.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.015>
- Ramprasad, C., Smith, C. S., Memon, F. A., & Philip, L. (2017). Removal of chemical and microbial contaminants from greywater using a novel constructed wetland: GROW. *Ecological Engineering*, 106, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.022>
- Ribeiro Pissarra, P., Fonseca Galvão, A., & Maria Rodrigues Vasconcelos Pinheiro Supervisor, H. (2019). *Green Wall Adaptation for Institutional Greywater Treatment Performance and Reuse Potential Assessment Environmental Engineering Examination Committee*.
- Rita Duque Ferreira, J., & Ana Fonseca Galvão Cristina Matos Silva, S. (2020). *Recycling materials on green walls for greywater treatment*.
- Santos, C., Taveira-Pinto, F., Cheng, C. Y., & Leite, D. (2012). Development of an experimental system for greywater reuse. *Desalination*, 285, 301–305.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.017>
- Shelef, O., Gross, A., & Rachmilevitch, S. (2012). The use of *Bassia indica* for salt phytoremediation in constructed wetlands. *Water Research*, 46(13), 3967–3976.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.020>
- TÂNIA CRISTINA RIBEIRO DE SOUSA. (2016). *ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS: CONCEITOS E DIMENSIONAMENTO* TÂNIA CRISTINA RIBEIRO DE SOUSA Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL-RAMO DE INFRAESTRUTURAS.
- Tanner, C. C. (1996). *Plants for constructed wetland treatment systems-A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species*.

Ungvári, C., Izbéki-Szabolcsik, A., & Bodnár, I. (2019). Analysis of Greywater Samples Treated by Filtration. *Műszaki Tudományos Közlemények*, 9(1), 247–250. <https://doi.org/10.33894/mtk-2018.09.57>

Anexos

ANEXO A – Ensaios de porosidade

RESÍDUOS TÊXTEIS BRANCOS			
Peso amostra SECA (gr)	83	Peso amostra HÚMIDA (gr)	238
Peso gobelé + amostra SECA (gr)	313	Peso gobelé + amostra HÚMIDA (gr)	292
Peso gobelé + amostra + água (gr)	630	Peso gobelé + amostra + água (gr)	421
Volume amostra (ml)	500	Volume amostra (ml)	370
Porosidade TOTAL	63,4%	Porosidade EFECTIVA	34,9%

RESÍDUOS TÊXTEIS BRANCOS			
Peso amostra SECA (gr)	86	Peso amostra HÚMIDA (gr)	197
Peso gobelé + amostra SECA (gr)	314	Peso gobelé + amostra HÚMIDA (gr)	251
Peso gobelé + amostra + água (gr)	907	Peso gobelé + amostra + água (gr)	485
Volume amostra (ml)	800	Volume amostra (ml)	430
Porosidade TOTAL	74,1%	Porosidade EFECTIVA	54,4%

RESÍDUOS TÊXTEIS BRANCOS			
Peso amostra SECA (gr)	89	Peso amostra HÚMIDA (gr)	226
Peso gobelé + amostra SECA (gr)	317	Peso gobelé + amostra HÚMIDA (gr)	280
Peso gobelé + amostra + água (gr)	654	Peso gobelé + amostra + água (gr)	389
Volume amostra (ml)	500	Volume amostra (ml)	350
Porosidade TOTAL	67,4%	Porosidade EFECTIVA	31,1%

RESÍDUOS TÊXTEIS BRANCOS			
Peso amostra SECA (gr)	54	Peso amostra HÚMIDA (gr)	124
Peso gobelé + amostra SECA (gr)	284	Peso gobelé + amostra HÚMIDA (gr)	178
Peso gobelé + amostra + água (gr)	999	Peso gobelé + amostra + água (gr)	374
Volume amostra (ml)	800	Volume amostra (ml)	330
Porosidade TOTAL	89,4%	Porosidade EFECTIVA	59,4%

