



**TÉCNICO**  
LISBOA

# **Remediação da água de uma lagoa recorrendo a Métodos Físico – Químicos para o seu tratamento**

**Tânia Cristina Frazão Santo**

Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre em

## **Engenharia Química**

Orientador: Prof. Doutor Jorge Manuel Rodrigues de Carvalho (IST)

Co-Orientador: Eng.º Nuno Pedroso (Hubel)

### **Júri**

Presidente: Prof. Doutor Sebastião Manuel Tavares da Silva Alves

Orientador: Prof. Doutor Jorge Manuel Rodrigues de Carvalho

Vogal: Prof. Doutor Vítor Manuel Geraudes Fernandes

**Novembro 2015**



# Agradecimentos

---

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, o Prof. Doutor Jorge Manuel Rodrigues de Carvalho e o Engenheiro Nuno Pedroso, por toda a ajuda e suporte demonstrados ao longo deste trabalho.

Ao Doutor Remígio Machado e aos Engenheiros João Rodrigues, Carina Domingues e Catarina Vidinha por toda disponibilidade demonstrada e ajuda durante os ensaios laboratoriais, sem eles não teria sido possível apresentar este trabalho.

À minha família, especialmente aos meus pais e à minha irmã, por todo o apoio, carinho e compreensão prestados ao longo do meu percurso universitário, por todos os sacrifícios que fizeram por mim, por me darem as oportunidades e condições para que o meu crescimento fosse possível.

Às minhas colegas e amigas, Sandra e Elisabete, por toda a amizade, paciência e horas de trabalho juntas.

Gostaria de agradecer à amiga Maria, por toda a sua amizade e apoio ao longo destes anos e por ter sempre a resposta certa, no momento certo. Aos meus amigos Maria Inês, Inês, Sara, Rui, Miguel e Renata por toda a sua amizade e carinho.

Ao Eduardo, Nelson, Catarina, Andreia e João por toda a sua amizade, desde sempre.

Agradeço a todos aqueles que, apesar de não serem aqui invocados, me apoiaram ao longo do curso.



# Resumo

---

Atualmente, uma das principais questões a nível ambiental, é o controlo da poluição dos recursos naturais de água.

O presente trabalho teve como objetivo obter um processo tecnológico, para a melhoria da qualidade da água de uma lagoa, através da remoção de várias partículas, incluindo microalgas, a fim de se baixar substancialmente a turbidez desta água. Geralmente, estas partículas são de sílica e matéria orgânica, que podem conter aniões adsorvidos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , etc.) e alguns catiões ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , etc.).

Pretendeu-se ainda que, com a tecnologia empregue, haja a possibilidade de recuperação das várias partículas, ricas em matéria orgânica e nutrientes, para a sua posterior reutilização.

As tecnologias estudadas, no desenvolvimento desta dissertação, envolveram processos de retenção de particulado em leitos mistos de vários materiais e granulometrias. Na sequência desta etapa, efetuaram-se estudos com fibras ocas de ultrafiltração, as quais permitiram estudar a remoção da turbidez residual da suspensão.

Nos estudos com leitos mistos, foram também escolhidos materiais tais como o hidróxido férrico, o qual pode remover alguns elementos aniônicos.

Nestes estudos, os parâmetros considerados foram as velocidades superficiais da água a tratar no leito, o volume de efluente que passou no leito, até à sua colmatação, e a turbidez da água ao longo do tempo. Iguamente, a jusante do equipamento, foi possível analisar o teor de alguns aniões e catiões, na água.

Foram ensaiados fluxos ascendentes e descendentes nos leitos mistos. No caso em estudo, constatou-se que o fluxo ascendente permite passar um volume de água superior ao caso do fluxo descendente.

Tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios, concluiu-se que um processo integrado de leito misto de areia e ultrafiltração por membranas de fibras ocas seria o processo mais adequado ao tratamento da água desta lagoa.

**Palavras – Chave:** leitos mistos, ultrafiltração, nutrientes, tratamento de água



# Abstract

---

Nowadays, the contamination of natural water bodies with nutrients is a global environmental issue.

The main propose of the present work was the achievement of a technologic process to improve water lake quality.

Generally, the particles present in water bodies are organic matter, microalgae and silica and some adsorbed ions ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ). Therefore, the removal of particles, that embody nutrients, become the object of this study.

The technologies involved in the development of this work include retention processes with fixed bed columns and ultrafiltration membranes.

Different materials, such as sand, anthracite and calcite, were studied as granular media filters for particulate matter. Ferric hydroxide, which is proved to be an anionic elements effective removal, was also studied.

Besides the particles and some dissolved matter removal, other parameters were considered in this work. The quantity of effluent that passes through the granular media before clogging, the superficial velocity of filtration and the turbidity of the effluent are some of the parameters considered on the choice of the technological process.

A comparing study about up-flow and down-flow processes was carried on in fixed bed columns and it was conclude that up-flow process was more suitable for the water treatment process since head-losses build up in down-flow retention are more likely to occur that at up-flow retention.

Taking into account the results obtained in this work, it was concluded that an integrated process: fixed bed column with mixed sand media followed by ultrafiltration with membranes, was the most reliable process.

**Keywords:** Fixed bed columns, ultrafiltration, nutrients, water treatment

---



# Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos e Estrutura de Trabalho.....	1
1.2 Estado da Arte .....	2
1.2.1 Tecnologias de Tratamento Físicas para a Remoção de Particulado .....	5
1.2.2 Tecnologias de Tratamento Químico.....	10
1.2.3 Tecnologias de Tratamento Biológico .....	12
2. Parte Experimental.....	15
2.1 Matéria-Prima .....	16
2.2 Estudos preliminares conducentes à escolha da tecnologia a ser experimentada... 16	
Ensaio de precipitação química para escolha do coagulante e floculante mais adequado ao processo.....	17
Ensaio de precipitação química com sulfato de alumínio.....	19
Ensaio de precipitação química com coagulantes de Policloreto de Alumínio .....	22
Conclusões relativas aos estudos de precipitação química.....	23
2.3 Técnicas Analíticas e Experimentais.....	23
Determinação da turbidez da água.....	23
Determinação do pH da água .....	23
Determinação da concentração de Alumínio na água.....	24
2.4 Ensaio em Colunas de diâmetro $d=2,5$ cm .....	24
2.5 Ensaio em Colunas de diâmetro $d=5,2$ cm .....	27
2.6 Ensaio de Ultrafiltração.....	28
3. Tratamento de Resultados .....	30
3.1 Ensaio em colunas de leito fixo com diâmetro $d=2,5$ cm .....	30
3.1.1 Leitos de Areia .....	30
3.1.2 Leitos de Antracite .....	40
3.1.3 Leitos de Calcite.....	48
3.1.4 Leitos de Hidróxido de Ferro.....	55
3.1.5 Conclusões sobre os leitos mistos em coluna $d=2,5$ cm.....	58
3.2 Ensaio com Leitos Mistos em Colunas com $d=5,2$ cm.....	59
3.2.1 Ensaio 1 – Fluxo Descendente .....	59
3.2.2 Ensaio 2 – Fluxo Ascendente .....	61

3.2.3 Conclusões relativas aos fluxos ascendente e descendente.....	63
3.3 Ensaio de Ultrafiltração.....	64
4. Conclusões Gerais e Perspetivas de trabalho futuro .....	67
5.Referências Bibliográficas.....	70
Anexos.....	72
Anexo I – Caracterização inicial da água da lagoa em estudo .....	72
Anexo II – Retas de Calibração para a determinação do teor de nutrientes na água.....	75
Anexo III – Retas de Calibração para a determinação do teor de Alumínio na água.....	75
Anexo IV – Especificações da Membrana de Ultrafiltração .....	77
Anexo V – Técnicas Experimentais para a medição da porosidade e peneiração dos materiais.....	77
Peneiração .....	77
Porosidade .....	77
Anexo VI – Cálculos para a obtenção dos valores médios de remoção de particulado.	78

# Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema Resumo dos tratamentos existentes para a remoção de nutrientes ....	4
Figura 2 Filtro de areia utilizada no tratamento de águas .....	7
Figura 3 Montagem experimental das colunas d=2,5cm .....	25
Figura 4 Lavagem do leito de areia, no final de um ensaio .....	26
Figura 5 Montagem Experimental das Colunas de d=5,2cm.....	27
Figura 6 Membrana de Ultrafiltração.....	29
Figura 7 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 1 - Areia Fina .....	32
Figura 8 Variação da Concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 2 - Areia Fina .....	33
Figura 9 Variação da concentração particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 1 - Areia Grossa.....	36
Figura 10 Valores da remoção de matéria solúvel durante o Ensaio 1 - Areia Grossa .....	37
Figura 11 Variação da Concentração particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 2 – Areia Grossa.....	38
Figura 12 Valores da percentagem de remoção de matéria solúvel para o Ensaio 2 – Areia grossa .....	39
Figura 13 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 1 - Antracite Fina .....	42
Figura 14 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 2 - Antracite Fina .....	44
Figura 15 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 1 - Antracite grossa .....	46
Figura 16 Valores de Remoção de Matéria Solúvel do ensaio 1 - Antracite Grossa .....	47
Figura 17 Variação da Concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 1 - Calcite Fina.....	50
Figura 18 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 2 - Calcite Fina.....	51
Figura 19 Variação dos valores de remoção de matéria solúvel com Calcite Grossa.....	53
Figura 20 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio - calcite grossa.....	54
Figura 21 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel no ensaio 1 .....	56
Figura 22 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 2 .....	57
Figura 23 Variação da concentração particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 1 - Fluxo Descendente.....	60
Figura 24 Variação da Concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 2 - Fluxo Ascendente.....	62
Figura 25 Concentração inicial de particulado e matéria solúvel da água da lagoa ao longo do tempo.....	74
Figura 26 Reta de Calibração para a determinação do teor de nutrientes .....	75
Figura 27 Reta de Calibração para a determinação do teor de Alumínio na água – 03/09/2014.....	75
Figura 28 Reta de Calibração para a determinação do teor de alumínio na água - 04/09/2014.....	76
Figura 29 Reta de Calibração para a determinação do teor de alumínio na água - 05/09/2014.....	76



# Índice de Tabelas

---

Tabela 1 Critério Nacional para avaliação do estado trófico em lagoas e albufeiras (INAG 2002) [3].....	2
Tabela 2 Parâmetros analisados para a água da lagoa: Nutrientes Totais e Solúveis, Turbidez e pH.....	16
Tabela 3 Parâmetros analisados para a água da lagoa: pH, turbidez, concentração de particulado e alumínio.....	17
Tabela 4 Potencial Zeta para as amostras da água em estudo, em vários pontos da lagoa.....	18
Tabela 5 Resultados obtidos dos clarificados da precipitação química, com três coagulantes diferentes.....	18
Tabela 6 Características dos coagulantes de Policloreto de Alumínio.....	19
Tabela 7 Condições Experimentais e Resultados obtidos nos ensaios com adição de coagulante sulfato de alumínio.....	19
Tabela 8 Condições experimentais e resultados obtidos nos ensaios com adição de floculante.....	20
Tabela 9 Condições experimentais e resultados obtidos nos ensaios com variação do tempo de agitação rápida.....	21
Tabela 10 Condições Experimentais e resultados obtidos nos ensaios com variação do tempo de agitação lenta.....	21
Tabela 11 Resultados da precipitação química com policloreto de alumínio 0,5 ppm.....	22
Tabela 12 Resultados dos ensaios de precipitação química com policloreto de alumínio 1 ppm.....	22
Tabela 13 Granulometrias, Porosidades e Densidades da Areia.....	30
Tabela 14 Condições Experimentais dos Ensaios realizados com Leito de Areia Fina.....	31
Tabela 15 Resultados médios obtidos no Ensaio 1 - Areia Fina.....	33
Tabela 16 Resultados médios obtidos no Ensaio 2 - Areia Fina.....	34
Tabela 17 Condições Experimentais dos Ensaios realizados com Leito de Areia Grossa.....	35
Tabela 18 Resultados médios obtidos no em leito Ensaio 1 – Areia Grossa.....	37
Tabela 19 Resultados médios obtidos no ensaio 2 - Areia Grossa.....	39
Tabela 20 Granulometrias, porosidades e densidades para a antracite.....	41
Tabela 21 Condições experimentais dos ensaios com antracite fina.....	41
Tabela 22 Resultados médios obtidos no Ensaio 1 - Antracite Fina.....	43
Tabela 23 Resultados médios obtidos no Ensaio 2 - Antracite Fina.....	45
Tabela 24 Condições Experimentais do ensaio com antracite grossa.....	45
Tabela 25 Resultados médios obtidos no ensaio 1 - Antracite Grossa.....	47
Tabela 26 Granulometrias, porosidades e densidades da Calcite.....	48
Tabela 27 Condições experimentais dos ensaios com calcite fina.....	49
Tabela 28 Resultados médios obtidos no ensaio 1 - Calcite Fina.....	50
Tabela 29 Resultados médios obtidos no ensaio 2 - Calcite Fina.....	51
Tabela 30 Condições Experimentais do ensaio com calcite grossa.....	52
Tabela 31 Resultados médios obtidos no ensaio 1 - Calcite Grossa.....	53
Tabela 32 Granulometrias e porosidades do Hidróxido de Ferro, GEH.....	55
Tabela 33 Condições experimentais nos ensaios com hidróxido de ferro.....	55
Tabela 34 Resultados obtidos no Ensaio 1 com hidróxido de ferro.....	57
Tabela 35 Resultados obtidos no ensaio 2 com hidróxido de ferro.....	58
Tabela 36 Condições experimentais dos ensaios realizados com leitos mistos de areia – fluxos ascendente e descendente.....	59

Tabela 37 Granulometrias e porosidades da areia - Fluxo Descendente .....	59
Tabela 38 Resultados médios dos Ensaios em Fluxo Descendente com leitos mistos de areia.....	61
Tabela 39 Granulometrias e porosidades da areia - Fluxo Ascendente .....	61
Tabela 40 Resultados médios do ensaio 2 - fluxo ascendente .....	62
Tabela 41 Resultados obtidos na Ultrafiltração com água pré-filtrada.....	65
Tabela 42 Resultados obtidos na Ultrafiltração com água da lagoa .....	65
Tabela 43 Composição inicial da água da lagoa em estudo .....	72
Tabela 44 Concentração inicial de particulado e matéria solúvel, da água da lagoa .....	73
Tabela 45 Valores obtidos para a remoção de particulado e matéria solúvel com leitos de areia grossa - Ensaio 1 .....	78



# 1. Introdução

---

## 1.1 Objetivos e Estrutura de Trabalho

O presente trabalho centra-se na obtenção de um processo tecnológico inovador, para a melhoria da qualidade da água de uma lagoa, através da remoção de várias partículas incluindo microalgas, presentes na água estudada. Pretende-se ainda que, com a tecnologia empregue, seja possível recuperar o particulado retido, para a sua posterior reutilização.

Para responder aos objetivos propostos, realizou-se uma série de ensaios descritos nas alíneas seguintes:

- Ensaios preliminares de precipitação química efetuados em “Jar-Test” (estudo da adição de coagulantes e floculantes, para tratamento químico da água).

- Ensaios em colunas de leito misto ( $d=2,5\text{cm}$ ), com vista à escolha do meio mais eficiente (estudos sobre a influência da altura do leito, granulometria do material e velocidades superficiais de passagem).

- Ensaios em colunas de leito misto ( $d=5,2\text{cm}$ ) (estudos sobre influência do sentido do fluxo de passagem e velocidades superficiais de passagem).

- Ensaios de ultrafiltração, com uma membrana de polisulfona em fibras ocas, variando as condições operatórias (caudal e pressão).

- Análises para determinação da concentração de matéria orgânica, nas amostras de água.

Esta dissertação, encontra-se estruturada segundo os objetivos propostos acima e organizada numa série de capítulos.

No primeiro capítulo apresentam-se os objetivos deste trabalho, bem como o estado da arte, onde se abordam as tecnologias de tratamento já existentes, na remoção de partículas finas.

No capítulo 2 encontram-se os estudos preliminares conducentes à escolha da tecnologia a ser experimentada e os procedimentos experimentais efetuados durante este trabalho. O tratamento dos resultados obtidos e a sua discussão estão presentes no capítulo 3 deste trabalho.

As conclusões obtidas com esta dissertação, bem como algumas questões a seguir para futuras investigações sobre o tema, são descritas no capítulo 4. Finalmente, o capítulo 5 apresenta as referências bibliográficas.

Os anexos colocados no final deste trabalho, têm a finalidade de complementar as informações apresentadas.



## 1.2 Estado da Arte

Atualmente, uma das principais questões a nível ambiental, é o controlo da poluição dos recursos naturais de água. Esta poluição, com origem nas práticas de agricultura intensivas e também na desagregação de rochas que contêm matéria na sua composição, pode gerar o fenómeno de entrada excessiva de nutrientes.

Segundo alguns estudos indicam, cerca de 50% dos lagos e reservatórios de água existentes no mundo estão num estado eutrófico, tornando este fenómeno um problema a nível global. [1]

Um processo que se caracteriza pela entrada excessiva de nutrientes, nas massas de água, provoca um crescimento descontrolado da população de algas e outros organismos fitoplânctónicos (fenómeno designado por “*bloom*”).

A consequência direta do aumento de plantas aquáticas, na superfície de uma lagoa ou reservatório de água, é a diminuição da entrada de luz solar que, por sua vez, vai provocar a degradação das algas existentes nas camadas inferiores de água.

Como resultado da degradação das algas e de outras plantas, há uma redução do nível de oxigénio na água que, em última análise, conduz ao crescimento de microrganismos anaeróbicos, que possuem a capacidade de reduzir sulfatos a sulfitos e estes a ácido sulfídrico, provocando um mau cheiro, nos recursos de água.

Assim, o estado eutrófico de uma lagoa ou reservatório de água altera a vida de várias espécies aquáticas, provocando a diminuição da biodiversidade, afetando a estética dos espaços naturais e a qualidade da água em si.

Em Portugal, o Instituto Nacional da Água (INAG 2002) definiu o Critério Nacional para a avaliação quantitativa do estado trófico de lagoas e albufeiras. Este critério é baseado no critério elaborado pela OCDE (1982) e está representado na tabela 1. [3]

Tabela 1 Critério Nacional para avaliação do estado trófico em lagoas e albufeiras (INAG 2002) [3]

Parâmetros	Estado Trófico		
	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Nutrientes (mg P/m <sup>3</sup> )	<10	10-35	>35
Clorofila a (mg/m <sup>3</sup> )	<2,5	2,5-10	>10
Oxigénio Dissolvido (%sat)	-	-	<40

Segundo esta avaliação, existem três estados tróficos: oligotrófico, mesotrófico e eutrófico, que são definidos pelas concentrações no meio em relação a três parâmetros (nutrientes, clorofila a e oxigénio dissolvido). O estado trófico global corresponde ao estado do parâmetro de avaliação que está mais desfavorável.

Assim, além da evidente preocupação com as entradas de nutrientes no meio aquático, também é necessário ter em conta o aumento da taxa de crescimento de algas e outros micro-organismos nas águas, quando se pretende classificar o estado trófico de um meio. Este dado é avaliado pelo parâmetro da clorofila a, que dá indicação da biomassa fitoplanctónica existente na água. [3]

Os nutrientes, como referido anteriormente, são essências para o crescimento de algas. Aliás, em certos sistemas, a concentração necessária de nutrientes para desencadear este fenómeno pode ser tão baixa quanto 0,01 mg/L. [4] [5]

Estes nutrientes pode assumir a forma particulada (partículas sólidas e organismos aquáticos) ou estar dissolvido na água (matéria orgânica). [1]

As fontes de entrada de nutrientes nos lagos e lagoas podem ter duas origens distintas: a descarga de águas residuais domésticas e industriais ou a escorrência superficial de fertilizantes usados nas práticas de agricultura intensivas, ou ainda pela desagregação de rochas, que contêm nutrientes na sua composição. [3]

A concentração de nutrientes nas águas residuais, nas estações de tratamento, pode variar largamente, tendo em conta a sua origem. Assim, a carga pode ir desde alguns miligramas por litro (águas residuais domésticas) até umas centenas ou mesmo milhares de mg/L (águas industriais). [6] E a redução normalmente conseguida, nas estações de tratamento de águas residuais, não é suficiente para baixar a concentração destes, para valores aceitáveis nos recursos naturais.

Assim, torna-se imperativo encontrar um método de tratamento adequado, para a redução da carga de nutrientes que entra num lago ou noutra corpo de água.