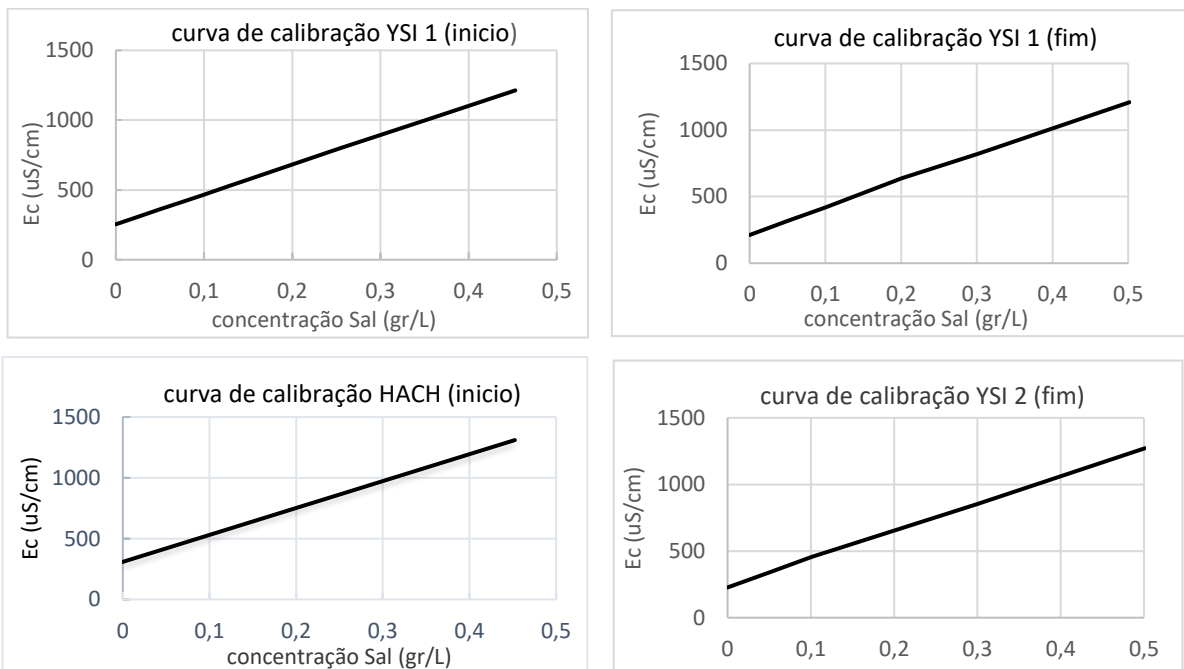
RESÍDUOS TÊXTEIS BRANCOS			
Peso amostra SECA (gr)	90	Peso amostra HÚMIDA (gr)	222
Peso gobelé + amostra SECA (gr)	318	Peso gobelé + amostra HÚMIDA (gr)	276
Peso gobelé + amostra + água (gr)	644	Peso gobelé + amostra + água (gr)	380
Volume amostra (ml)	500	Volume amostra (ml)	340
Porosidade TOTAL	65,2%	Porosidade EFECTIVA	30,6%

RESÍDUOS TÊXTEIS BRANCOS			
Peso amostra SECA (gr)	58	Peso amostra HÚMIDA (gr)	131
Peso gobelé + amostra SECA (gr)	288	Peso gobelé + amostra HÚMIDA (gr)	185
Peso gobelé + amostra + água (gr)	977	Peso gobelé + amostra + água (gr)	423
Volume amostra (ml)	800	Volume amostra (ml)	380
Porosidade TOTAL	86,1%	Porosidade EFECTIVA	62,6%