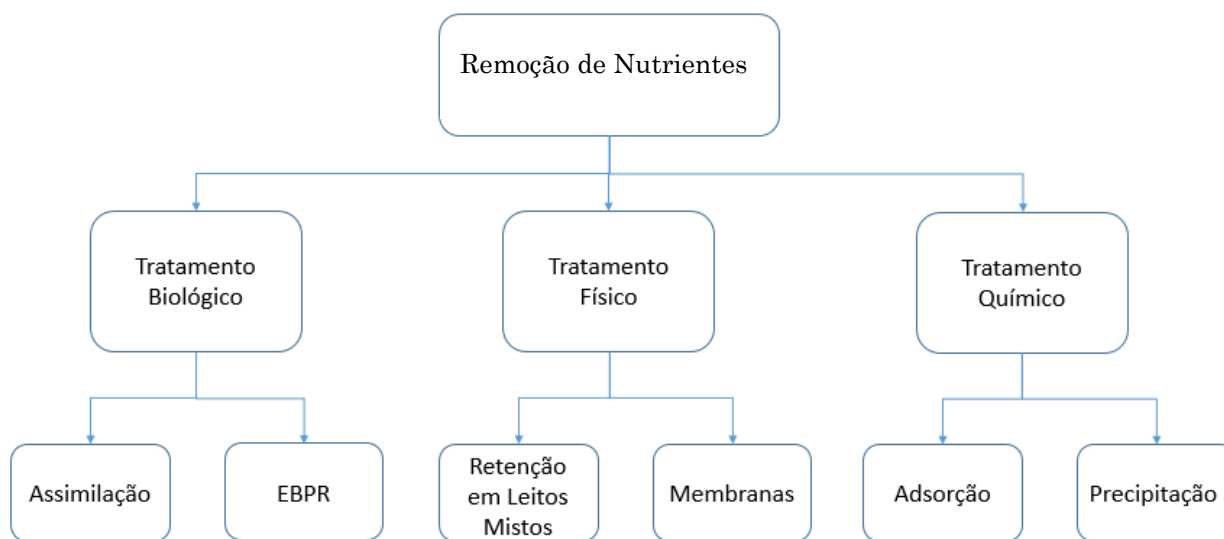
As tecnologias já existentes para a remoção de partículas de águas podem ser classificadas em três categorias: físicas, químicas e biológicas [6-8].

A título de exemplo, os tratamentos que têm em vista a remoção do particulado, podem utilizar a retenção do particulado em leitos mistos e unidades de ultrafiltração, ou através da precipitação química, recorrendo a floculantes e coagulantes [9].

Para a remoção de matéria orgânica, sulfatos e nitratos podem ser utilizados tratamentos químicos, como a adsorção química em leitos mistos, em que os agentes de adsorção são o Hidróxido de Ferro e Calcite, ou o uso de agentes de precipitação química (sais de cálcio, ferro ou alumínio) [5] [10].

O tratamento biológico é, normalmente, efetuado nas estações de tratamento de águas residuais. Os nutrientes presentes nestas águas é removido por assimilação (incorporação dos nutrientes como elementos da biomassa, através do crescimento de organismos fotossintéticos) ou, mais recentemente, nas lamas ativadas, através de organismos acumuladores de nutrientes (PAO's) que os armazenam, como reserva energética, através do processo de remoção biológica de nutrientes reforçada (EBPR). [6]

Na figura 1 está representado um esquema resumo das várias tecnologias existentes para a remoção de nutrientes das águas. Os tratamentos referidos acima serão explicados, mais detalhadamente à frente.



**Figura 1 - Esquema Resumo dos tratamentos existentes para a remoção de nutrientes**

Os nutrientes, como referido anteriormente, possuem diversas aplicações a nível industrial entre as quais, como composto nos fertilizantes agrícolas e numa variedade de detergentes para uso doméstico. [3]

Deste modo, a recuperação destes nutrientes das águas residuais, de lagos e outros meios aquáticos tem vindo a tornar-se uma questão fulcral nos últimos anos [7].

O desenvolvimento de tecnologias eficientes na remoção e recuperação de nutrientes permitirá, não só o controlo da poluição, como também a possibilidade de reutilização destes compostos, na indústria ou agricultura.

## 1.2.1 Tecnologias de Tratamento Físicas para a Remoção de Particulado

Os processos de separação sólido-líquido são amplamente utilizados a nível industrial e o tratamento de águas não é exceção. Estas separações englobam uma variedade de equipamentos e técnicas, tendo em conta o tipo de separação, a sua força motriz ou o modo de operação (contínuo ou descontínuo). [9]

Os processos de separação sólido-líquido podem ser classificados em dois modos principais de separação:

-Sedimentação: a separação é efetuada tirando partido da diferença de densidades entre as partículas e o fluido, quando aplicado um campo de forças. As partículas sedimentam no fundo e o líquido é clarificado. Quando se trata da retenção de partículas muito pequenas é essencial que se recorra ao uso de coagulantes e floculantes.

-Leitos Granulares Mistos: a suspensão que se pretende separar passa através de um meio filtrante onde as partículas ficam retidas, clarificando o fluido.

As tecnologias associadas ao tratamento físico de águas, para a remoção de particulado fino, podem ser a retenção em leitos granulares e tecnologias utilizando membranas. [6]

### Retenção em Leitos Granulares Mistos

Os leitos granulares mistos têm sido aplicados no tratamento de águas municipais e industriais, bem como no tratamento de águas residuais. A par da sedimentação, este é o processo mais utilizado, para separar partículas existentes nas águas residuais. As aplicações mais comuns deste tipo de leitos, nas estações de tratamento de águas residuais, são [11]:

- A remoção de flocos, químicos e biológicos, dos efluentes, após o tratamento secundário, nas estações de tratamento,
- A remoção de sólidos após a coagulação química das águas residuais, no tratamento terciário.

A utilização de leitos granulares envolve a passagem de água, através de um meio composto de material granular, resultando na deposição dos sólidos no leito. Eventualmente, a perda de carga ao longo de leito torna-se excessiva, ou a capacidade do leito para remover sólidos diminui. Torna-se, então, necessário limpar o leito, para restaurar as condições operatórias e a qualidade do efluente, para níveis aceitáveis. O tempo de operação entre lavagens do leito é denominado de Ciclo [9,11].

A lavagem do leito, designada por "backwash", é realizada através de um fluxo de água de lavagem ascendente e de um fluxo de ar comprimido, em regime turbulento. A lavagem ascendente estratifica o leito de acordo com a velocidade de sedimentação das partículas do

meio, determinada pelo tamanho, forma e gravidade específica dos materiais do meio [11]. Normalmente, utiliza-se 5% - 10% do volume processado, para a água de lavagem [9].

No tratamento de águas, o uso de colunas de leito fixo (retenção em leitos mistos) é a prática mais comum e é sobre este tipo de equipamento que se vai abordar mais profundamente.

Os equipamentos podem ser colunas fechadas, permitindo pressões de entrada maiores que a atmosférica, ou colunas abertas, onde apenas existe a pressão hidrostática acima do leito, para superar a perda de carga (leitos gravíticos) [11].

Ao longo da retenção, há a deposição das partículas em suspensão, na superfície do leito, causando um bloqueio à passagem do líquido, como se de um filtro de areia se tratasse. Este fenómeno vai provocar um aumento da perda de carga ao longo do leito e a diminuição do caudal de passagem, pelo que este tipo de equipamentos só é adequado para suspensões com teor baixo em sólidos (cerca de 0,5 g/L) [9].

### *Leitos Gravíticos*

Os Leitos Gravíticos caracterizam-se por utilizarem a gravidade como força motriz no escoamento da suspensão, através do meio poroso. Os leitos podem ser de velocidade superficial lenta ou rápida [12].

#### **Leitos Gravíticos – velocidade superficial lenta**

O meio filtrante normalmente utilizado é a areia fina, com diâmetros compreendidos entre 0,15 e 0,35 mm, e a velocidade de escoamento é muito lenta (entre 0,1 e 0,4 m/h) [12].

Esta operação caracteriza-se pela formação de uma camada de matéria biológica, na superfície do leito de areia. Este biofilme contém algas, bactérias, fungos e outros organismos aquáticos e é responsável pela retenção de sólidos efetiva da água a tratar, como se de um filtro de areia se tratasse.

À medida que a água passa através do leito misto, as partículas em suspensão são retidas, o material orgânico dissolvido é adsorvido no leito.

Com o crescimento do biofilme, existe uma diminuição do fluxo de filtração e o filtro vai perdendo a sua eficiência. Assim, quando a perda de carga toma valores elevados, é necessário retirar o biofilme existente, através de uma raspagem mecânica à superfície do meio, sendo também necessário fazer um backwash do leito de areia [9].

### **Leitos Gravíticos - Velocidade Superficial Rápida**

O leito é normalmente preenchido por areia com granulometrias de diâmetro acima dos 0,55mm. A velocidade superficial de escoamento também atinge valores muito maiores que os equipamentos de retenção lenta, situando-se entre os 4 e os 21 m/h [12].

Neste caso, a retenção dá-se no próprio meio granular e os sólidos suspensos são retidos ao longo do leito.

Ao longo da retenção, a perda de carga vai aumentando, à medida que as partículas vão ficando retidas. Quando esta atinge um valor crítico, deve-se realizar uma lavagem ao leito através da passagem de um caudal de água de lavagem em fluxo ascendente e em condições turbulentas (“backwash”).

Outro indicador importante da colmatação do leito é o valor de turbidez da água filtrada. À medida que o material filtrante vai ficando saturado de partículas retidas, a turbidez do filtrado aumenta. Assim, quando o valor de turbidez ou o valor da perda de carga forem elevados deve-se proceder à lavagem do leito [11]

Os equipamentos de retenção rápida são particularmente eficientes na remoção de partículas suspensas com diâmetros desde 1 $\mu$ m. Caso se pretenda remover compostos com diâmetros inferiores, é necessário a utilização de um pré-tratamento, adicionando coagulantes e floculantes à água a tratar [12].

### *Leitos Granulares sob Pressão*

Estes equipamentos comerciais são de construção simples e consistem numa coluna cilíndrica fechada, que contém um leito de partículas porosas, através do qual passa a suspensão a separar (figura 2). Podem ter dimensões desde 0,5 até 3 metros de altura, com diâmetros de 1 a 3m. [9]



**Figura 2 Filtro de areia utilizada no tratamento de águas**

Este tipo de equipamentos tem uma maior flexibilidade operatória que os leitos gravíticos, pois permite operar com quedas de pressão maiores e, por isso, reter mais partículas no leito. Além disso, requerem áreas menores que os leitos anteriores [12].

De modo a evitar a colmatação rápida do leito, é frequente colocar uma camada de antracite com uma granulometria superior à da areia, no topo do leito. Esta camada funciona como uma pré-filtração, retendo as partículas mais grossas e evitando, assim, a colmatação precoce da superfície de areia [13]. Como a antracite é menos densa que a areia, mantém-se no topo do leito, mesmo após lavagem em contracorrente.

Estudos mostram ainda que a utilização deste leito misto (antracite + areia) aumenta a eficiência da remoção de partículas, visto que a antracite tem também a capacidade de remoção de alguns compostos solúveis orgânicos e inorgânicos. [13]

### *Características dos Meios Granulares*

O meio poroso pode ser constituído por areia fina, areia grossa ou antracite e com um intervalo de tamanho de partículas entre 0,4 e 5 mm. É de uso comum a utilização de leitos mistos de diferentes materiais e/ou diferentes granulometrias [14]. É de salientar que, como são materiais que ocorrem na natureza, o tamanho de grão não é uniforme, possuindo uma distribuição de tamanhos. Assim, é possível mudar as características de um dado material através da remoção de certas frações de tamanhos. A modificação mais importante na maioria dos meios granulares é a remoção das partículas muito finas. Estas partículas constituem apenas uma fração muito pequena do volume médio mas, se não forem removidas, podem causar perdas de carga muito maiores durante o processo de retenção, do que as previstas para o tamanho de grão efetivo. [11]

A estratificação do leito é realizada através de uma lavagem ascendente. Assim, as partículas vão sedimentando de acordo com a velocidade de sedimentação, determinada pelo tamanho, forma e gravidade específica dos materiais do leito.

### *Fluxo Ascendente vs. Fluxo Descendente*

A maior parte dos equipamentos possui um leito estático com fluxo vertical, quer descendente, quer ascendente, através do meio granular. Os fluxos descendentes são os mais usuais no tratamento de água potável. Independentemente do sentido do fluxo de operação, a lavagem do filtro é sempre efetuada no sentido ascendente [11].

Num leito estratificado das partículas mais finas para as partículas mais grossas, com fluxo descendente, a concentração maior de sólidos retidos é aplicada às camadas com maior eficiência de remoção, ou seja, às partículas de menor dimensão. Isto resulta na remoção

concentrada, na superfície do leito, levando a perdas de carga elevadas. No caso de fluxo ascendente, a suspensão passa das partículas mais grossas do leito para as mais finas, ocorrendo uma penetração substancial, retendo os sólidos no meio granular mais grosso, onde a acumulação de perda de carga é menor. Assim, as camadas granulares mais finas ficam disponíveis para clarear o fluido e prevenir a colmatação do leito [11].

Nos fluxos ascendentes, a suspensão passa primeiro através do material mais grosso, o que para uma dada perda de carga, como dito anteriormente, tem uma maior capacidade para reter partículas suspensas. Isto torna-se vantajoso, comparando com os fluxos descendentes, pois aumenta o tempo de ciclo e a quantidade de água tratada.

Os leitos mistos com fluxo descendente podem obter o mesmo efeito com fluxos, colocando partículas mais grossas de um material menos denso, nas camadas superiores, e partículas mais finas de um material mais denso nas camadas inferiores [11].

## Ultrafiltração por Membranas

Os processos que utilizam membranas, como a ultrafiltração e a microfiltração são caracterizados como processos de separação. Através destes processos, partículas finas dispersas podem ser separadas da suspensão que se pretende tratar [11]. Estes processos baseiam-se no transporte membranar, isto é, na passagem de solutos ou solventes através de membranas finas e porosas, normalmente de origem polimérica.

Nas membranas, as partículas são retidas na superfície da membrana, ou a uma profundidade de 10 a 15  $\mu\text{m}$  [11].

Existem várias condições que pode afetar a operação da membrana como a temperatura, o pH e a pressão [14].

A pressão de trabalho pode ter dois efeitos na filtração da membrana: se a pressão se mantiver constante, o fluxo através da membrana irá diminuir com o tempo, devido à formação de uma camada biológica junto à membrana. Para manter o fluxo constante, a pressão de trabalho terá de aumentar, com o tempo. Contudo, com o aumento da pressão, as moléculas retidas na superfície da membrana são forçadas a passar através da membrana, resultando num processo de separação menos eficiente [14].

A utilização da ultrafiltração como processo de separação tem algumas vantagens:

- A ultrafiltração é um processo que pode operar a baixas temperaturas
- Não são necessárias mudanças de fase para a separação dos materiais
- Não são necessários reagentes químicos ou catalisadores nas separações.

A ultrafiltração, através de membranas de fibras ocas, tem sido aplicada no tratamento de águas, devido à compactação dos módulos da membrana e ao baixo volume de "backwash",



requerido para lavar as fibras ocas [15]. Contudo, a ultrafiltração necessita de pressões de trabalho mais elevadas (1,5 – 2,5 bar) e pode ter problemas de incrustações quando a água possui partículas com diâmetros menores que 1 µm, aumentando os seus custos de limpeza [16,17]

## 1.2.2 Tecnologias de Tratamento Químico

### Precipitação Química

A precipitação química é um processo que envolve a adição de agentes químicos na solução, de modo a alterar o estado físico dos sólidos dissolvidos e em suspensão, facilitando a sua remoção, através da sedimentação ou filtração [14].

No tratamento de águas, a precipitação química sempre foi utilizada com o intuito de ajudar o processo de sedimentação, aumentando a remoção de sólidos suspensos ou a de matéria orgânica, principalmente, quando se observavam variações destes parâmetros nas águas. Com a necessidade de obter uma remoção mais eficiente de compostos orgânicos e nutrientes, assim como de cátions  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Fe^{3+}$  existentes na água, o processo de precipitação ganhou um novo interesse nestes tratamentos.

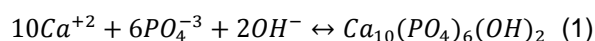
Várias substâncias foram usadas como precipitantes químicos, como por exemplo, sais de ferro, cal e alumínio.

O grau de clarificação da água depende da quantidade de precipitante usado e do controlo do próprio processo. É possível, através da precipitação, obter um efluente límpido, substancialmente livre de matéria em suspensão, podendo ser removidas entre 80 e 90% da matéria em suspensão e 40 a 70% da matéria orgânica. [14]

A remoção de nutrientes da água envolve a incorporação dos iões fosfato nos sólidos suspensos e a sua subsequente remoção. Os nutrientes podem ser incorporados em sólidos biológicos (tratamento biológico) ou em precipitados (tratamento químico).

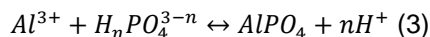
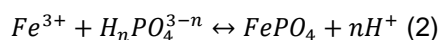
Especificamente, para a remoção de partículas das águas, os compostos químicos utilizados na precipitação incluem sais de metais (Ferro e Alumínio) e cal [14]. A precipitação química dá-se através da adição dos iões polivalentes, que formam precipitados com os iões solúveis na água. Os iões mais utilizados para o efeito são o  $Ca(II)$ ,  $Al(III)$  e  $Fe(III)$ .

O Cálcio é normalmente adicionado na forma de cal,  $Ca(OH)_2$ . Quando a cal é adicionada à água a tratar, esta reage com os iões carbonato presentes, precipitando  $CaCO_3$ . À medida que o pH da água aumenta, os iões de cálcio em excesso reagem com o fosfato, precipitando um composto denominado hidroxilapatite,  $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ .



A utilização de cal, na precipitação química, é menos frequente pois esta aumenta substancialmente a massa das lamas, no tratamento de águas.

As reações para os íons de ferro e alumínio apresentam-se seguidamente.



A eficiência da remoção por precipitação química é afetada por diversos fatores, entre os quais, o pH da água, a sua alcalinidade, a dose de coagulante usada, a velocidade de agitação e substâncias que possam interferir. [11]

A remoção de nutrientes pelo alumínio é altamente dependente do pH, com um pH ótimo entre 5,7-6., sendo que para este valor de pH, uma concentração de 80 mg/L removeu 83% do particulado. No caso do cálcio, a eficiência da remoção aumenta com o aumento de pH. [10]

No que se refere à remoção do cálcio e do magnésio de uma água para se atingir valores muito baixos, da ordem dos 8 ppm como  $CaCO_3$ , aconselha-se a utilizar fosfato de sódio ou hidrofosfato de sódio.

Os coagulantes, como os sais de alumínio e cloretos férricos, podem ser aplicados antes do tratamento com leitos mistos ou ultrafiltração, de modo a aumentar o tamanho das partículas e facilitar o processo de separação.

Uma das alternativas mais estudadas na adição de coagulantes e floculantes, para a remoção de compostos solúveis, é o uso de adsorventes em leitos fixos. Os compostos mais utilizados são os hidróxidos férricos granulares, compostos de alumínio granulares e zeólitos [19-22]. O mecanismo de remoção é um processo que combina troca de íons complexa e precipitação química [19]. A afinidade e a capacidade do adsorvente, para adsorver aniões solúveis, depende do pH, da força iónica e da matéria orgânica solúvel.

## Adsorção

A adsorção é um processo de separação de substâncias solúveis, através de um interface gás-líquido, líquido-líquido ou sólido-líquido. Para a remoção de particulado, apenas se irá abordar a adsorção sólido-líquido.

No passado, o processo de adsorção não era utilizado no tratamento de efluentes líquidos, mas as exigências atuais por um efluente com melhor qualidade, levaram à sua utilização com carvão ativado. [14]

O carvão é usado para remover uma porção de matéria orgânica dissolvida, ainda presente na água. Além da matéria dissolvida, o carvão ativado ainda retém partículas no seu leito.

Normalmente, é usada uma coluna de leito fixo como meio de contacto entre o carvão ativado e a água a tratar. A água entra no topo da coluna e é recolhida no fundo desta e o carvão é mantido imobilizado, através de um suporte, no fundo da coluna.

Um backwash é efetuado para limitar a acumulação de perda de carga, provocada pela remoção de matéria particulada, no interior do leito de carvão. Para superar este problema da perda de carga, foram desenvolvidas operações com leitos expandidos ou leitos móveis de carvão.[14]

Nas colunas de leito expandido, a alimentação entra no fundo da coluna (fluxo ascendente), fazendo com que haja uma expansão do leito durante o processamento do caudal a tratar, assemelhando-se a um “backwash”. Nos leitos móveis, provoca-se o deslocamento do carvão reutilizado através da entrada de carvão fresco, não havendo, por isso, acumulações da perda de carga, dada a movimentação das partículas de carvão no leito.

Além do carvão ativado, existem outros materiais adsorventes que podem ser utilizados na remoção de nutrientes. Estudos indicam que a calcite tem a capacidade de adsorver matéria solúvel [23,24], quando este está presente em pequenas concentrações (cerca de 20 $\mu$ M) [25]. Quando as concentrações de nutrientes são mais elevadas, a calcite forma precipitados, tendo em conta as reações anteriores.

### 1.2.3 Tecnologias de Tratamento Biológico

Ao longo dos anos, os processos de tratamento biológico para a remoção de nutrientes foram desenvolvidos como alternativa aos tratamentos químicos, nas estações de tratamento de águas residuais.

Neste tipo de tratamento, os nutrientes são removidos através da sua assimilação nos tecidos das células. A remoção, por tratamento biológico, dá-se através da exposição alternada dos micro-organismos a condições aeróbicas e anaeróbicas, provocando um ambiente de stress aos organismos, para que a sua captação de nutrientes seja acima dos níveis normais [14].

Os nutrientes são não só utilizados na manutenção celular e no transporte de energia, mas também é armazenado para posterior utilização.

Em média, entre 10 a 30% do particulado inicial da água é removido no tratamento secundário, nas estações de tratamento [14]. Este valor pode aumentar, significativamente, usando os processos biológicos descritos brevemente, de seguida.

#### Processo A/O

Este processo utiliza um sistema de lamas ativadas, que combina, sequencialmente, uma zona anaeróbia e uma zona aeróbia. Nas condições anaeróbicas, os nutrientes presentes na água residual e na massa de células recicladas são libertados na forma de matéria solúvel.

Os nutrientes são de seguida captados pelas células, na zona aeróbia. Finalmente, a remoção destes compostos é feita do líquido para a lama ativada.

Através deste processo é possível obter valores de concentração final de 1 mg/L, podendo estes valores serem menores se adicionado coagulantes, no final do processo.

O modo de operação relativamente simples e valor adicional da lama ativada, como fertilizante são algumas das vantagens que este processo possui. Por outro lado, a sua incapacidade de alcançar taxas elevadas de remoção de nutrientes em simultâneo e a fraca flexibilidade do controlo do processo são alguns dos inconvenientes desta operação, nas estações de tratamento.

### Sequência de reatores “batch”

Estes reatores podem ser operados de modo a combinar fenómenos de oxidação de carbono, remoção de nutrientes. A redução destes constituintes pode ser alcançada com ou sem a utilização de coagulantes. Do mesmo modo que no processo anterior, a libertação destes compostos dá-se na fase anaeróbia enquanto a sua incorporação no tecido celular dá-se na fase aeróbia. Os ciclos de trabalho podem variar entre 3 a 24h. [14]

É um processo bastante flexível e combina a redução de vários constituintes e é de operação simples. Contudo, é apenas possível de operar com fluxos pequenos e a qualidade do efluente é muito dependente da operação de decantação.

### Processo PhoStrip

Neste processo, uma parte da lama ativada do tratamento biológico é dirigida para um tanque de stripping, onde é retida entre 8 a 12h. Neste tanque, os nutrientes são libertados para o sobrenadante enquanto a lama, que está empobrecida em nutrientes, volta para o tanque de aeróbio, para captar mais nutrientes. O sobrenadante, rico em nutrientes, é tratado quimicamente, adicionando coagulante, num tanque de sedimentação, para que ocorra a separação dos sólidos e a conseqüente remoção de nutrientes, nos precipitados.

Os valores finais de concentração de nutrientes na água, com este processo, são menores que 1,5 mg/L [14].

Este processo utiliza menores quantidades de coagulantes que o tratamento químico convencional e pode ser facilmente incorporado nos sistemas de lama ativadas já existentes.

### EBPR (“Enhanced Biological Removal”)

Como referido anteriormente, a remoção de nutrientes, por meios biológicos, pode ser conseguida através de dois mecanismos: adsorção direta pelos micro-organismos (assimilação) ou, pelo aumento da capacidade de armazenamento destes compostos, como polifosfato, pelos organismos presentes nas lamas ativadas.

O EBPR é um tratamento utilizado nas estações de tratamento de águas residuais baseado no enriquecimento de bactérias acumuladoras de polifosfato inorgânico, como ingrediente das suas células. Este processo envolve ciclos metabólicos, induzindo os microorganismos a condições de incubação alternadas entre condições anaeróbias, ricas em carbono, e condições aeróbicas, escassas em carbono. [7]

## 2. Parte Experimental

---

Neste capítulo, apresentam-se os procedimentos experimentais adotados, com vista à remoção de partículas, de uma lagoa eutrofizada. Estas partículas contêm matéria orgânica e nutrientes.

A primeira etapa do trabalho experimental envolveu uma série de ensaios preliminares de precipitação química, com o objetivo de selecionar a tecnologia mais adequada ao processo em estudo. Nestes ensaios, testaram-se diferentes coagulantes e floculantes, dando especial atenção ao teor de alumínio residual na água.

Na etapa seguinte, estudou-se a retenção de partículas em leitos mistos granulares, em colunas de vidro, com diâmetro de 2,5 cm. Nestas colunas, experimentaram-se diferentes materiais, com o objetivo de escolher o meio mais eficiente, na redução de nutrientes, e da turbidez do efluente tratado.

De seguida, efetuou-se um conjunto de ensaios com leitos mistos, em colunas de diâmetro 5,2 cm, com os materiais previamente selecionados, no ponto anterior. Estas experiências tiveram a finalidade de estudar um “*scale-up*” ao processo de retenção de partículas, em leitos mistos.

O processo de ultrafiltração, com uma membrana de polisulfona em fibras ocas, foi também estudado, quer no tratamento da água da lagoa, como da água previamente tratada nos leitos mistos, tendo em vista um processo integrado.

A explicação detalhada dos trabalhos analíticos e experimentais, elaborados nesta dissertação, inicia-se com a caracterização geral da água da lagoa em estudo (matéria-prima), no ponto 2.1. De seguida, no ponto 2.2, estão descritos os estudos preliminares de precipitação química, realizados com o objetivo de escolher a tecnologia a ser desenvolvida neste trabalho. No ponto 2.3, listam-se as técnicas analíticas e experimentais, utilizadas na caracterização do efluente tratado. Nos pontos 2.4 e 2.5 são descritos os procedimentos referentes aos ensaios, nas colunas de leito misto de diâmetro 2,5 cm e 5,2 cm, respetivamente. Finalmente, o ponto 2.6, deste capítulo, refere-se ao procedimento dos ensaios de ultrafiltração.

## 2.1 Matéria-Prima

Como anteriormente referido, nos ensaios realizados no âmbito desta dissertação, foram estudadas amostras de água de uma lagoa.

A lagoa em questão, considerada eutrofizada e com frequente “*bloom*” de algas, apresenta uma concentração média anual de 85 ppb, em particulado, e 37 ppb em matéria orgânica [26], valores que ultrapassam os estabelecidos pelo Critério Nacional [3].

As variações da concentração de nutrientes ao longo do ano, na lagoa, são significativas e, durante a época de verão, o particulado total pode chegar à concentração de 120 ppb. Quanto à matéria orgânica, nesta época, a concentração é de cerca de 53 ppb (sendo que 28 ppb é de orgânico solúvel) [26].

Todas as amostras de água foram analisadas, quando da sua chegada ao Instituto Superior Técnico, pelo método analítico descrito, no ponto 2.3. Na tabela 2, encontram-se os valores obtidos para a concentração total e solúvel, bem como os parâmetros turbidez e pH.

**Tabela 2** Parâmetros analisados para a água da lagoa: Nutrientes Totais e Solúveis, Turbidez e pH

Data	Particulado (ppb)	M. Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH
<b>Jul-13</b>	51	18	4,2	7,4
<b>Nov-13</b>	28	17	6,1	7,3
<b>Abr-14</b>	80,6	17,8	14,2	7,7
<b>Set-14</b>	38	17	10,5	7,5
<b>Dez-14</b>	65,2	19,6	-	7,4

A água proveniente da lagoa foi armazenada num reservatório ( $V=1m^3$ ), equipado com agitador (Lightnin LP 25), para que as amostras estejam homogeneizadas, e num local escuro, para evitar exposição solar e consequente degradação da água.

No início de cada ensaio, foi efetuada uma nova análise aos parâmetros acima referidos à amostra de água a ser estudada, dado a variabilidade existente nos valores de concentração de nutrientes, e a possibilidade destas concentrações serem alteradas, com o tempo de armazenamento. Os valores obtidos destas análises foram utilizados no tratamento de resultados, no capítulo seguinte.

No Anexo I, encontra-se a caracterização detalhada da água da lagoa.

## 2.2 Estudos preliminares conducentes à escolha da tecnologia a ser experimentada

Os ensaios preliminares de precipitação química tiveram como objetivo estudar este tratamento, na melhoria da qualidade da água da lagoa. Estes ensaios permitiram também escolher a tecnologia a ser experimentada.

Numa primeira fase, realizaram-se ensaios de precipitação química com os coagulantes cal, sulfato de alumínio e policloreto de alumínio. A utilização de diversos tipos e concentrações de coagulantes teve por objetivo determinar o tipo de coagulante, concentração e condições operatórias mais adequadas para a precipitação de compostos com nutrientes, dando especial atenção ao alumínio residual, que fica em solução, após o tratamento. Nesta fase, avaliou-se também o efeito de adição de floculantes aniônicos e catiónicos na turbidez final da água tratada.

Os ensaios de precipitação química foram realizados em “Jar-Test”, utilizando diversos coagulantes (cal e sais de alumínio) e floculantes. Deste modo, recolheram-se 0,8L da amostra de água da lagoa para um copo e procedeu-se à agitação, na velocidade máxima, e adicionou-se, de seguida, o coagulante e/ou o floculante em estudo. Ao fim de 2 minutos da adição do coagulante, passou-se para uma velocidade lenta de agitação, para ajudar a formar os flocos. Esta operação durou 3 minutos. Após esta etapa, interrompeu-se a agitação e deixou-se sedimentar. Procedeu-se, de seguida, à determinação do pH e à medição da turbidez. Por fim, decantou-se o clarificado para uma garrafa de 0,5L, para posterior análise do teor em nutrientes e alumínio.

A amostra da água da lagoa, utilizada nos ensaios de precipitação química, foi também analisada em termos de pH, turbidez, concentração de particulado e concentração de alumínio. Convém salientar que a amostra de água da lagoa é uma amostra composta por amostras de vários pontos da lagoa (superfície, meio e fundo). Os valores obtidos estão na tabela 3.

**Tabela 3 Parâmetros analisados para a água da lagoa: pH, turbidez, concentração de particulado e alumínio**

Água da Lagoa	
pH	7,4
Turbidez (NTU)	4,2
Particulado (ppb)	79
Alumínio (ppb)	51

Ensaio de precipitação química para escolha do coagulante e floculante mais adequado ao processo



Para efeitos de estudo, foram preparados três coagulantes:

- Hidróxido de Cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , com concentração de **200 g/L**
- Sulfato de Alumínio,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , com concentração de **24,7 g/L**
- Cloreto de Ferro (III),  $\text{FeCl}_3$ , com concentração de **9,7 g/L**

Com o intuito de identificar o tipo de floculante, aniônico ou catiónico, mais adequado para o processo, procedeu-se à medição do potencial zeta das amostras de água, nos vários pontos da lagoa. Os valores obtidos encontram-se na tabela 4.

**Tabela 4 Potencial Zeta para as amostras da água em estudo, em vários pontos da lagoa**

Amostra	1	2	3
Profundidade	Superfície	Meio	Fundo
Potencial Zeta	-25,6	-26,4	-20,1

Tendo em conta que os valores obtidos para o potencial zeta são negativos, optou-se por se utilizar um floculante catiónico (zetag, 10 g/L).

Para escolher o coagulante mais adequado à remoção de particulado da água da lagoa, foram realizados três ensaios adicionando diferentes coagulantes. Os resultados estão presentes na tabela 5.

**Tabela 5 Resultados obtidos dos clarificados da precipitação química, com três coagulantes diferentes**

Tipo de Coagulante	$\text{FeCl}_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Ca(OH)}_2$
Concentração de coagulante (ppm)	10	10	100
pH	3,2	6,5	11,4
Turbidez (NTU)	1,78	0,46	8,03
Particulado (ppb)	<b>57</b>	<b>95</b>	<b>30</b>

A adição de hidróxido de cálcio diminuiu o teor de particulado da água. Contudo, a adição deste coagulante aumentou o valor da turbidez da água e o seu pH.

Quanto à adição de cloreto de ferro (III), a concentração de particulado e o valor de turbidez final da água diminuíram, mas originou um valor de pH muito baixo. Além disso, denotou-se que a água ficou com uma cor amarelada, no final do ensaio.

Finalmente, com o sulfato de alumínio obteve-se os melhores resultados em termos de turbidez final da água. O valor de pH final ficou também próximo do valor inicial da água a tratar. Dos três coagulantes ensaiados, o sulfato de alumínio foi o que originou melhor sedimentação. Contudo, não houve uma diminuição do teor de nutrientes, na água tratada.

Tendo em conta os parâmetros de avaliação envolvidos, escolheu-se prosseguir os ensaios de precipitação química com o coagulante sulfato de alumínio. Apesar de não ter sido

eficiente na redução de nutrientes, foi o composto que obteve o valor mais baixo de turbidez, na água tratada, e não alterou, significativamente, o pH da água. Além disso, a redução da concentração de nutrientes na água, por precipitação química com sulfato de alumínio, pode ser melhorada pelo aumento da concentração de coagulante usado no processo.

Além do sulfato de alumínio, três coagulantes diferentes de policloreto de alumínio também foram testados. As características destes coagulantes encontram-se na tabela 6.

**Tabela 6 Características dos coagulantes de Policloreto de Alumínio**

Policloreto de Alumínio			
Tipo	PAX10	PAX18	PAX XL10
%Al <sup>3+</sup>	5	9	5
Densidade	1,21	1,37	1,23

## Ensaio de precipitação química com sulfato de alumínio

Nos ensaios efetuados com o coagulante sulfato de alumínio, estudou-se o efeito de diversos fatores na precipitação: variação da concentração de coagulante adicionado, variação da concentração de floculante adicionado, variação do tempo de agitação rápida e variação do tempo de agitação lenta.

### Variação da concentração de coagulante adicionado

Para estudar o efeito da variação da concentração de coagulante adicionado, foram realizados três ensaios, sem adicionar floculante. Os resultados estão presentes na tabela 7.

**Tabela 7 Condições Experimentais e Resultados obtidos nos ensaios com adição de coagulante sulfato de alumínio**

Ensaio	1	2	3
Concentração de coagulante Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (ppm)	2	4	7
Tempo de agitação rápida (min)	1	1	1
Tempo de agitação lenta (min)	1	1	1
Tempo de sedimentação (min)	25	25	25
pH	6,75	6,3	6,37
turbidez (NTU)	0,1	0,5	0,3
C(Al) após decantação (ppb)	<b>92</b>	<b>128</b>	<b>246</b>
Particulado (ppb)	<b>38</b>	<b>22</b>	<b>25</b>

Tendo em conta os resultados obtidos nos ensaios, concluiu-se que o aumento da concentração de coagulante aumentou a concentração de alumínio na água, após decantação.

Quanto à remoção de partículas, por precipitação química, este coagulante foi eficiente, tendo baixado a sua concentração final da água tratada. O ensaio que obteve a concentração final de particulado mais baixa foi o ensaio 2, no qual se adicionou 4 ppm de coagulante.

Nos três ensaios realizados, a turbidez final da água foi reduzida para valores residuais e o pH baixou apenas ligeiramente.

### Variação da concentração de floculante adicionado

Com o intuito de estudar o efeito da adição de floculantes, na precipitação química, para a remoção de particulado da água, foram efetuados três ensaios com concentrações diferentes de floculante Zetag (10 g/L).

Nestes ensaios, observou-se a formação de flocos cujo tamanho aumentou consoante o aumento da concentração de floculante adicionado e, conseqüentemente, a sedimentação dos flocos deu-se mais rapidamente, quanto maior o seu tamanho.

**Tabela 8 Condições experimentais e resultados obtidos nos ensaios com adição de floculante**

Ensaio	1	2	3
Concentração de coagulante $Al_2(SO_4)_3$ (ppm)	7	7	6
Concentração de floculante (ppm)	0	1	10
Tempo de agitação rápida (min)	1	1	1
Tempo de agitação lenta (min)	1	1	1
Tempo de sedimentação (min)	25	25	25
pH	6,7	5,9	6,6
turbidez (NTU)	0,5	0,8	0,6
C(Al) após decantação (ppb)	<b>191</b>	<b>156</b>	<b>270</b>
Particulado (ppb)	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>11</b>

Tendo em conta os resultados obtidos, a adição de floculante originou uma maior remoção de particulado da água, comparando com os ensaios de precipitação realizados apenas com adição de coagulante.

A concentração de alumínio, na água tratada, aumentou também com o aumento da concentração adicionada de floculante.

Nos três ensaios realizados, a turbidez final da água foi reduzida para valores residuais e o pH baixou apenas ligeiramente.

## Variação do tempo de agitação rápida

Com o objetivo de verificar se um aumento no tempo de agitação rápida originaria reduções na concentração de alumínio e particulado, no clarificado, realizaram-se dois ensaios com um aumento do tempo de agitação rápida. Os ensaios realizados tiveram tempos de agitação rápida de 5 e 10 minutos.

Os resultados obtidos, bem como as condições experimentais dos ensaios encontram-se na tabela 9.

**Tabela 9 Condições experimentais e resultados obtidos nos ensaios com variação do tempo de agitação rápida**

Ensaio	1	2
Concentração de coagulante $Al_2(SO_4)_3$ (ppm)	4	4
Concentração de floculante Zetag (ppm)	1	1
Tempo de agitação rápida (min)	5	10
Tempo de agitação lenta (min)	1	1
Tempo de sedimentação (min)	25	25
pH	6,5	6,6
turbidez (NTU)	0,2	0,03
C(Al) após decantação (ppb)	<b>98</b>	<b>128</b>
particulado (ppb)	<b>22</b>	<b>28</b>

Dos resultados obtidos, o tempo de agitação rápida de 5 minutos, obteve valores mais baixos de concentração de particulado e alumínio na água tratada. Quanto à turbidez, o tempo de agitação de 10 minutos obteve os melhores resultados.

## Variação do tempo de agitação lenta

Estudou-se ainda a relação entre o tempo de agitação lenta e as concentrações finais de Alumínio e particulado, no clarificado. Nos ensaios realizados fez-se variar o tempo de agitação lenta entre 1 e 20 minutos. Na tabela 10 encontram-se os resultados obtidos e as condições experimentais adotadas nos ensaios.

**Tabela 10 Condições Experimentais e resultados obtidos nos ensaios com variação do tempo de agitação lenta**

Ensaio	1	2	3
Concentração de coagulante $Al_2(SO_4)_3$ (ppm)	4	4	4
Concentração de floculante Zetag (ppm)	1	1	1
Tempo de agitação rápida de adição do coagulante (min)	5	5	5
Tempo de agitação lenta (min)	1	10	20
Tempo de sedimentação (min)	25	25	25
pH	6,5	6,5	6,6
turbidez (NTU)	0,47	0,01	0,15
C(Al) após decantação (ppb)	<b>98</b>	<b>50</b>	<b>85</b>
Particulado (ppb)	<b>36</b>	<b>29</b>	<b>25</b>

Dos ensaios efetuados, o tempo de agitação lenta que obteve melhores resultados, quer em termos de concentração de alumínio na água, quer em termos de turbidez, foi o tempo de agitação de 10 minutos.

## Ensaio de precipitação química com coagulantes de Policloreto de Alumínio

Nos ensaios realizados, com três tipos de coagulantes do grupo de Policloreto de Alumínio, fez-se variar a concentração do coagulante adicionado, com vista à obtenção da quantidade óptima que origina os valores mais baixos de alumínio e particulado, na água tratada.