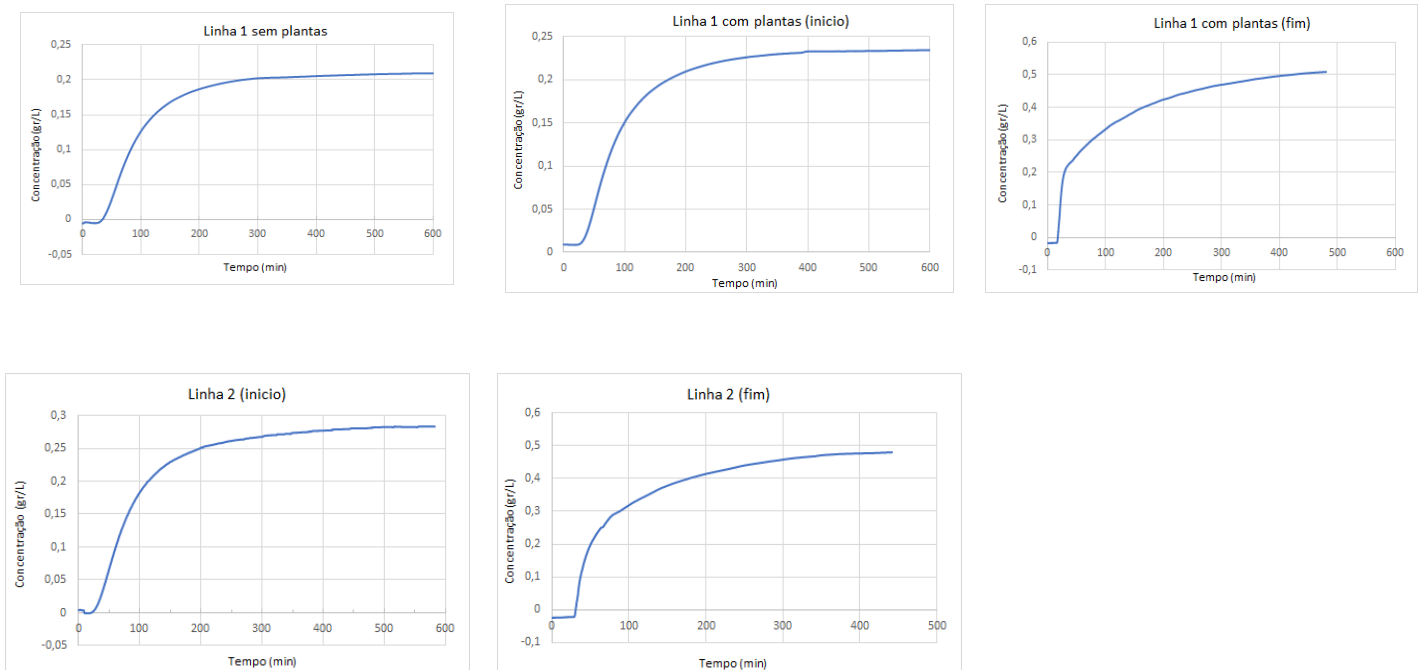
RESÍDUOS TÊXTEIS BRANCOS			
Peso amostra SECA (gr)	90	Peso amostra HÚMIDA (gr)	230
Peso gobelé + amostra SECA (gr)	318	Peso gobelé + amostra HÚMIDA (gr)	284
Peso gobelé + amostra + água (gr)	694	Peso gobelé + amostra + água (gr)	401
Volume amostra (ml)	500	Volume amostra (ml)	360
Porosidade TOTAL	75,2%	Porosidade EFECTIVA	32,5%

RESÍDUOS TÊXTEIS BRANCOS			
Peso amostra SECA (gr)	57	Peso amostra HÚMIDA (gr)	136
Peso gobelé + amostra SECA (gr)	287	Peso gobelé + amostra HÚMIDA (gr)	190
Peso gobelé + amostra + água (gr)	992	Peso gobelé + amostra + água (gr)	382
Volume amostra (ml)	800	Volume amostra (ml)	330
Porosidade TOTAL	88,1%	Porosidade EFECTIVA	58,2%

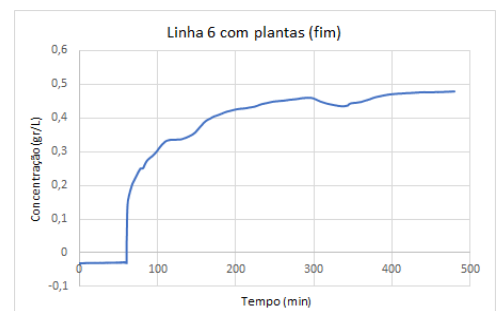
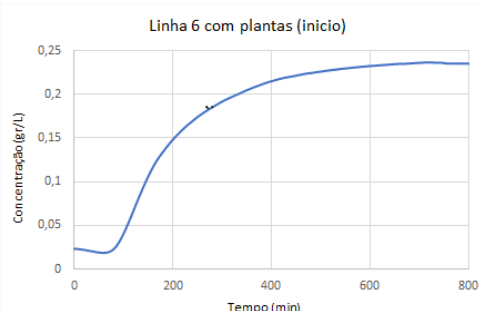
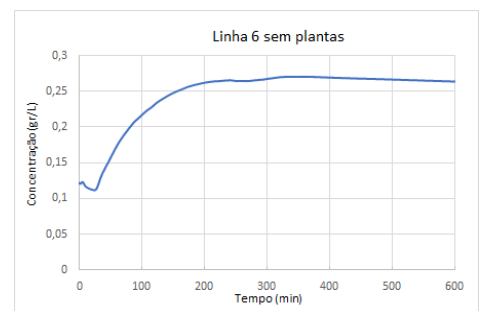
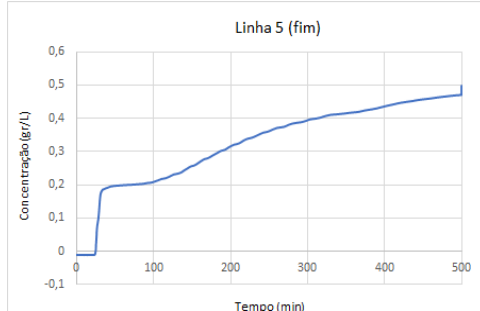
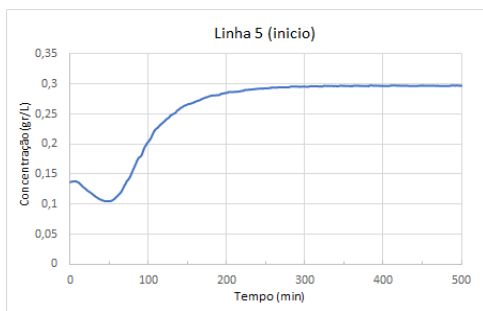
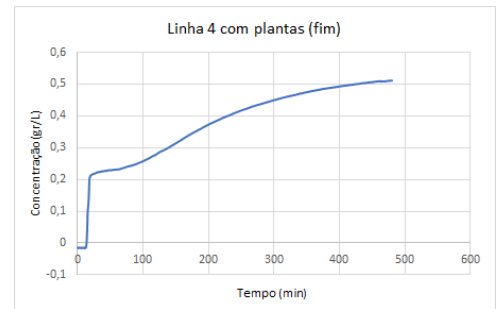
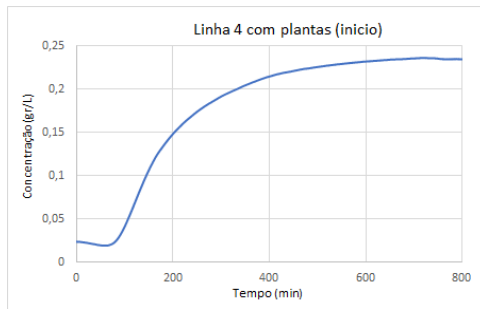
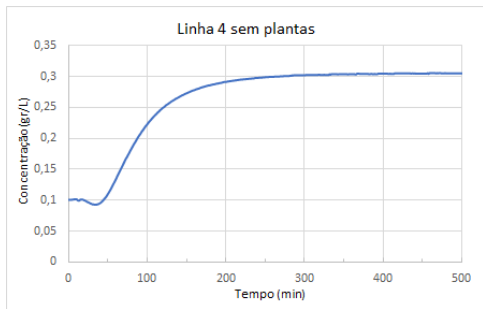
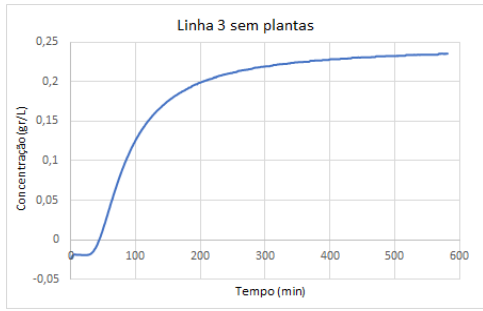
ANEXO B – Tracer test