Nas tabelas seguintes encontram-se os resultados obtidos da precipitação química, para os três coagulantes, adicionando 0,5 ppm e 1 ppm dos mesmos.

**Tabela 11 Resultados da precipitação química com policloreto de alumínio 0,5 ppm**

Ensaio	1	2	3
<b>Tipo de coagulante</b>	PAX10	PAX18	PAX XL10
<b>Concentração de coagulante (ppm)</b>	0,5	0,5	0,5
<b>Tempo de agitação rápida (min)</b>	5	5	5
<b>Tempo de agitação lenta (min)</b>	10	10	10
<b>Tempo de sedimentação (min)</b>	25	25	25
<b>pH</b>	6,9	7,0	7,1
<b>turbidez (NTU)</b>	2,2	1,5	1,5
<b>C(Al) após decantação (ppb)</b>	<b>145</b>	<b>133</b>	<b>87</b>
<b>Particulado (ppb)</b>	<b>16</b>	<b>&lt;10</b>	<b>18</b>

**Tabela 12 Resultados dos ensaios de precipitação química com policloreto de alumínio 1 ppm**

Ensaio	1	2	3
<b>Tipo de coagulante</b>	PAX10	PAX18	PAX XL10
<b>concentração de coagulante (ppm)</b>	1	1	1
<b>Tempo de agitação rápida (min)</b>	5	5	5
<b>Tempo de agitação lenta (min)</b>	10	10	10
<b>Tempo de sedimentação (min)</b>	25	25	25
<b>pH</b>	7,1	7	6,9
<b>turbidez (NTU)</b>	0,01	0,01	0,01
<b>C(Al) após decantação (ppb)</b>	<b>160</b>	<b>109</b>	<b>96</b>
<b>Particulado (ppb)</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>13</b>

Em todos os ensaios, os três coagulantes estudados foram eficientes na remoção de particulado, sendo que o PAX18 foi o coagulante que obteve as concentrações mais baixas de partículas, para as duas concentrações de coagulantes adicionadas.

Quanto à concentração final de alumínio, o coagulante PAX XL10 foi o que obteve os valores mais baixos. Contudo, o teor de alumínio final, em todos os ensaios, ficou ainda elevado.

A turbidez final do clarificado foi menor para os ensaios com concentração de 1 ppm, enquanto os valores de pH se mantiveram praticamente constantes nas duas concentrações diferentes e nos três coagulantes.

## Conclusões relativas aos estudos de precipitação química

Com este estudo constatou-se que, após o tratamento da água, recorrendo aos processos de precipitação química, por adição de coagulantes (cal e sais de alumínio), os valores significativamente elevados de concentração de Alumínio residual impossibilitam a utilização deste tipo de tratamento, para a lagoa em causa.

Assim, optou-se por experimentar uma série de tratamentos físicos com leitos mistos, para estudar a remoção de particulado da água da lagoa. Além dos leitos, foi também estudado um processo de ultrafiltração com membranas de fibras ocas.

## 2.3 Técnicas Analíticas e Experimentais

### Determinação da turbidez da água

A turbidez das amostras é medida através do turbidímetro (Turbiquant 3000 IR) e o procedimento é bastante simples. Liga-se o equipamento e coloca-se a amostra a medir na célula, presente no equipamento, aparecendo o valor da turbidez no seu visor. De seguida, lava-se a célula, com água destilada, e repete-se o procedimento, até se obter dois valores concordantes.

### Determinação do pH da água

O valor pH, de todas as amostras recolhidas, é determinado pelo medidor de pH (Hanna pH meter). Para tal, mergulha-se o medidor de pH na amostra, agitada, e regista-se o valor estabilizado.

## Determinação da concentração de Alumínio na água

A determinação da concentração de alumínio, nas águas, é realizado por um método espectrofotométrico do Standard Methods 3500 - Al [27].

Neste método, são preparadas soluções padrão de Alumínio de 10, 20, 30 e 40 ppb e determina-se uma reta de calibração (Anexo III), com as absorvâncias dos padrões em função da sua concentração conhecida. A partir desta reta de calibração obtêm-se as concentrações das amostras analisadas, no espectrofotômetro, com um comprimento de onda de 535 nm.

Para preparar a série de padrões, utilizados na reta de calibração, pipetam-se 1, 2, 3 e 4 mL de uma solução-mãe de alumínio (1 ppm) para as concentrações de 10, 20, 30 e 40 ppb, respetivamente. De seguida, adicionam-se 10 mL de uma solução tampão de ácido acético com acetato de sódio, 1 mL de solução de ácido ascórbico e 5 mL de uma solução corante de "Eriochrome R", perfazendo com água destilada, em balões de 100 mL.

A solução tampão de ácido acético com acetato de sódio é preparada adicionando 82g de acetato de sódio com 6,5 mL de ácido acético e perfazer com água destilada.

A solução de ácido ascórbico tem de ser preparada todos os dias pesando 0,1 g de ácido ascórbico e perfazer com água num balão de 100 mL

A solução de ácido sulfúrico 0,02M é preparada pipetando 1mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para um balão de 100 mL e perfazer com água destilada.

A solução corante de Eriochrome foi preparada pesando 0,3g de Eriochrome e dissolver num copo com água destilada. De seguida, adiciona-se 3 mL de ácido acético e agitar sempre até um pH=2,9. A solução apresenta uma cor vermelho escuro.

Para o tratamento das amostras, é necessário proceder a uma titulação, utilizando uma solução de 0,02 N de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Assim, coloca-se 25 mL da amostra num copo e adiciona-se a solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> até aparecer uma cor rosa claro. Anota-se o volume de ácido gasto.

O volume a utilizar da amostra varia com a concentração da mesma (entre 1mL a 25mL). Adiciona-se 10mL de solução tampão de ácido acético com acetato de sódio e adiciona-se um certo volume de ácido sulfúrico 0,02N, conforme prévia titulação indica. Por fim acrescenta-se 1mL ácido ascórbico e 5mL de solução corante completando com água destilada em balões de 100mL.

## 2.4 Ensaios em Colunas de diâmetro d=2,5 cm

Antes de iniciar o processo de retenção de partículas, é necessário construir o leito da coluna, com o material filtrante a estudar, nos vários ensaios. Para tal, utiliza-se um fluxo

ascendente de água destilada e ar, enquanto as partículas se depositam na coluna. De seguida, procede-se à lavagem do leito, fluidizando-o, até a água de lavagem sair límpida. Por fim, mede-se a altura do leito, para o cálculo do volume de leito.

Na figura 3 está representada a montagem experimental das duas colunas de diâmetro  $d=2,5$  cm. Nos erlenmeyers, encontra-se a água da lagoa a ser tratada que, depois de passar no meio filtrante, é recolhida no final das colunas, para os copos. A água da lagoa é constantemente agitada através do agitador (Velp Scientifica).



Figura 3 Montagem experimental das colunas  $d=2,5$ cm

Todos os materiais são pesados numa balança (Kern, precisão 0,01g) e os valores podem ser consultados, no capítulo seguinte.

No início do ensaio, o caudal de passagem é estabelecido e medido com o auxílio de uma proveta e um cronómetro. Ao longo da filtração, este parâmetro é medido diversas vezes (em intervalos de cerca de 30 minutos) e regulado sempre que se verifica uma diminuição no seu valor.

Considera-se o final do ensaio de filtração quando se verifica a colmatação do leito, isto é, quando se dá a diminuição do caudal e da velocidade superficial de passagem, devido ao aumento da perda de carga ao longo do leito.

Por fim, com o intuito de preparar o leito para um novo ciclo de filtração e remover o particulado retido ao longo do ensaio, procede-se a uma lavagem do leito, *backwash*, em contracorrente, com água destilada e ar, de modo a descompactar o leito, em condições turbulentas. No backwash, são recolhidas 2 amostras de 200mL da água de lavagem em todos



os ensaios, para posterior análise ao teor de partículas. O volume de água de lavagem utilizado corresponde a cerca de 5% do volume total de filtrado [9]

A título de exemplo, na figura 4, pode-se observar o procedimento de lavagem do leito de areia.



Figura 4 Lavagem do leito de areia, no final de um ensaio

O caudal de lavagem é bombeado por uma bomba (Bonato e Veronesi MOD. P052).

Durante o ensaio, retiram-se amostras de 1L de volume, que são armazenadas ao abrigo da luz solar, para posterior análise. Estas amostras são colhidas de 2L em 2L, de volume de filtrado.

Os caudais utilizados, para os diversos ensaios, variam entre 33 mL/min (caudal correspondente a uma velocidade de 4 m/h) e 100 mL/min (velocidade de 12 m/h).

## 2.5 Ensaios em Colunas de diâmetro $d=5,2\text{cm}$

Este procedimento experimental foi estudado como scale-up do processo de tratamento do ponto anterior, pelo que os ensaios foram efetuados de modo semelhante. Além disso, foram testados dois fluxos de passagem, ascendente e descendente.

Quer para os ensaios de fluxo ascendente, como para os de fluxo descendente, a passagem de água no leito é efetuada pela bomba. A pressão à entrada e à saída das colunas foi lida pelos manómetros e registada a diferença de pressão ao longo da coluna.

As amostras para análise do teor de partículas são recolhidas de 30 em 30 L e o valor do caudal de passagem é medido em intervalos de 30 minutos.

Os caudais de passagem estudados variam entre 145 mL/min (velocidade de 4 m/h) e 710 mL/min (20 m/h)

Na figura 3.3 encontra-se a montagem das duas colunas utilizadas nos ensaios.



Figura 5 Montagem Experimental das Colunas de  $d=5,2\text{cm}$

## 2.6 Ensaio de Ultrafiltração

Os ensaios de ultrafiltração foram realizados com uma unidade de ultrafiltração UF 100XL S2 M193, da ORM e as suas especificações encontram-se no Anexo IV. O fluxo de água foi bombeado pela bomba.

Durante os ensaios, foram testados dois modos de operação diferentes: operação a pressão constante e a caudal constante.

Nos ensaios a pressão constante, estabelece-se uma pressão de entrada (ensaios realizados com pressões de entrada entre 1bar e 2bar) e regista-se o caudal correspondente. Estes parâmetros são medidos em intervalos de 15 minutos e a pressão de entrada é ajustada sempre que necessário. As amostras para análise são recolhidas em intervalos de 30 minutos. Considera-se que o ensaio termina quando se verifica uma diminuição significativa dos valores de caudal de permeação.

Nos ensaios a caudal constante, é estabelecido um caudal de permeação (ensaios realizados entre 225L/h e 360L/h) e registado a diferença de pressão. Estes parâmetros são medidos em intervalos de 15 minutos e são recolhidas amostras de 50L em 50L. O ensaio termina quando a pressão de entrada toma valores elevados, sendo o limite máximo de entrada permitido pela membrana de 3 bar.

A lavagem da membrana, no final do ensaio, é efetuada de modo semelhante ao “backwash” das colunas. O caudal de água e de ar entram na membrana, com fluxo ascendente e em regime turbulento. Também são retiradas duas amostras ( $V=200$  ml) de backwash, para posterior análise ao teor em partículas e matéria solúvel.



**Figura 6 Membrana de Ultrafiltração**

Para que não ocorra a formação de um filme biológico, no interior da membrana, no final do backwash, faz-se passar uma solução de bissulfito de sódio 1,5% (m/m) (Mallinckrodt, granular).

### 3. Tratamento de Resultados

---

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios realizados, bem como a sua análise e discussão.

#### 3.1 Ensaaios em colunas de leito fixo com diâmetro $d=2,5$ cm

Estes ensaios tiveram como objetivo avaliar qual o material mais eficiente, na remoção de partículas e aniões solúveis, da água da lagoa em estudo. Para tal, foram tidos em conta os seguintes critérios de análise:

- Remoção de partículas, através da análise ao particulado total e à matéria orgânica solúvel,
- Turbidez final da água tratada,
- Volume de filtrado total, até ao início da colmatação do leito

Para além de serem testados vários materiais, estudou-se ainda o efeito da velocidade superficial de passagem, da altura de leito na coluna e da granulometria do meio filtrante.

Para uma análise mais clara dos resultados obtidos, os ensaios foram divididos, tendo em conta o material em estudo. Finalmente, compararam-se os diferentes materiais, tendo em conta os parâmetros referidos acima.

##### 3.1.1 Leitos de Areia

Com vista ao estudo da areia foram utilizadas duas granulometrias diferentes: areia fina e areia grossa. O tamanho das partículas de areia, a porosidade e densidade encontram-se na tabela 13. As técnicas experimentais efetuadas para determinar a granulometria e porosidade dos materiais em estudo encontram-se no Anexo V.

**Tabela 13 Granulometrias, Porosidades e Densidades da Areia**

	<b>Areia Grossa</b>	<b>Areia Fina</b>
<b>Tamanho Partículas (mm)</b>	1,7 – 2	0,45 - 0,9
<b>Porosidade</b>	0,45	0,33
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,84	1,53

## Leitos de Areia Fina

Para a areia fina foram realizados dois ensaios, com dois ciclos de clarificação cada. As condições experimentais, para os dois ensaios, apresentam-se na tabela 14.

Cada ciclo de trabalho é composto pelo processo de clarificação da água e pelo processo de lavagem do leito, “backwash”, ocorrido quando se verifica a colmatção do leito. A colmatção do leito, como referido anteriormente, é dada pela diminuição da velocidade superficial de passagem e pela conseqüente diminuição do caudal de clarificação.

Em ambos os ensaios foi utilizada areia grossa, no fundo do leito como suporte, sendo a sua altura contabilizada para a altura total do leito. **No ensaio 1, a areia grossa teve uma altura de 1cm e, no ensaio 2, uma altura de 1,5cm.**

Tabela 14 Condições Experimentais dos Ensaios realizados com Leito de Areia Fina

	Ensaio 1	Ensaio 2
Altura do leito (cm)	6	16,5
Volume do leito (cm <sup>3</sup> )	29,44	80,95
v (m/h)	4	4
BV/h	67,3	24,5
Q (mL/min)	33	33

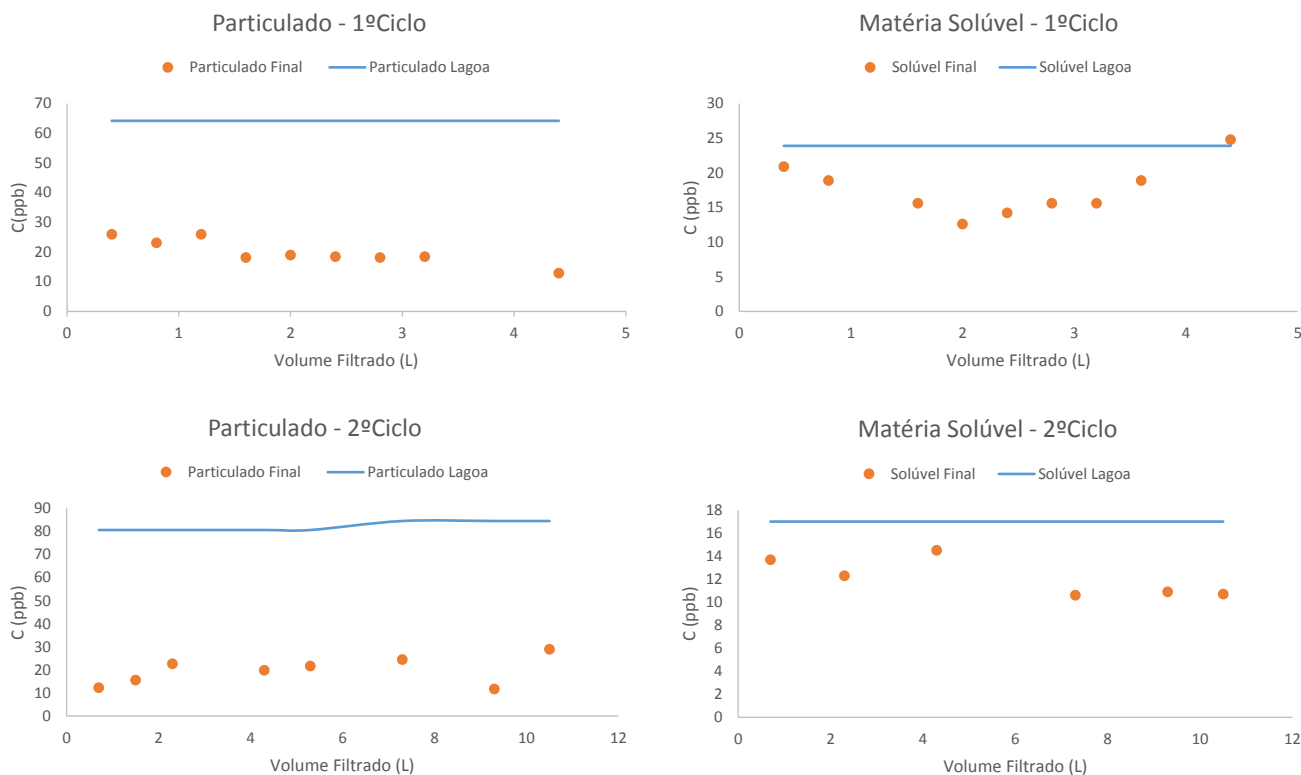
O caudal foi medido experimentalmente, com o auxílio de uma proveta e um cronómetro, a velocidade superficial de passagem e os “*bed volume*” foram calculados pelas equações (1) e (2), respetivamente.

$$v = \frac{Q}{A_{coluna}} \quad (1)$$

$$\frac{BV}{h} = \frac{Q}{V_{leito}} \quad (2)$$

### Leito de Areia Fina - Ensaio 1

Durante o ensaio, foram recolhidas várias amostras e analisadas, posteriormente, através do método analítico, descrito no capítulo anterior. A figura 7 representa a variação das concentrações de partículas e matéria solúvel, para os dois ciclos do ensaio 1. No final do 1ºCiclo, realizou-se um backwash, utilizando água destilada em contracorrente e ar, para retirar as partículas que ficaram retidas no leito.



**Figura 7** Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 1 - Areia Fina

Neste ensaio, as condições experimentais não variaram entre os ciclos de trabalho.

Como se pode verificar na figura 7, o leito de areia fina mostrou-se eficaz na remoção do particulado, apresentando uma percentagem média de remoção de 67%, para o 1ºciclo e de 76%, para o 2ºciclo. Quanto à matéria orgânica, a remoção foi cerca de 30% e 33%, respetivamente. O volume total que passou, no 1ºciclo, foi de 4,4L até à colmatação, enquanto no 2ºciclo foram clarificados 10,5L de água da lagoa. A turbidez final da água filtrada foi de 1,0 NTU e de 1,2 NTU, respetivamente.

Apesar de não ter existido alterações nas condições experimentais entre os ciclos do Ensaio 1, estes obtiveram alguns resultados diferentes, principalmente a nível da remoção de particulado e volume total de filtrado. Tal facto pode dever-se a uma pré-lavagem do leito insuficiente, ou a um rearranjo das partículas do leito, quando se procedeu ao *backwash*, no final do primeiro ciclo, tornando o leito mais eficiente.

Na tabela 15 apresentam-se os valores médios de particulado e matéria solúvel, para a água da lagoa e para a água filtrada, bem como os valores de turbidez e volume total de filtrado, para os dois ciclos do Ensaio 1. Os cálculos efetuados para a obtenção dos valores médios estão presentes no Anexo VI.

Tabela 15 Resultados médios obtidos no Ensaio 1 - Areia Fina

Ciclo	Água da Lagoa						Água Filtrada				%Remoção	
	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção Particulado (%)	Remoção M.Sol. (%)
1	64,2	23,9	20,2	7,5	4	4,4	21,5±6,3	17,5±3,6	1,0	7,2	67	30
2	76,4±10,8	19,3±4,0	14,6	7,5	4	10,5	20,7±5,7	11,4±2,0	1,2	6,9	76	33

### Leito de Areia Fina - Ensaio 2

Na figura 8 encontra-se a variação da concentração de particulado e matéria solúvel, para os dois ciclos do ensaio 2.