Anexos B - 1 - Curvas de calibração de cada sonda.



Anexo B - 2 - Curvas de tracer tests.



Anexo B - 2 - Curvas de tracer tests (continuação).

ANEXO C – Ingredientes águas cinzentas



Cloreto Amónio.



limpador de superfícies.



Detergente loiça.



Pastilhas máquina de lavar loiça.



Sal Máquina de lavar loiça.



Detergente máquina de lavar roupa.



Amaciador Roupa.



Shampoo.



Gel de banho.



Condicionador cabelo.



Pasta de dentes.



Sabonete.

Anexo C - 1 - Ingredientes águas cinzentas

ANEXO D – Valores condutividade elétrica

	Condutividade electrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)						
	Entrada	linha 1	linha 2	linha 3	linha 4	linha 5	linha 6
07/jul	645	534	538	520	541	505	512
08/jul	670	669	665	670	660	677	695
12/jul	672	660	652	665	666	674	670
14/jul	626	670	660	678	668	668	671
19/jul	651	-	-	670	665	676	685
21/jul	613	675	668	674	652	673	667
26/jul	626	664	659	675	672	670	658
28/jul	629	643	644	652	653	650	650
02/ago	632	691	681	697	688	679	684
04/ago	655	691	689	688	692	694	690
09/ago	635	658	653	657	654	656	647
11/ago	624	658	647	638	648	638	642
16/ago	616	680	668	674	682	700	657
18/ago	626	747	742	738	752	758	739
23/ago	699	813	795	815	828	850	804
25/ago	706	741	749	751	759	755	746
06/set	642	707	696	713	701	701	698
08/set	614	664	656	664	-	-	-

Anexo D - 1 – Valores de condutividade elétrica ao longo do estudo.

ANEXO E – Valores de pH

	pH						
	Entrada	linha 1	linha 2	linha 3	linha 4	linha 5	linha 6
07/jul	8,99	7,07	7,11	7,24	7,21	7,23	7,24
08/jul	8,87	7,28	7,18	7,33	7,27	7,75	7,55
12/jul	8,98	7,09	7,18	7,24	7,15	7,33	7,35
14/jul	8,93	7,27	7,34	7,28	7,29	7,49	7,58
19/jul	8,94	-	-	7,34	7,21	7,15	7,34
21/jul	8,95	7,29	7,33	7,39	7,32	7,58	7,63
26/jul	9,08	7,33	7,28	7,33	7,22	7,4	7,38
28/jul	9,07	7,38	7,43	7,5	7,42	7,65	7,53
02/ago	9,31	7,26	7,45	7,29	7,36	7,49	7,43
04/ago	9,36	7,57	7,55	7,44	7,53	7,82	7,79
09/ago	9,55	7,74	7,55	7,52	7,7	7,89	7,74
11/ago	9,41	7,75	7,73	7,68	7,66	7,89	7,8
16/ago	9,32	7,6	7,57	7,44	7,71	7,85	7,55
18/ago	9,34	7,82	7,61	7,64	7,88	7,89	7,74
23/ago	9,31	7,51	7,47	7,5	7,64	7,49	7,53
25/ago	9,08	7,69	7,49	7,6	7,8	7,81	7,67
06/set	9,2	7,29	7,5	7,38	7,66	7,73	7,53
08/set	9,19	7,6	7,61	7,4	7,87	7,96	7,8
15/set	9,18	7,72	7,7	7,51	7,88	7,99	7,8