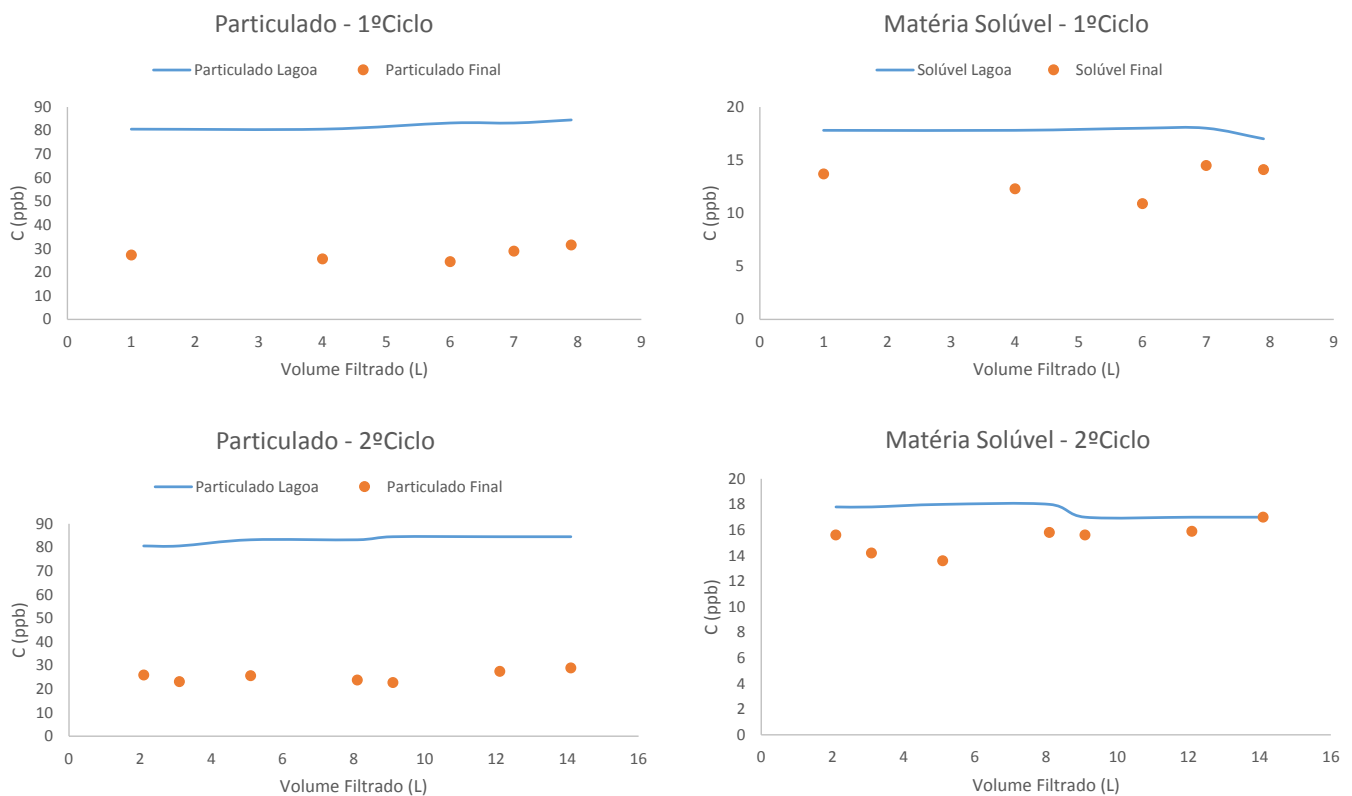


Figura 8 Variação da Concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 2 - Areia Fina

Tal como no ensaio 1, no ensaio 2 não existiram alterações das condições experimentais, do primeiro para o segundo ciclo.

No que diz respeito à remoção de particulado, os valores médios obtidos foram de 67%, para o 1ºCiclo, e de 69%, para o 2ºCiclo. A matéria solúvel teve uma redução média na ordem dos 26% e dos 12%, respetivamente.



Quanto ao volume de água tratada, no 1ºCiclo processaram-se 7,9L e no 2ºCiclo, 14,1L, até à colmatação do leito de areia fina. A turbidez final da água tratada foi de 1,6 NTU e 1,3 NTU, respetivamente.

Neste ensaio, os valores da remoção de particulado são semelhantes, para os dois ciclos realizados. Contudo, no caso da remoção de matéria solúvel e volume total processado, verificou-se uma variação significativa de valores. Mais uma vez, estes resultados são, possivelmente, explicados pelos fenómenos referidos, no ensaio anterior. O *backwash*, realizado no final do 1ºCiclo, promoveu um rearranjo diferente das partículas no leito, obtendo-se um maior volume de água tratada, no final do 2ºCiclo.

Na tabela 16 encontram-se os resultados obtidos durante o ensaio 2.

Tabela 16 Resultados médios obtidos no Ensaio 2 - Areia Fina

Ciclo	Água da Lagoa						Água Filtrada				%Remoção	
	particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção particulado (%)	Remoção M.Sol. (%)
1	82,4±1,7	17,7±0,4	20,2	7,1	4	7,9	27,6±2,8	13,1±1,5	1,6	6,9	67	26
2	83,0±1,8	17,5±0,5	21,7	7,1	4	14,1	25,4±2,3	15,4±1,1	1,3	7,1	69	12

### **Conclusões Gerais sobre a remoção de partículas em leitos de areia fina**

Nos dois ensaios de filtração realizados com areia fina, a velocidade superficial de passagem e, conseqüentemente, o caudal de passagem mantiveram-se constantes (4 m/h e 33 mL/min, respetivamente), **alterando-se apenas a altura do leito de areia, entre ensaios (6 cm, para o Ensaio 1, e 16,5 cm, para o Ensaio 2).**

Tendo em conta as percentagens de remoção obtidas, para o particulado, concluiu-se que a areia fina é um meio filtrante eficaz, obtendo-se percentagens de remoção acima de 65%, em todos os ciclos. O facto dos valores de remoção de particulado não terem sofrido alterações significativas, com o aumento da altura de leito, indica que a retenção do particulado ocorre nos primeiros centímetros do leito, no caso da areia fina.

Os valores de remoção de matéria solúvel diminuíram ao longo dos ciclos de filtração, nos dois ensaios. Contudo, pode-se concluir que a areia fina tem capacidade para remover alguma matéria considerado solúvel, presente na água, com percentagens médias de remoção abaixo dos 30%.

As concentrações médias de particulado, na água tratada, baixaram para valores entre os 20 e 30ppb, valores que estão abaixo do valor limite de concentração no estado trófico [3].

Quanto à turbidez da água, o leito de areia fina, com granulometrias entre 0,45 e 0,9 mm, também conseguiu diminuir o seu valor, significativamente, nos dois ensaios, para valores entre 1 e 2 NTU.

Para o volume de água tratada, até à colmatação do leito, o 2ºCiclo obteve melhores resultados que o 1ºCiclo, em ambos os ensaios. Tal pode dever-se aos backwash, realizados no final do 1ºCiclo, que promoveram a descompactação do leito e, conseqüentemente, o aumento de volume de água tratada, no 2ºCiclo.

## Leito de Areia Grossa

No estudo do leito de areia grossa foram efetuados dois ensaios. O Ensaio 1 teve dois ciclos de trabalho, fazendo-se um backwash no final de cada ciclo, e o Ensaio 2 teve apenas 1 ciclo.

Na tabela 17 encontram-se as condições experimentais dos 2 ensaios de filtração

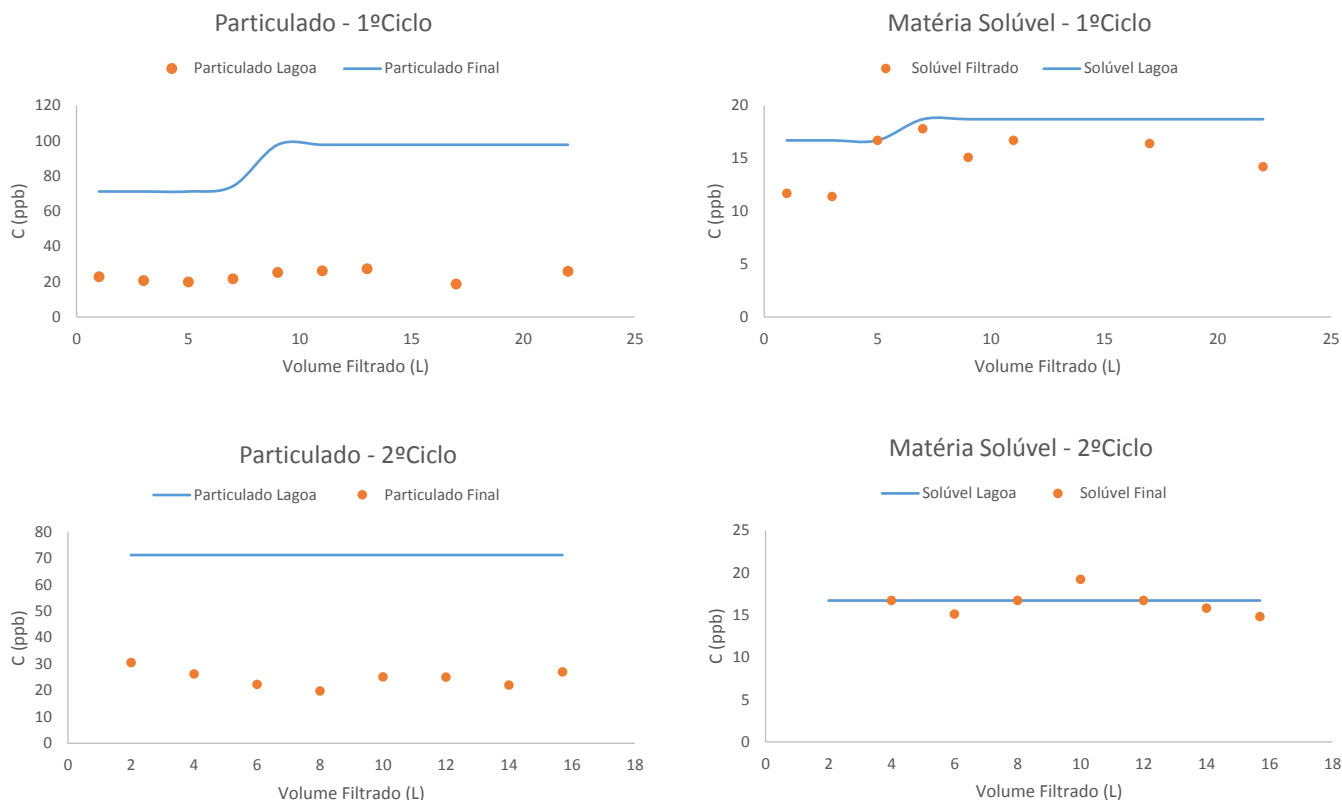
**Tabela 17 Condições Experimentais dos Ensaios realizados com Leito de Areia Grossa**

	Ensaio 1 (1ºCiclo//2ºCiclo)	Ensaio 2
Altura do leito (cm)	9	13,5
Volume do leito (cm <sup>3</sup> )	44,2	66,2
v (m/h)	4//8	4
BV/h	44,8//89,7	28,9
Q (mL/min)	33//66	33

### *Leito de Areia Grossa - Ensaio 1*

No Ensaio 1 fez-se variar a velocidade superficial de passagem, do primeiro para o segundo ciclo, com o objetivo de avaliar o efeito da velocidade superficial de passagem, na remoção de partículas.

Na figura 9 estão presentes os resultados da concentração de partículas e matéria orgânica da água da lagoa e da água tratada ao longo do ensaio, para os 2 ciclos de trabalho.



**Figura 9 Variação da concentração particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 1 - Areia Grossa**

Atendendo à figura 9, o leito de areia grossa reteve uma grande parte do particulado, presente na água. A percentagem de remoção média, para o 1ºciclo, foi de 70%, e de 67% para o 2ºCiclo.

A turbidez da água da lagoa tratada, após passagem pelo leito de areia, diminuiu para os valores de 1,2 e 1,5 NTU, para o primeiro e segundo ciclos, respetivamente.

Ao contrário do que se verificou para o leito de areia fina, o volume total de água tratado, até o leito colmatar, diminuiu de 22,2L, no 1ºCiclo, para 15,7L, no 2ºCiclo. Tendo em conta que o “backwash” foi realizado do mesmo modo que nos ensaios anteriores, e que o parâmetro que se alterou, entre os ciclos do ensaio com areia grossa, foi a velocidade superficial de passagem, pôde-se verificar que houve um efeito negativo da velocidade superficial de passagem, no volume total de água tratado.

Quanto à matéria solúvel, concluiu-se que o leito de areia grossa não foi eficiente na sua remoção. Os valores obtidos para a percentagem de remoção do solúvel foram de 18,8%, para o 1ºciclo, e 5,2%, para o 2ºciclo, indicando a pouca viabilidade na remoção de solúvel, por parte do leito de areia grossa.

Tendo em conta a variabilidade de valores obtidos, para a remoção de matéria solúvel no ensaio, representou-se, na figura 10, estes resultados em função do volume total de água tratado, até à colmatação do leito.

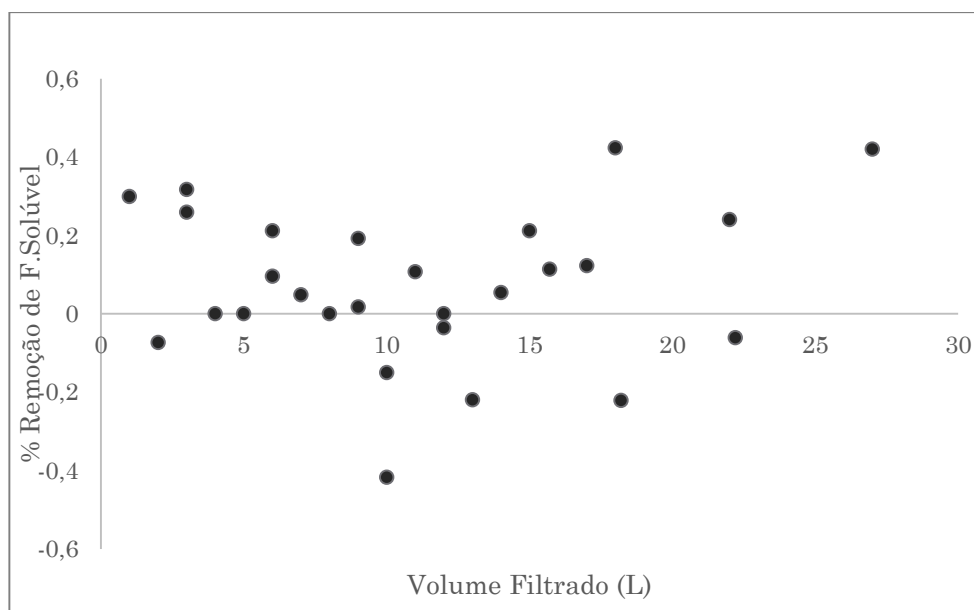


Figura 10 Valores da remoção de matéria solúvel durante o Ensaio 1 - Areia Grossa

Como se poder verificar, pela análise da figura, os valores obtidos para a remoção de matéria solúvel, durante o ensaio, são próximos de zero, chegando mesmo a existir valores negativos, devido a erros de análise. Deste modo, considerou-se que o leito de areia grossa não conseguiu retirar matéria solúvel, presente na água da lagoa a tratar.

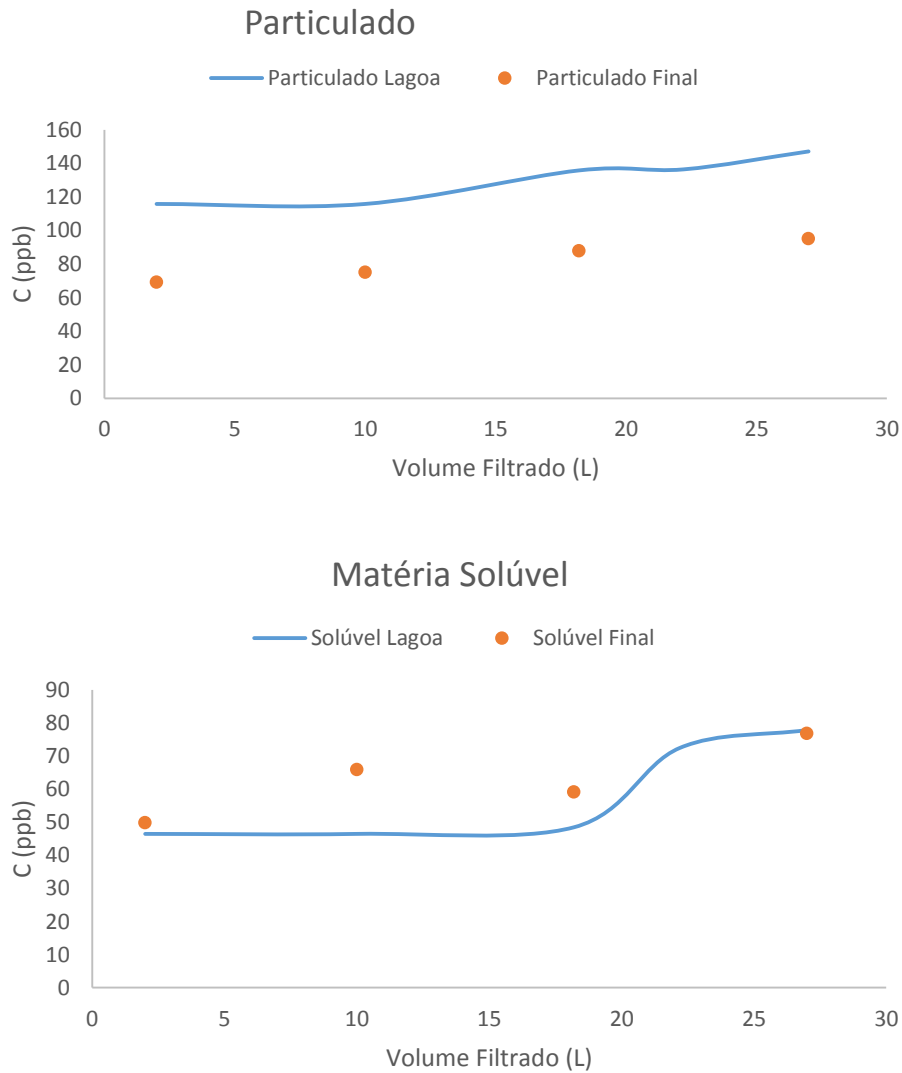
Em suma, a tabela 18 contém os valores médios obtidos do tratamento da água da lagoa, em leitos de areia grossa, para os dois ciclos do Ensaio 1.

Tabela 18 Resultados médios obtidos no em leito Ensaio 1 – Areia Grossa

Ciclo	Água da Lagoa						Água Filtrada				%Remoção	
	particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção particulado (%)	Remoção F.Sol. (%)
1	86,2±13,6	18,0±1,0	11,8	7,5	4	22,2	23,1±3,1	15,9±3,4	1,2	7,4	70	18,8
2	71,2	16,7	11,8	7,5	8	15,7	24,7±3,4	16,4±1,5	1,5	7,2	66	5,2

### Leito de Areia Grossa - Ensaio 2

O Ensaio 2 teve apenas um ciclo de trabalho, com uma velocidade superficial de passagem de 4 m/h. A figura 11 representa os resultados obtidos em cada amostra retirada no ensaio 2.



**Figura 11 Variação da Concentração particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 2 – Areia Grossa**

Como se pode verificar pela figura acima, no ensaio 2, o leito de areia grossa foi eficaz na remoção de partículas da água da lagoa, com uma percentagem média de remoção de 61,2%. Contudo, para a matéria solúvel, verificou-se, novamente, que o leito de areia grossa não removeu matéria solúvel, de forma consistente, ao longo do ensaio.

A figura 12 demonstra que a variabilidade de resultados obtidos, para valores de remoção de solúvel, encontram-se no limite de valor nulo, concluindo-se que o meio areia grossa não produziu resultados, no que toca à remoção de solúvel.

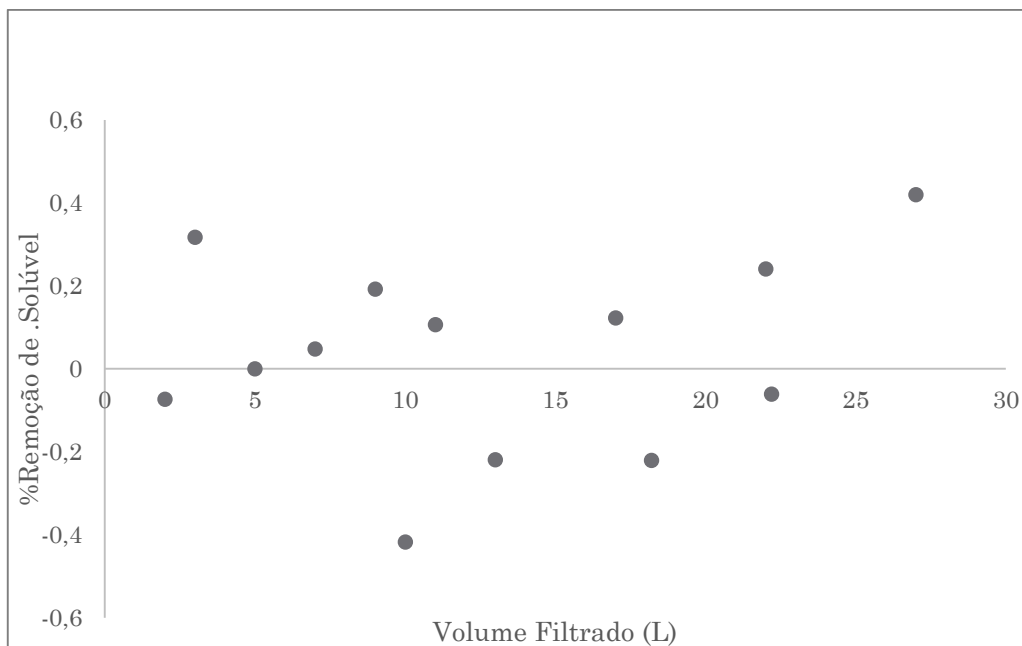


Figura 12 Valores da porcentagem de remoção de matéria solúvel para o Ensaio 2 – Areia grossa

Os valores médios obtidos neste ensaio encontram-se na tabela 19.

Tabela 19 Resultados médios obtidos no ensaio 2 - Areia Grossa

Ciclo	Água da Lagoa					Água Filtrada					%Remoção	
	particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção Particulado (%)	Remoção F. Sol. (%)
1	130,3±13,9	58,4±15,5	13,7	7,5	4	27	55,2±11,8	59,4±12,7	1,7	7,3	61,2	-

### Conclusões Gerais sobre a remoção de partículas em leitos de areia grossa

Ao analisar os resultados obtidos nos dois ensaios, concluiu-se que, numa maneira geral, o leito de areia grossa é um meio filtrante eficiente na redução de particulado da água (acima dos 60% de remoção, nos dois ensaios).

As concentrações médias finais de particulado da água foram, para o Ensaio 1, de cerca de 23 e 25 ppb, encontrando-se abaixo do valor limite para águas eutróficas. No Ensaio 2, tal não se verificou, tendo-se obtido uma concentração final média de 55,18 ppb, enquanto o limite mínimo, para a água ser avaliada em estado eutrófico, é de 35 ppb [3]. Esta água teria, então, de ser submetida a um tratamento secundário.

Nos dois ensaios com leito de areia grossa, os valores de remoção de matéria solúvel foram muito baixos, tendo existido mesmo valores nulos. Concluiu-se então que o leito de areia grossa não foi eficaz na remoção de solúvel.

Os volumes de filtrado totais, dos dois ensaios, foram satisfatórios, tendo-se obtido mais de 20L de água tratada, em dois dos três ciclos de trabalho realizados.

A turbidez final da água tratada, nos dois ensaios, diminuiu para valores entre 1 e 2NTU.

Quanto ao efeito da velocidade superficial de passagem, estudado nos ciclos do Ensaio 1, denotou-se uma diminuição da quantidade de água tratada, até à colmatação do leito, no ciclo com maior velocidade superficial de passagem (2ºCiclo).

Entre os dois ensaios alterou-se a altura do leito de areia grossa de 9 cm para 13,5 cm. Quanto à remoção de particulado, o facto de não existir alterações consideráveis no seu valor, com o aumento da altura do leito de areia grossa, indicou que a retenção do particulado se deu nos primeiros centímetros do leito.

### **Comparação entre as duas granulometrias de Areia**

Tanto o leito de areia fina (0,45 – 0,9 mm), como o leito de areia grossa (1,7 – 2 mm), foram eficientes na remoção de particulado, tendo-se obtido percentagens médias de remoção acima de 60%, em ambas as granulometrias.

De um modo geral, os dois leitos obtiveram concentrações de particulado finais abaixo do valor limite de 35 ppb [3].

O leito de areia fina foi mais eficiente que o leito de areia grossa, na remoção de matéria solúvel. No primeiro, a percentagem de remoção obtida foi cerca de 30%, enquanto no segundo concluiu-se que não houve remoção de matéria solúvel.

Quanto à turbidez final da água, os dois leitos de areia conseguiram diminuir, significativamente, o seu valor inicial, para valores entre 1 e 2 NTU.

Nos ensaios do leito de areia grossa, o volume de água total tratada foi consideravelmente maior que nos ensaios do leito de areia fina.

Com o aumento da velocidade superficial de passagem, entre os ciclos do Ensaio 1 com leito de areia grossa, houve uma diminuição do volume total de água tratada.

#### **3.1.2 Leitões de Antracite**

Com vista à obtenção de informação relativa à antracite realizaram-se ensaios com granulometrias diferentes: antracite fina e antracite grossa. A dimensão das partículas, a porosidade do leito e as suas densidades encontram-se na tabela 20.

**Tabela 20 Granulometrias, porosidades e densidades para a antracite**

	<b>Antracite Fina</b>	<b>Antracite Grossa</b>
<b>Tamanho Partículas (mm)</b>	0,6 - 1,6	2,36 – 4,6
<b>Porosidade</b>	0,47	0,43
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,5	-

De notar que, para ambas granulometrias, utilizou-se uma camada de areia grossa como suporte, que foi contabilizada na altura total do leito, para efeitos de cálculo. Nos ensaios com antracite fina, a altura de areia grossa foi de 1 cm e 2 cm, respetivamente. A altura de areia foi de 0,7cm, para o ensaio realizado com antracite grossa.

### **Leito de Antracite Fina**

Para estudar a antracite fina, procederam-se a dois ensaios distintos. Para além da eficiência da remoção de partículas, os ensaios de antracite pretenderam esclarecer a influência da altura do leito e da velocidade de passagem, no processo de clarificação da água.

As condições experimentais dos ensaios estão apresentadas na tabela 21.

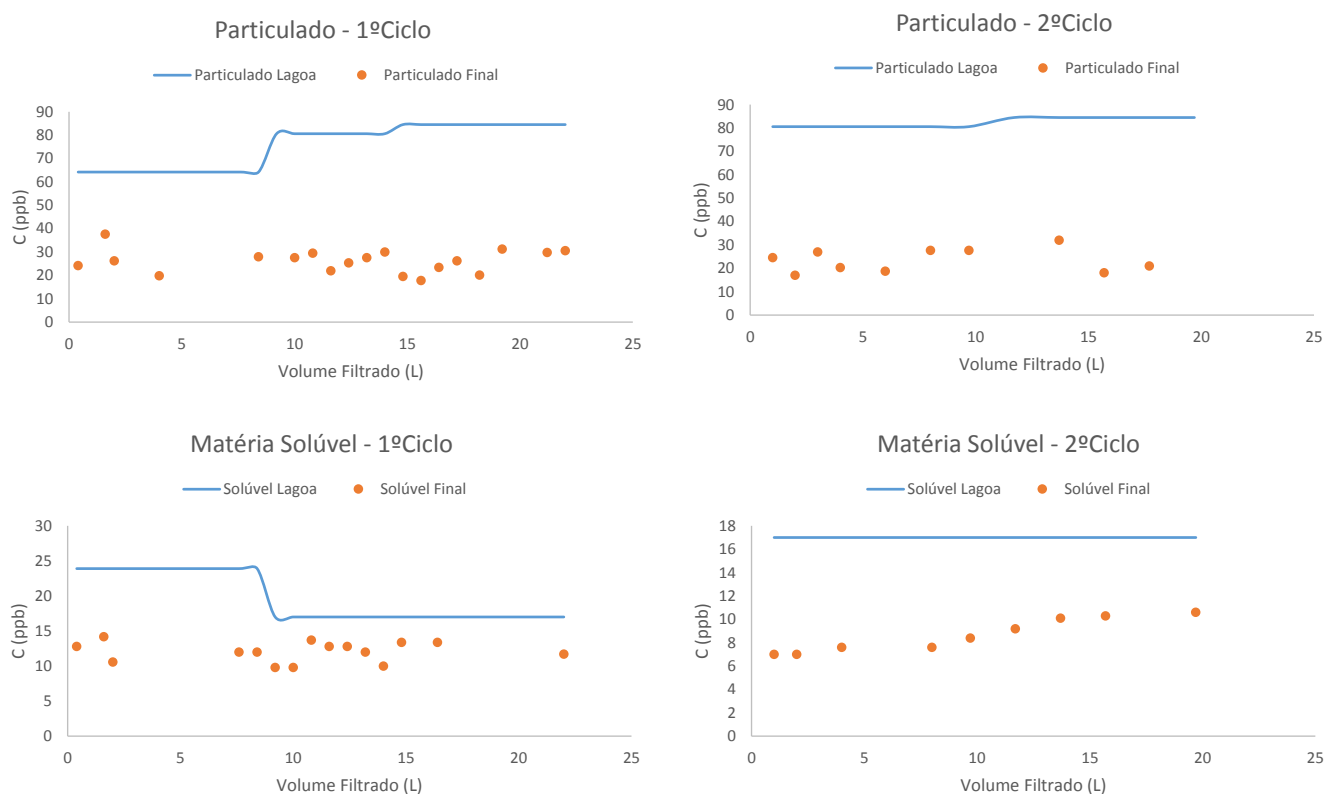
**Tabela 21 Condições experimentais dos ensaios com antracite fina**

	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>
	<b>(Ciclo 1//Ciclo 2)</b>	<b>(Ciclo 1//Ciclo 2)</b>
<b>Altura do leito (cm)</b>	3	16
<b>Volume do leito (cm<sup>3</sup>)</b>	14,72	78,50
<b>v (m/h)</b>	4	4//10
<b>BV/h</b>	134,5	25,99//63,44
<b>Q (mL/min)</b>	33	34//83



## Leito de Antracite Fina - Ensaio 1

O primeiro ensaio realizou-se segundo as condições experimentais acima descritas e teve 2 ciclos. No final de cada ciclo, foi efetuado um “backwash”, removendo as partículas retidas no leito. Os resultados obtidos, para os dois ciclos, encontram-se representados na figura 13.



**Figura 13** Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 1 - Antracite Fina

Segundo os valores obtidos, como se pode observar na figura 13, o leito de antracite fina conseguiu reter parte das partículas, reduzindo o teor de particulado e matéria solúvel.

Na remoção de particulado, pôde-se verificar a descida de uma concentração média de 76,43ppb para 27,36ppb, no primeiro ciclo, e de 82,55 ppb para 23,38 ppb, no segundo ciclo. As concentrações obtidas estão de acordo com os valores limite para águas em estado eutrófico [3]. A antracite baixou a concentração de matéria solúvel de 19,3ppb para 12,89ppb e de 17ppb para 8,93ppb, respetivamente.

Assim, no primeiro ensaio, com o leito de antracite fina, a remoção média de particulado foi de 64% e de 71%, para o ciclo 1 e para o ciclo 2. Quanto à remoção de matéria solúvel, os valores médios foram de 36% e 47%, respetivamente.

Comparativamente, o segundo ciclo obteve melhores resultados em termos de concentração final de particulado e matéria solúvel, apesar das condições experimentais não

terem sido alteradas entre ciclos. Quanto ao volume total processado, no primeiro ciclo tratou-se um volume maior de água (22L) que no segundo ciclo (19,7L).

Quanto à turbidez final da água, o leito de antracite fina originou uma diminuição do seu valor para 1,8 NTU e 1,5 NTU, para o primeiro e segundo ciclos.

Na tabela 22 encontram-se os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 22 Resultados médios obtidos no Ensaio 1 - Antracite Fina

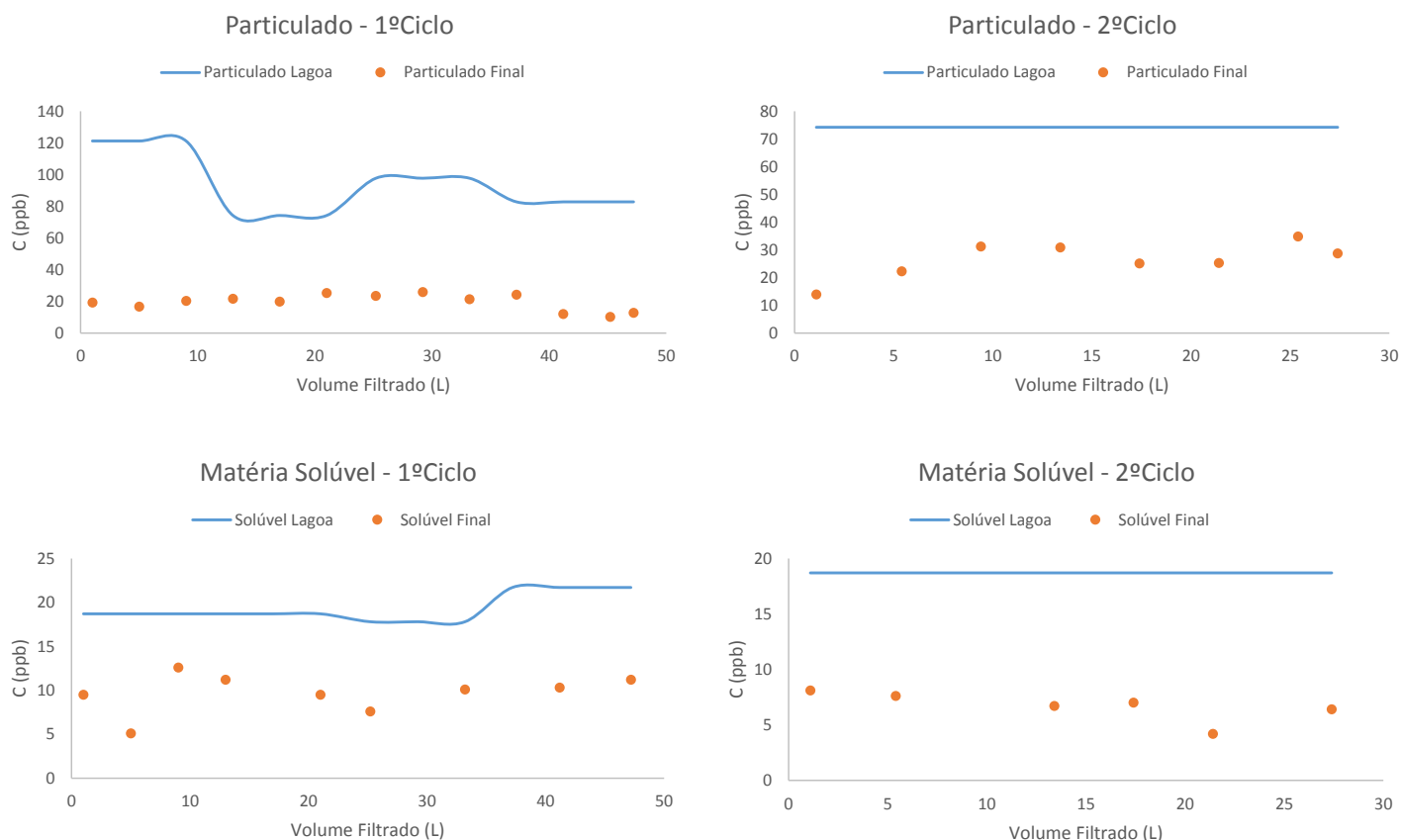
Ciclo	Água da Lagoa						Água Filtrada				%Remoção	
	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção Particulado (%)	Remoção Sol. (%)
1	<b>76,4±10,8</b>	19,3±4,0	14,6	7,5	4	22	<b>27,4±3,1</b>	15,9±3,4	1,8	7,2	64	36
2	<b>82,5±2,8</b>	17	14,6	7,5	4	19,7	<b>24,7±3,4</b>	16,4±1,5	2,3	7,1	71	47

### *Leito de Antracite Fina - Ensaio 2*

No Ensaio 2 aumentou-se a altura do leito de antracite para um total de 16 cm, com o intuito de analisar o efeito da altura do leito, no volume de água tratada obtido e na turbidez residual.

Neste ensaio, foram efetuados dois ciclos de trabalho, alterando-se a velocidade superficial de passagem entre eles (4 m/h, para o 1ºCiclo e 10 m/h, para o 2ºCiclo). No final de cada ciclo foi efetuado um backwash.

A figura 14 representa a concentração de particulado e matéria solúvel, para os dois ciclos de filtração.



**Figura 14 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 2 - Antracite Fina**

De acordo com os resultados obtidos, o leito de antracite fina é eficiente, quer na remoção de particulado, quer na remoção de matéria solúvel.

As concentrações médias de particulado, após passagem pelo leito de antracite fina, foram de 19,46ppb, para o 1ºCiclo, e de 26,52ppb, para o 2ºCiclo, que estão abaixo do limite estipulado pelo Critério Nacional [3].

Comparando os dois ciclos, no 1ºCiclo obteve-se um maior volume de filtrado (47L) e uma maior percentagem média de remoção de particulado (78%), em relação ao 2ºCiclo (27L e 64%). Quanto à remoção de matéria solúvel, com o 2ºCiclo conseguiu-se remover cerca de 57%, enquanto no 1ºCiclo, se removeu 48% do solúvel presente na água.

Esta diferença nos valores obtidos nos dois ciclos pode ser explicada pela alteração da velocidade superficial de passagem. Quanto maior a velocidade superficial de passagem, menor foi o volume filtrado.

No caso da turbidez final da água, os dois ciclos apresentaram valores mais elevados que os valores obtidos pelo filtro de areia.

Os resultados obtidos no Ensaio 2, com leito de antracite fina, encontram na tabela 23.

Tabela 23 Resultados médios obtidos no Ensaio 2 - Antracite Fina

Ciclo	Água da Lagoa						Água Filtrada				%Remoção	
	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção Particulado (%)	Remoção Sol. (%)
1	87±9,3	19,4±2,0	20,3	7,5	4	47,2	19,5±5,1	11,6±4,0	4,5	7,3	78	48
2	87±9,3	19,4±2,0	20,3	7,5	10	27,4	26,5±6,5	8,0±2,8	3,2	7,5	64	57

### **Conclusões Gerais sobre a remoção de partículas em leitos de antracite fina**

Analisando os resultados obtidos nos dois ensaios, concluiu-se que o leito de antracite fina (0,6 – 1,6 mm) foi eficiente na remoção de particulado e solúvel. As percentagens de remoção de particulado, para todos os ciclos, variaram entre 64% e 78%, enquanto as percentagens de remoção de matéria solúvel variaram entre 36% e 57%.

Os valores médios de concentração de nutrientes na água tratada, com antracite fina, diminuíram, ficando abaixo do limite de concentração para águas eutrofizadas.

Tendo em conta os volumes de filtrado obtidos, concluiu-se que o leito de antracite fina foi capaz de obter quantidades de água tratada maiores que o leito de areia fina. Contudo, a turbidez final da água foi mais elevada que nos ensaios com leitos de areia.