Anexo E - 1 - Valores de pH ao longo do estudo.

ANEXO F – Valores de OD e %OD

	OD (mg/L)						
	Entrada	linha 1	linha 2	linha 3	linha 4	linha 5	linha 6
07/jul	9,28	0,84	0,99	0,79	4,5	4,87	5,36
08/jul	9,95	0,82	0,77	0,6	1,68	5,24	5
12/jul	9,17	0,78	0,63	0,67	1,67	3,14	5,22
14/jul	9,47	0,9	0,88	2,55	2,2	4,67	5,48
19/jul	8,76	-	-	0,84	0,7	2,01	3,1
21/jul	9,43	0,68	0,52	0,62	0,74	5,2	5,37
26/jul	9,26	0,61	0,6	0,65	0,57	2,77	1,8
28/jul	8,92	0,84	2,45	4,77	1,54	5,83	3,19
02/ago	9,04	1,34	2,38	1,16	0,81	3,79	1,59
04/ago	9,09	2,77	2,65	1,62	2,01	5,07	4,17
09/ago	8,81	4,76	3,17	3,09	3,86	5,64	4,07
11/ago	8,84	5,6	5,42	5,55	4,27	6,23	5,62
16/ago	9,26	3,82	1,34	2,47	4,55	4,38	2,1
18/ago	8,95	5,24	3,07	4,6	5,97	5,95	5,12
23/ago	8,52	3,14	1,04	3,17	3,87	2,82	1,55
25/ago	8,33	4,58	1,81	4,58	5,96	6,43	4,56
06/set	8,64	1,51	1,74	3,92	4,7	5,69	3,15
08/set	8,86	3,5	2,31	2,85	6,15	6,85	5,5
15/set	8,03	4,89	3,82	4,31	6,37	7,1	6,15

Anexo F - 1 - Valores de OD ao longo do estudo.

	%OD						
	Entrada	linha 1	linha 2	linha 3	linha 4	linha 5	linha 6
07/jul	106,9	9,5	11,2	9	51,2	55,5	60,9
08/jul	114	9,3	8,8	6,8	19,2	59,6	58
12/jul	105,5	8,9	7,1	7,6	18,9	35,6	59,3
14/jul	105,6	10,5	10,3	29,8	25,6	54,4	64,1
19/jul	104,4	-	-	9,8	8,1	23,3	36,1
21/jul	110,1	7,9	6	7,2	8,6	60,2	62,1
26/jul	107,6	7,2	6,9	7,5	6,6	32,3	21
28/jul	104,2	9,7	28,2	55,1	17,7	67,3	36,9
02/ago	104	15,4	27,2	13,3	9,4	43,3	18,3
04/ago	104,9	32	30,6	18,8	23,3	58,5	48,3
09/ago	101,5	53,7	35,7	35	43,6	63,9	46,2
11/ago	102,7	64,5	62,3	64	49,4	71,9	65
16/ago	106,6	44,8	15,7	28,7	52,8	50,8	24,4
18/ago	105,5	60,1	35,1	52,7	68,4	67,9	58,9
23/ago	100,1	37,1	12,3	37,5	45,7	33,6	18,4
25/ago	99	53,7	21,3	53,7	69,9	75,1	53,8
06/set	102,2	18,3	21,1	47,2	56,5	68,9	37,9
08/set	105	41,7	27,5	34	73,7	81,7	65,9
15/set	96,1	57,6	44,9	50,6	74,9	83	72,3

Anexo F - 2 - Valores de %OD ao longo do estudo.