### **Leito de Antracite Grossa**

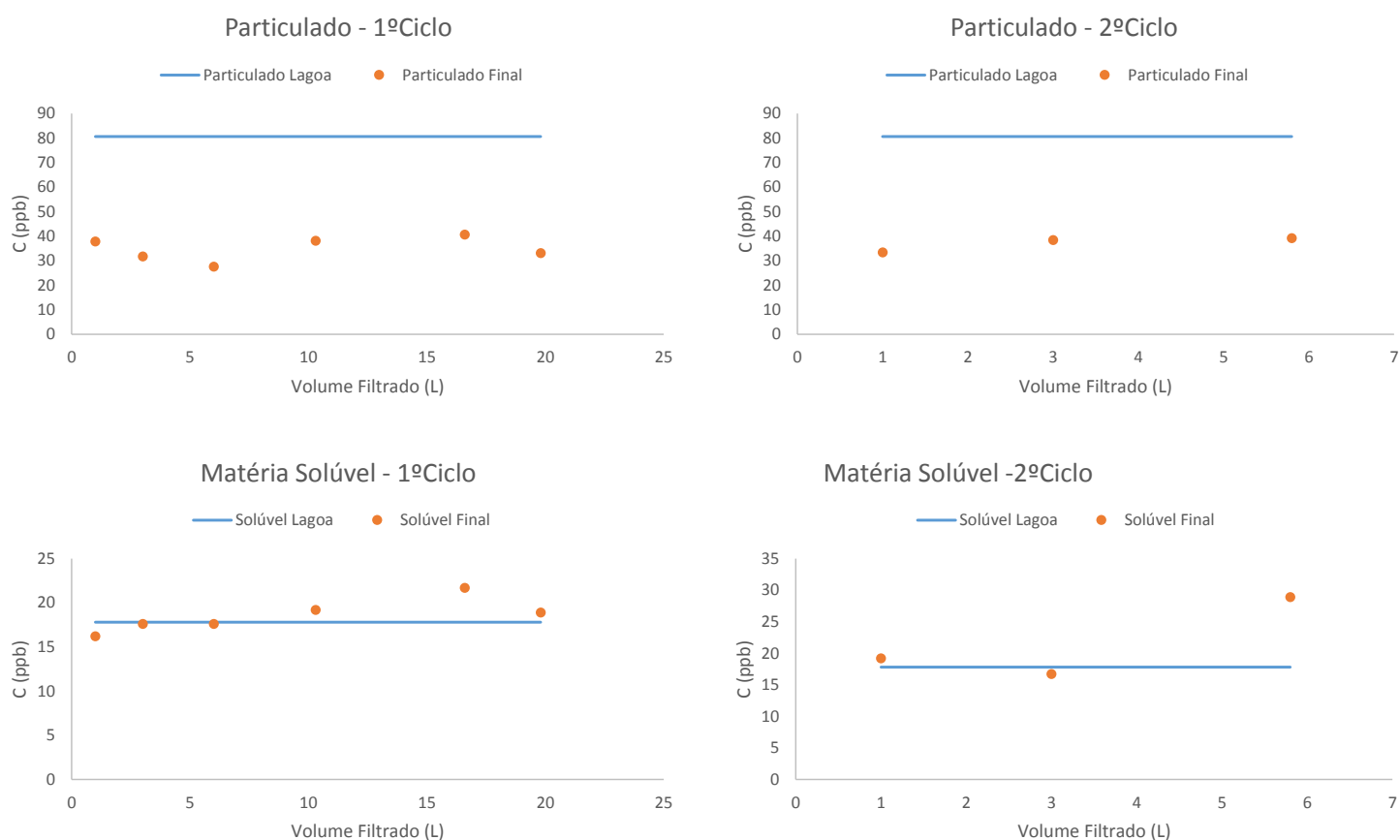
O ensaio efetuado com antracite grossa teve as seguintes condições experimentais (tabela 24)

Tabela 24 Condições Experimentais do ensaio com antracite grossa

Ensaio 1 (Ciclo 1//Ciclo 2)	
Altura do leito (cm)	14,7
Volume do leito (cm <sup>3</sup> )	72,12
v (m/h)	4//10
BV/h	28,3//67,4
Q (mL/min)	33//81

## Leito de Antracite Grossa - Ensaio 1

Na figura 15 encontram-se as representações gráficas da variação da concentração de particulado e matéria solúvel, ao longo do ensaio.



**Figura 15** Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 1 - Antracite grossa

Como se pode verificar pela figura anterior, o leito de antracite grossa teve capacidade para reter parte do particulado, presente na água. No entanto, para a matéria solúvel, este meio filtrante revelou-se ineficaz.

Com o leito de antracite grossa, obteve-se 57%, para o 1ºCiclo, e 54%, para o 2ºCiclo, de remoção de particulado. Contudo, as concentrações de particulado, na água filtrada, foram de 34,82 e 37ppb, ficando acima do valor limite, estipulado no Critério Nacional [3], pelo que a água teria de sofrer um tratamento posterior.

Analisando os resultados para a remoção de matéria solúvel, concluiu-se que a antracite grossa não é o material mais adequado para a sua remoção (figura 16). Neste ensaio, a remoção de matéria solúvel apresentou valores próximos de zero, tendo mesmo tido alguns resultados negativos, devido a erros analíticos.

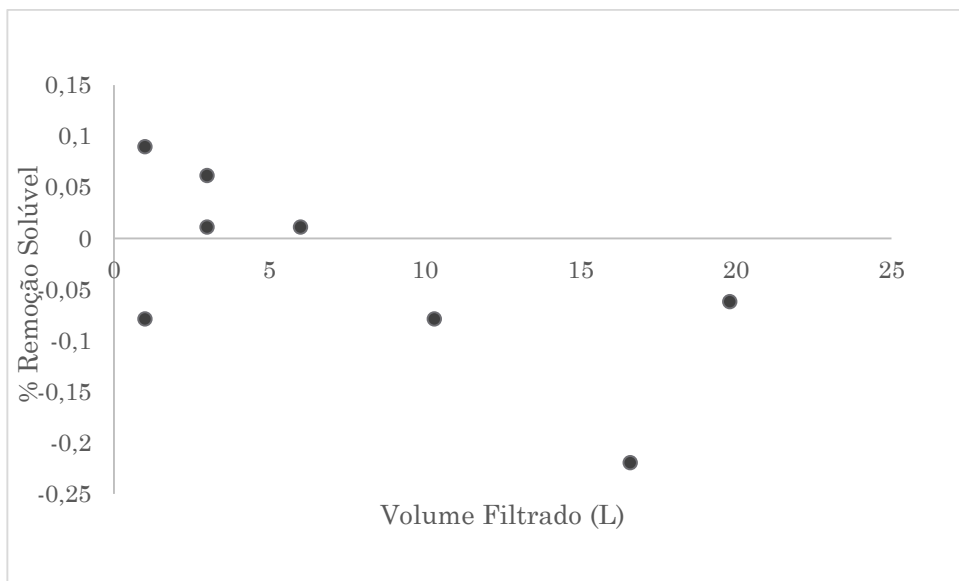


Figura 16 Valores de Remoção de Matéria Solúvel do ensaio 1 - Antracite Grossa

Quanto ao volume total de filtrado, denotou-se uma diferença bastante significativa entre os dois ciclos: no primeiro ciclo passaram 19,8L e, no segundo, apenas 5,8L. Atendendo que, a única variável que se alterou entre os dois ciclos foi a velocidade superficial de passagem, observou-se, então, o efeito negativo do aumento de velocidade no volume de filtrado. A turbidez final da água ficou com valores próximos de 2 NTU.

Na tabela 25 apresentam-se os resultados deste ensaio.

Tabela 25 Resultados médios obtidos no ensaio 1 - Antracite Grossa

Ciclo	Água da Lagoa					Água Filtrada					%Remoção	
	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção particulado (%)	Remoção Sol. (%)
1	80,6	17,8	6,9	7,3	4	19,8	34,8±4,9	18,5±1,9	2	7,1	57	-
2	80,6	17,8	6,9	7,3	10	5,8	37±3,1	21,6±6,4	1,9	7,4	54	-

### Comparação entre as duas granulometrias

Tendo em conta os ensaios realizados, com os dois leitos de antracite, o leito de antracite fina (0,6 – 1,6 mm) apresentou melhores resultados que o leito de antracite grossa (2,36 – 4,6 mm).

Nas concentrações finais de nutrientes da água tratada, todos os ensaios realizados com o leito de antracite fina diminuiram para valores abaixo do valor limite em águas eutrofizadas [3]. Contudo, no leito de antracite grossa, os teores obtidos, para água tratada, ficaram acima desse valor limite.

Quanto à matéria solúvel, mais uma vez, o leito de granulometria mais fina foi mais eficiente que o leito de partículas de maiores dimensões. Tanto no caso do leito de areia grossa, como no caso do leito de antracite grossa, os ensaios não revelaram uma remoção consistente de matéria solúvel.

Também no que toca ao volume total de filtrado, o leito de antracite fina obteve melhores resultados que o leito de antracite grossa.

A turbidez final da água tratada, com estas duas granulometrias, foi mais elevada que a turbidez final da água conseguida pelos leitos de areia.

No leito com granulometria mais fina foi testado o efeito da altura do leito, realizando-se dois ensaios, um com uma altura de leito de 3 cm e outro com uma altura de leito de 16 cm. O Ensaio 2, com uma altura de leito maior, obteve melhores resultados que o Ensaio 1, tanto a nível de remoção de nutrientes, como em volume total tratado. Estes resultados indicaram que o aumento da altura do leito beneficiou o tratamento da água da lagoa. Atendendo que, nos estudos efetuados com areia, a retenção de partículas se deu nos primeiros centímetros de leito (a diferença de alturas estudadas foi de 6 cm para 16,5 cm), no caso da antracite, a diferença de alturas estudadas teve um efeito positivo na remoção de nutrientes, provavelmente porque a diferença de alturas foi maior que no primeiro caso estudo.

### 3.1.3 Leitos de Calcite

Para o estudo da calcite foram realizados ensaios, com duas granulometrias diferentes: Calcite Fina e Calcite Grossa. As suas características encontram-se na tabela 26.

Tabela 26 Granulometrias, porosidades e densidades da Calcite

	Calcite Fina	Calcite Grossa
Tamanho Partículas (mm)	0,6 – 1,6	1,6 – 2,36
Porosidade	0,49	0,63
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,28	1,97

A areia grossa, utilizada como suporte do leito, teve uma altura de 1cm, tanto para a calcite fina, como para a calcite grossa.

#### Leito de Calcite Fina

As condições experimentais dos ensaios realizados com calcite fina encontram-se na tabela abaixo.

**Tabela 27 Condições experimentais dos ensaios com calcite fina**

	Ensaio 1 (Ciclo 1//Ciclo 2)	Ensaio 2 (Ciclo 1//Ciclo 2)
Altura do leito (cm)	10	6
Volume do leito (cm <sup>3</sup> )	49,06	29,44
v (m/h)	4	8//12
BV/h	40,36	134,52//201,78
Q (mL/min)	33	66//99

#### *Leito de Calcite Fina - Ensaio 1*

No Ensaio 1, as condições experimentais não foram alteradas entre os ciclos. Os resultados obtidos, para os dois ciclos, foram muito semelhantes, quer a nível de remoção de particulado e matéria solúvel, quer a nível do volume de filtrado obtido e turbidez final. Os valores obtidos encontram-se na tabela 28.

A percentagem de remoção de particulado foi de 74%, para os dois ciclos. A remoção de matéria solúvel foi de 46%, para o 1ºCiclo, e de 41% para o 2ºCiclo.

A concentração média final de particulado na água, nos dois ciclos, teve valores abaixo do limite de concentração, para águas eutrofizadas [3], concluindo-se que a calcite fina é um meio filtrante eficiente, na redução de partículas da água.

Contudo, durante o ensaio, a água tratada saiu com uma cor esbranquiçada, no final da coluna. A causa mais provável deste evento foi a dissolução da calcite na água da lagoa.

A figura 17 representa a variação da concentração de particulado e matéria solúvel, ao longo dos ciclos do Ensaio 1.



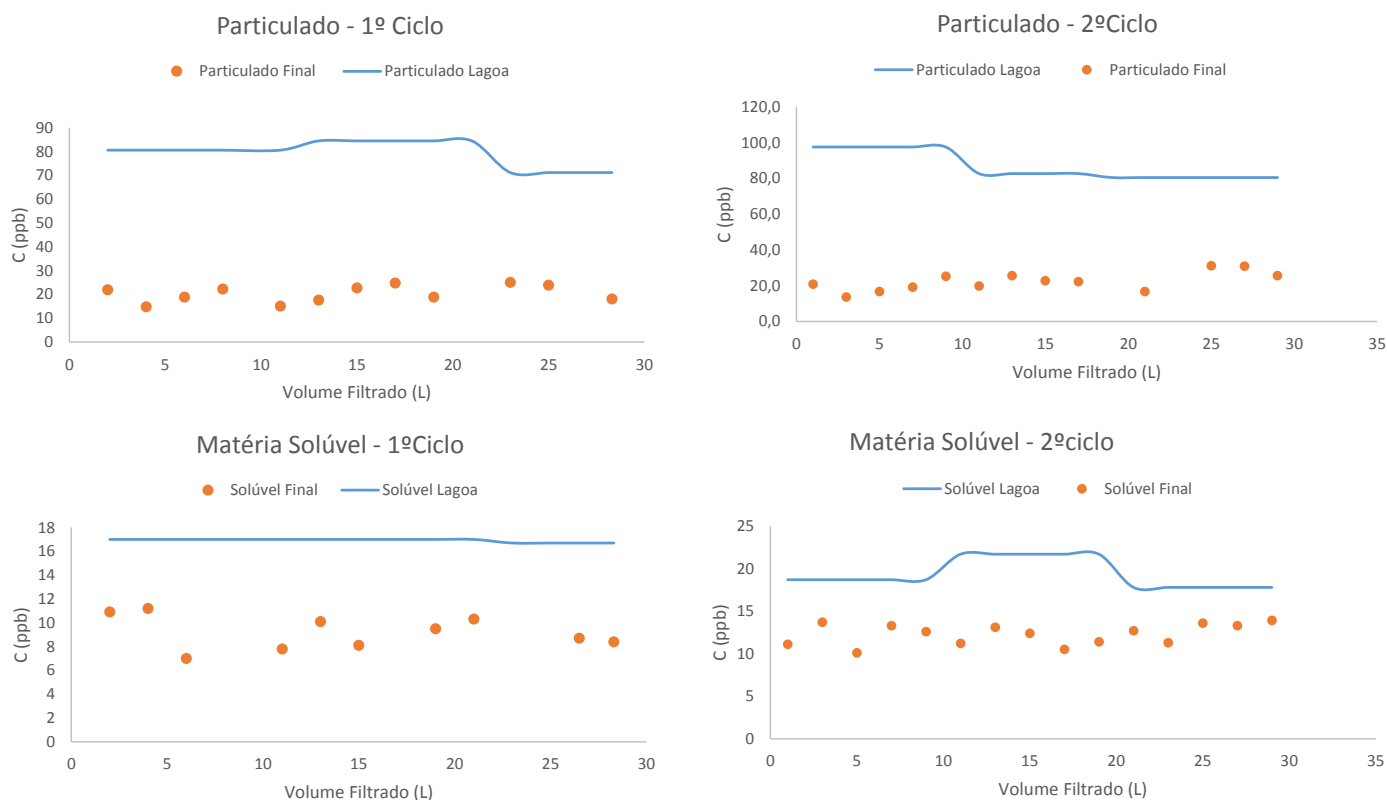


Figura 17 Variação da Concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 1 - Calcite Fina

Tabela 28 Resultados médios obtidos no ensaio 1 - Calcite Fina

Ciclo	Água da Lagoa						Água Filtrada				%Remoção	
	Particulado (ppb)	M. Sol. (ppb)	T (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	M.Sol. (ppb)	T (NTU)	pH	Remoção particulado (%)	Remoção Sol. (%)
1	78,8±6,8	16,9±0,2	14,6	7,5	4	28,3	20,6±6,2	10,8±2,9	1,7	7,9	74	46
2	87±9,3	19,4±2,0	20,3	7,5	4	29	22,3±6,6	11,3±3,9	1,7	7,1	74	41

### Leito de Calcite Fina - Ensaio 2

No Ensaio 2 realizaram-se dois ciclos: o 1ºCiclo, com uma velocidade superficial de passagem de 8 m/h, e o 2ºCiclo, com uma velocidade superficial de passagem de 12 m/h.

Neste trabalho experimental, verificou-se que, tanto para o volume de filtrado, como para a percentagem média de remoção obtiveram-se melhores resultados, com o ciclo de velocidade de passagem menor. Quanto à matéria solúvel, os resultados médios de remoção foram semelhantes nos dois ciclos.

A concentração de particulado, para a água tratada, diminui para 18,9 ppb no 1ºciclo, estando este valor abaixo do limite proposto pelo Critério Nacional [3]. No caso do 2ºCiclo, o valor final obtido ficou acima do limite proposto.

Na figura 18 está representada a variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo dos dois ciclos de trabalho.

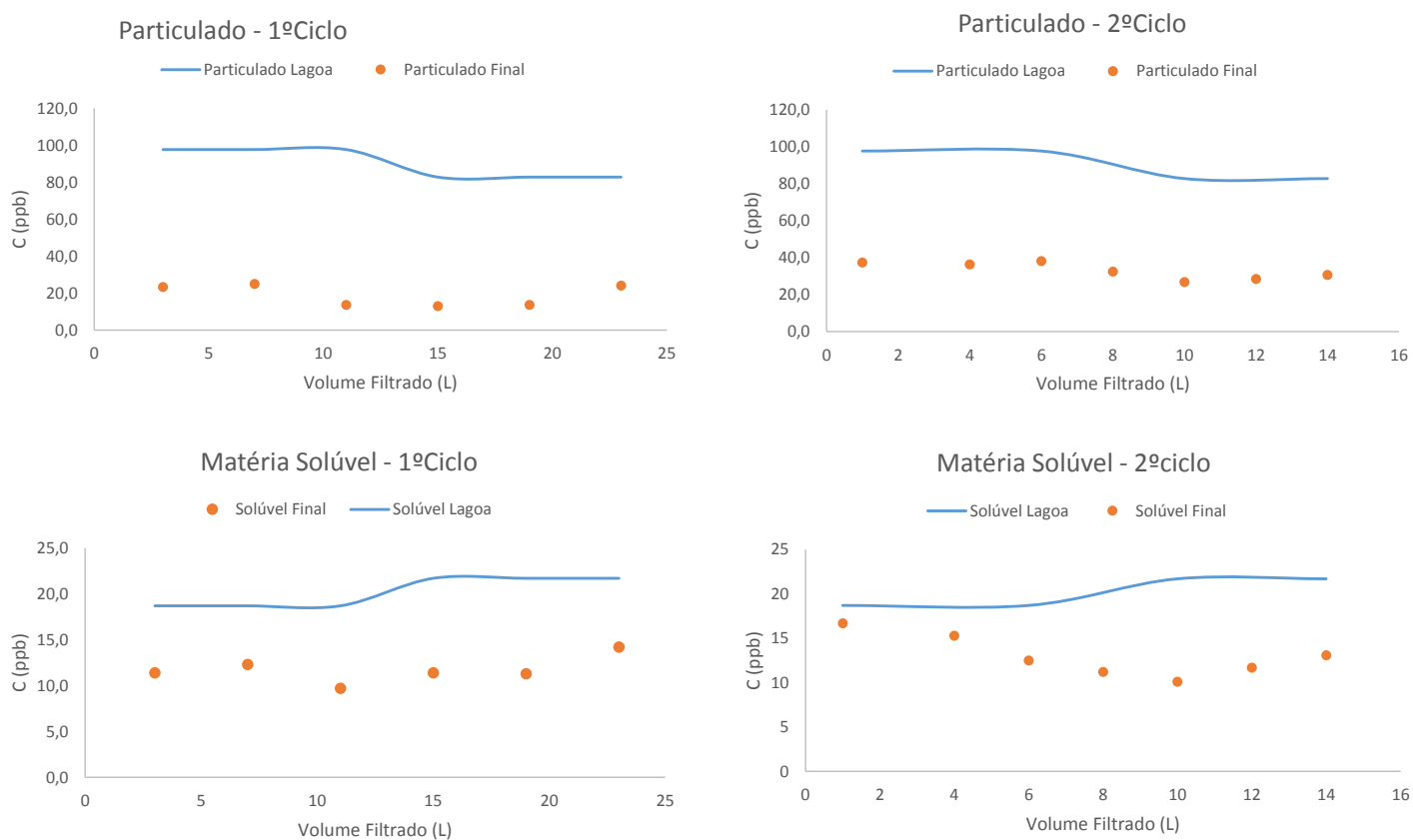


Figura 18 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 2 - Calcite Fina

Os resultados para este ensaio estão, sumariamente, apresentados na tabela 29.

Tabela 29 Resultados médios obtidos no ensaio 2 - Calcite Fina

Ciclo	Água da Lagoa						Água Filtrada				%Remoção	
	Particulado (ppb)	M. Sol. (ppb)	T (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	F. Solúvel (ppb)	T(NTU)	pH	Remoção Part.(%)	Remoção Sol. (%)
1	90,3±10,5	20,2±2,1	14,6	7,5	8	23	18,9±5,9	11,7±1,5	1,2	7,6	79	44
2	90,3±10,5	20,2±2,1	14,6	7,5	12	14	32,8±4,5	12,9±2,3	2,9	7,5	63	42

## **Conclusões Gerais sobre a remoção de partículas em leitos Calcite Fina**

Nos ensaios realizados com a calcite fina obtiveram-se valores elevados de remoção de particulado, apresentando percentagens de remoção entre 63% e 79%. Para a matéria solúvel, obtiveram-se percentagens de remoção na ordem dos 40%, em todos os ciclos.