ANEXO G – Valores de SST e SSV

	SST (mg/L)						
	Entrada	linha 1	linha 2	linha 3	linha 4	linha 5	linha 6
07/jul	64	12	33	20	27	50	60
08/jul	133	53	100	32	73	80	90
12/jul	60	20	100	60	50	30	20
14/jul	60	13	60	15	13	13	33
19/jul	87	-	-	53	67	80	40
21/jul	133	120	110	125	71	85	58
26/jul	52	40	43	19	35	37	37
28/jul	42	29	32	9	37	23	21
02/ago	34	26	23	13	33	26	28
04/ago	31	23	29	15	30	18	25
09/ago	34	12	22	12	29	23	24
11/ago	41	5	16	5	23	9	17
16/ago	71	22	42	21	54	29	36
18/ago	70	19	25	16	19	13	22
23/ago	110	19	20	10	27	18	33
25/ago	92	15	36	8	13	12	25
06/set	71	22	27	10	25	32	23
08/set	140	22	36	9	22	15	21
15/set	35	20	31	7	17	14	22

Anexo G - 1 - Valores de SST ao longo do estudo.

	SSV (mg/L)						
	Entrada	linha 1	linha 2	linha 3	linha 4	linha 5	linha 6
26/jul	49	35	39	15	32	31	29
28/jul	36	26	31	8	34	20	19
02/ago	27	22	20	11	30	25	25
04/ago	27	22	26	14	26	17	22
09/ago	27	11	21	11	25	20	23
11/ago	26	5	15	5	16	7	14
16/ago	58	22	40	20	51	28	35
18/ago	57	18	25	13	18	11	21
23/ago	99	18	19	10	24	15	32
25/ago	79	14	36	8	12	11	24
06/set	58	18	27	9	24	27	23
08/set	128	19	35	9	21	15	20
15/set	25	16	30	6	16	12	20

Anexo G - 2 - Valores de SSV ao longo do estudo.

ANEXO H – Valores de CQO

	CQO (mgO ₂ /L)						
	Entrada	linha 1	linha 2	linha 3	linha 4	linha 5	linha 6
07/jul	494,5	170,1	223,4	145,6	103,1	158,5	163,7
08/jul	588,7	327,4	445,75	202	202,4	382,4	255,8
12/jul	642	232,8	332	237,6	392	352,4	295,3
14/jul	619,1	255,8	346,2	207,9	319,7	294,9	238,7
19/jul	544,1	-	-	206,2	343,7	374,5	329,9
21/jul	747	341,2	350,8	215,8	319,9	294,5	244,9
26/jul	599,9	214,1	224,9	188,6	323,7	355,3	354,5
28/jul	540,8	193,3	198,3	156,8	251,2	230,8	262,4
02/ago	429,1	203,6	187,7	146	287,8	316,2	327,8
04/ago	-	191,2	218,3	181,7	255,75	237,4	249,9
09/ago	1016,6	155,5	182,1	164,9	261,6	275,3	259,9
11/ago	500,75	130,6	170,5	122,8	226,6	199,5	200,3
16/ago	662,8	183,4	232	165,8	362,8	388,3	342,8
18/ago	663,7	202,8	258,7	168,8	275,8	267,8	260,8
23/ago	682,8	195	271,2	143,9	353,3	390,8	312
25/ago	646,6	176,1	232	127,1	252	250,8	242,4
06/set	617,4	169,2	171,6	129,7	291,2	343,3	241,2
08/set	672,4	199,8	234,5	116,4	244	259,1	238,3
15/set	649,1	173,5	229,1	129,3	247	230,3	207

Anexo H - 1 - Valores de CQO ao longo do estudo.