Os valores maiores de remoção de particulado foram obtidos no ciclo com menor velocidade de passagem.

Também para o volume de filtrado, quanto menor a velocidade superficial de passagem no leito, maior será o volume de filtrado, como já foi averiguado em ensaios diferentes.

Os valores de turbidez final da água são um pouco mais elevados do que os valores de turbidez obtidos com a areia.

## **Leito de Calcite Grossa**

Apenas se realizou um ensaio com a calcite de granulometria maior, variando a velocidade de passagem entre os dois ciclos. As condições experimentais estão apresentadas na tabela 30.

**Tabela 30 Condições Experimentais do ensaio com calcite grossa**

<b>Ensaio 1 (Ciclo 1//Ciclo 2)</b>	
<b>Altura do leito (cm)</b>	6
<b>Volume do leito (cm<sup>3</sup>)</b>	29,44
<b>v (m/h)</b>	4//8
<b>BV/h</b>	67,26//134,52
<b>Q (mL/min)</b>	33//66

### **Leito de Calcite Grossa - Ensaio 1**

O leito de calcite grossa removeu cerca de 63% do particulado, no primeiro ciclo, e 58%, no segundo ciclo. Contudo, o leito de calcite grossa não foi eficaz na remoção de matéria solúvel. Na figura 19 estão representados os pontos experimentais obtidos na remoção de matéria solúvel e, como se pode verificar, a remoção obtida é muito próxima de zero, concluindo-se que o leito de calcite grossa não é uma solução na sua remoção.

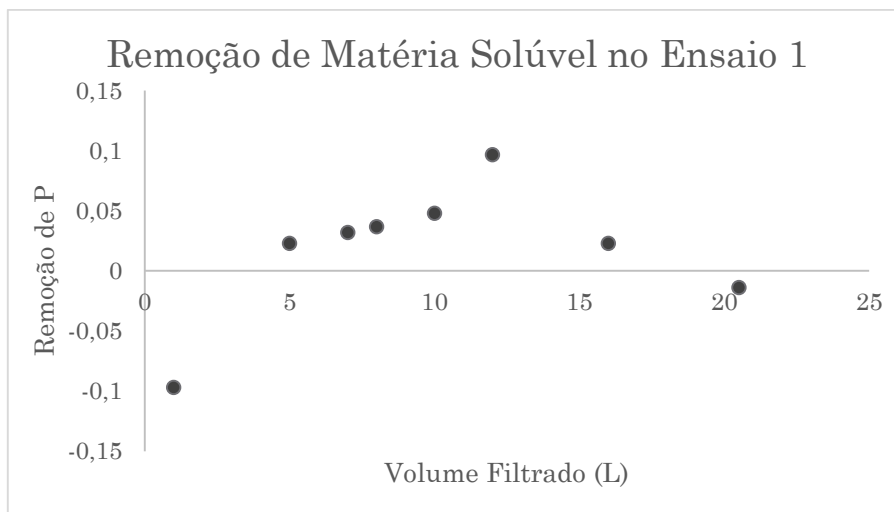


Figura 19 Variação dos valores de remoção de matéria solúvel com Calcite Grossa

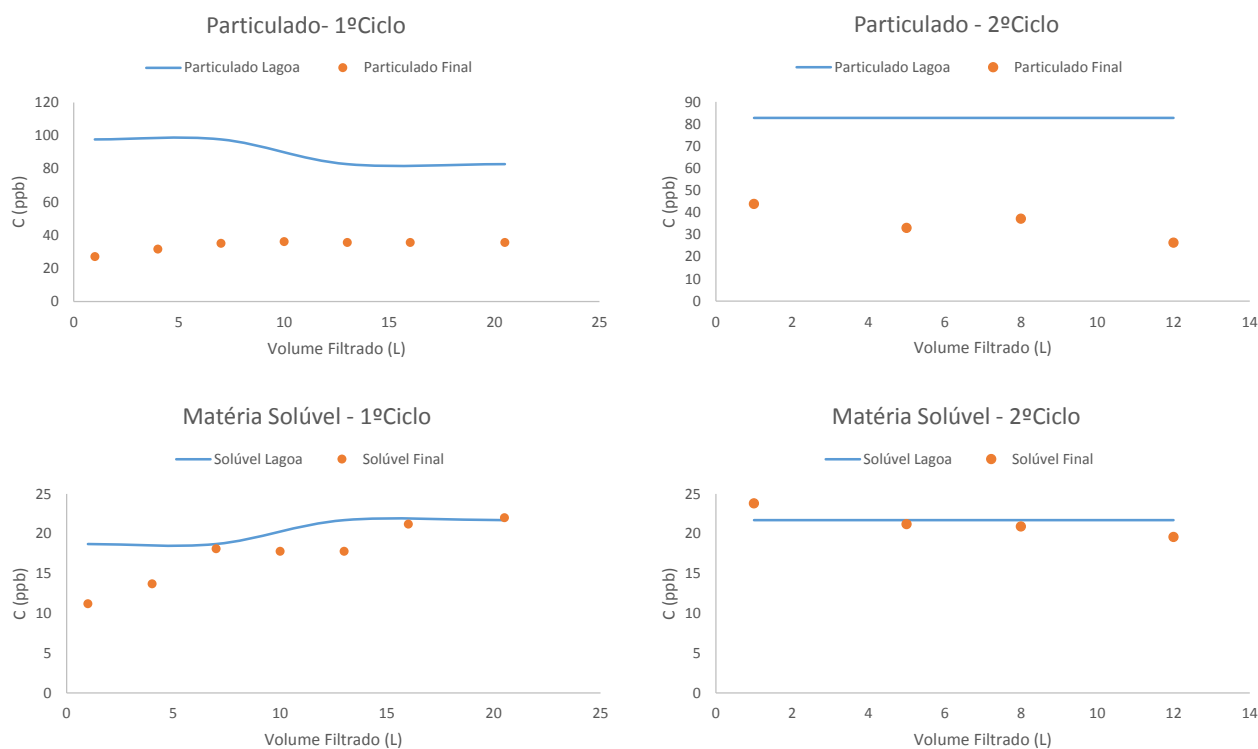
Ao variar a velocidade do primeiro para o segundo ciclo ficou, mais uma vez, comprovado a diminuição do volume total de água tratada, com o aumento da velocidade superficial de passagem no leito. Para uma velocidade de 4 m/h obteve-se um volume de 20,5L, e para uma velocidade de 8 m/h, apenas passaram 12L no leito de calcite grossa.

Os resultados deste ensaio encontram-se na tabela 31.

Tabela 31 Resultados médios obtidos no ensaio 1 - Calcite Grossa

Ciclo	Água da Lagoa					Água Filtrada					%Remoção	
	Part. (ppb)	M. Sol(ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Part. (ppb)	M. Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção Part.(%)	Remoção Sol. (%)
1	90,3±10,5	20,2±2,1	14,6	7,5	4	20,5	33,8±3,4	17,4±3,8	1,8	7,6	63	-
2	90,3±10,5	20,2±2,1	14,6	7,5	8	12	35,1±7,3	21,4±1,8	1,9	7,4	58	-

A figura 20 representa o ensaio decorrido com a variação da concentração de particulado e matéria solúvel da água da lagoa e da água filtrada.



**Figura 20** Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio - calcite grossa

As concentrações finais de particulado, nos dois ensaios, ficaram muito próximas do valor limite de 35 ppb [3].

### Comparação entre as duas granulometrias

Os ensaios com leito de calcite fina (0,6 – 1,6 mm) obtiveram percentagens de remoção de particulado e solúvel maiores que os ensaios com leitos de calcite grossa (1,6 - 2,36 mm).

Também os volumes totais de água tratada nos leitos de calcite fina foram maiores que os volumes obtidos nos ensaios com leitos de calcite grossa. Nestes ensaios, foi também testado o efeito da velocidade superficial de passagem e constatou-se que, para velocidades menores, maior o volume total de água que passou no leito, antes da sua colmatção.

Para a turbidez final da água, as duas granulometrias de calcite obtiveram valores maiores de turbidez que os leitos de areia.

Quanto à concentração final de particulado na água tratada, a água que passou no leito de calcite fina atingiu concentrações mais baixas que a água que passou no leito de calcite grossa. Em ambos os casos, as concentrações finais não excederam o valor limite estipulado pelo Critério Nacional [3].

### 3.1.4 Leitos de Hidróxido de Ferro

Para o estudo do leito de hidróxido de ferro, utilizou-se um composto sintetizado laboratorialmente GEH. O tamanho de partículas usado e a sua porosidade estão explícitos na tabela abaixo.

Tabela 32 Granulometrias e porosidades do Hidróxido de Ferro, GEH

Hidróxido de Ferro GEH	
Tamanho Partículas (mm)	0,2 – 2
Porosidade	0,7

#### Leito de Hidróxido de Ferro, GEH

A análise deste composto como filtro para os nutrientes presentes na água englobou dois ensaios distintos: no primeiro ensaio, a filtração foi efetuada em fluxo descendente, e no segundo ensaio, foi testado o fluxo ascendente para a água a filtrar.

Além deste procedimento experimental, é de referir que, o primeiro ciclo experimental é realizado com água da lagoa e o segundo ciclo de cada ensaio é realizado com a água da lagoa pré-filtrada no filtro de areia.

As condições experimentais dos dois ensaios encontram-se na tabela 33.

Tabela 33 Condições experimentais nos ensaios com hidróxido de ferro

	Ensaio 1	Ensaio 2
	(Ciclo 1//Ciclo 2)	(Ciclo 1//Ciclo 2)
Fluxo	Descendente	Ascendente
Altura do leito (cm)	14	17
Volume do leito (cm <sup>3</sup> )	68,69	83,41
v (m/h)	(4-16)//(4-12)	(4-16)//(4-12)
BV/h	(32,76–115,30)//(28,39-87,35)	(25,18-93,52)//(25,18-71,94)
Q (mL/min)	(35-132)//(33-100)	(35-130)//(35-100)

Para efeitos de suporte foi ainda utilizada uma altura de 2,5cm de areia grossa em ambos os ensaios.

#### *Ensaio 1 – Fluxo Descendente*

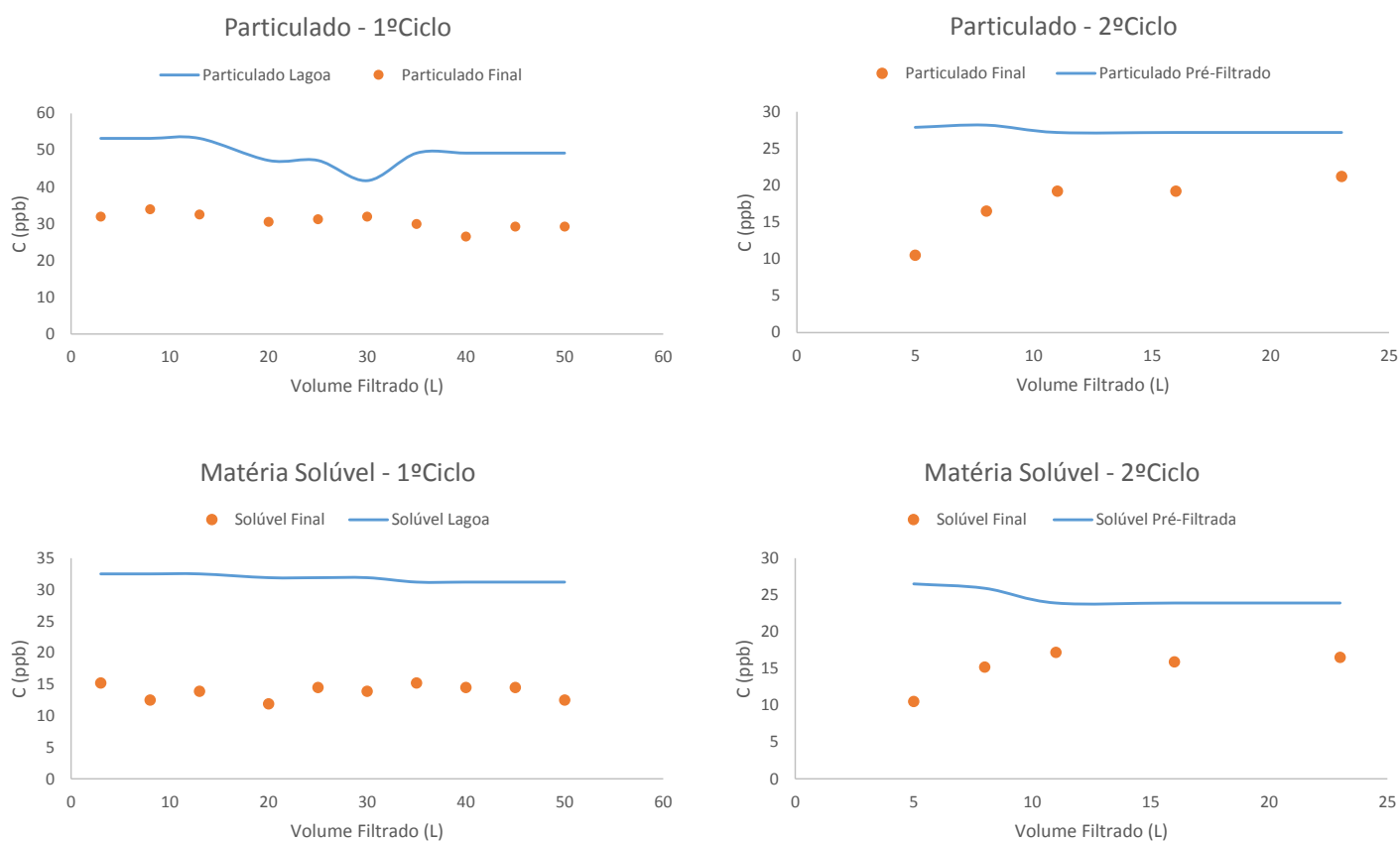
Na figura 21, estão representadas as variações nas concentrações particulado e matéria solúvel da água a ser tratada e da água filtrada, para os dois ciclos deste ensaio.

No 1ºCiclo, onde se filtrou água da lagoa, foram testadas várias velocidades de passagem (4,8,12 e 16 m/h), retirando duas amostras em cada uma delas. Como se pode verificar pela figura, não se denotou nenhuma alteração significativa e sistemática, nas concentrações do filtrado, tanto para o particulado, como para a matéria solúvel.

O hidróxido de ferro GEH foi mais eficiente na remoção de matéria solúvel (56%), que na remoção de particulado (39%), no 1ºCiclo.

Para o 2ºCiclo, a água a filtrar já tinha sofrido uma pré-filtração nos filtros de areia, como referido anteriormente. Neste ciclo, a remoção média de particulado foi de 31% e de solúvel, 33%.

Também neste ciclo, foram analisadas várias velocidades de passagem (4, 8 e 12 m/h) e não se observaram alterações significativas, na remoção de nutrientes.



**Figura 21 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel no ensaio 1**

A tabela abaixo sumariza os valores de remoção de particulado e matéria solúvel, turbidez e volume de filtrado obtidos nos dois ciclos.

Tabela 34 Resultados obtidos no Ensaio 1 com hidróxido de ferro

Ciclo	Água da Lagoa					Água Filtrada			%Remoção	
	Particulado (ppb)	F. Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	F. Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	Remoção Part. (%)	Remoção Sol. (%)
1 (Água Lagoa)	48,24±4,25	31,48±1,00	3,98	4//8//16	50	30,67±2,09	11,86±1,17	1,2	39	56
2 (Água Filtrada)	27,77±0,51	25,43±1,36	0,8	4//12	23	17,32±4,16	15,06±2,65	0,25	31	33

### Ensaio 2 – Fluxo Ascendente

No ensaio 2, alterou-se o fluxo de água, colocando a entrada desta no fundo da coluna e saindo no topo. A variação da concentração de particulado e matéria solúvel, ao longo do ensaio encontra-se na figura 22.

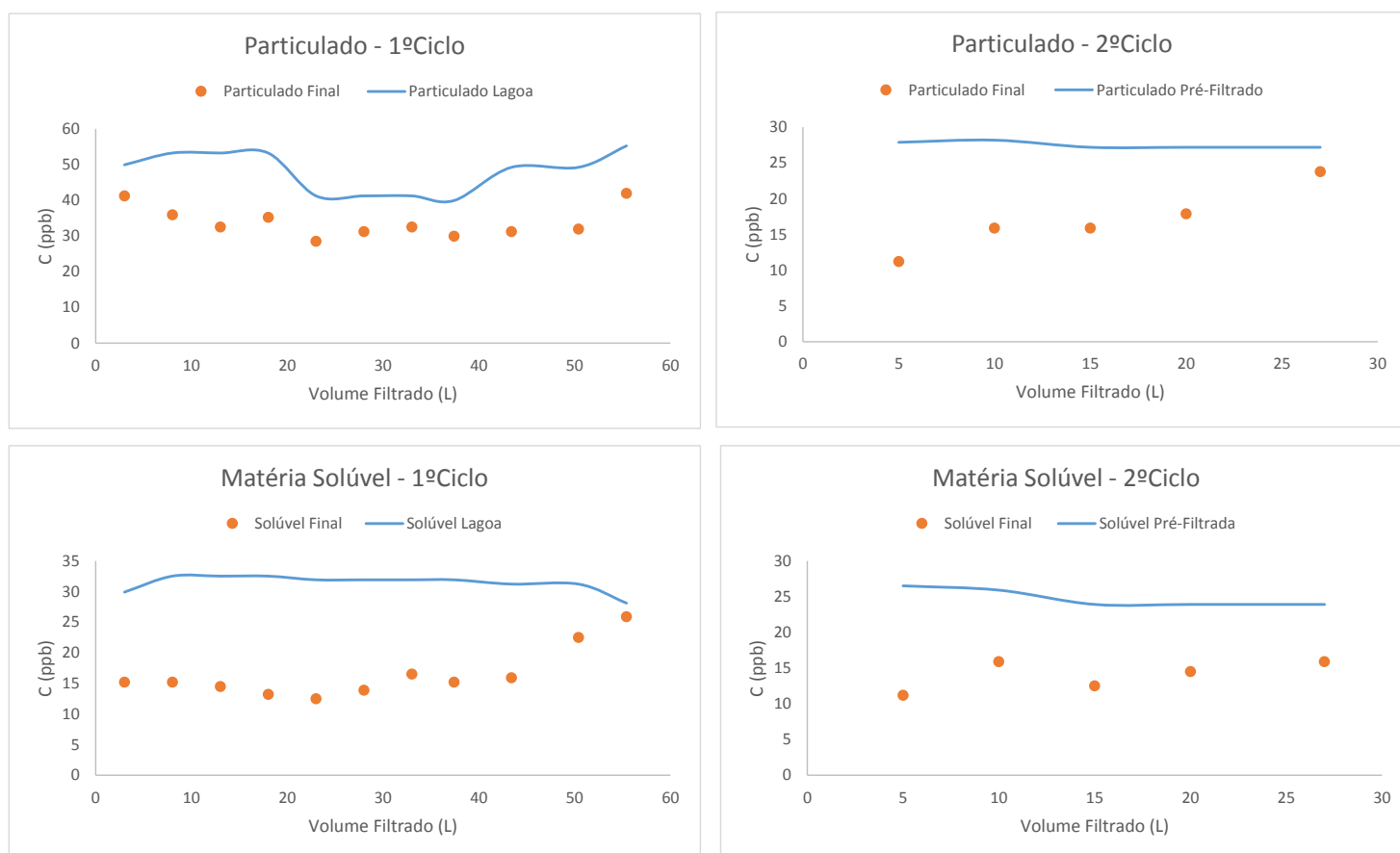


Figura 22 Variação da concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio 2

Durante o decorrer do ensaio, alterou-se a velocidade de passagem, como no ensaio anterior. Neste caso, tendo em conta que o fluxo é ascendente, houve uma preocupação acrescida para não ocorrer uma fluidização do leito, quando a velocidade aumentasse. Assim, o fluxo descendente tem a capacidade de atingir velocidades maiores que o fluxo ascendente.



A percentagem de remoção, de particulado e matéria solúvel, no fluxo ascendente, diminui ligeiramente em relação à remoção, no fluxo descendente. Os valores obtidos neste ensaio encontram-se na tabela seguinte.

Tabela 35 Resultados obtidos no ensaio 2 com hidróxido de ferro

Ciclo	Água da Lagoa					Água Filtrada			%Remoção	
	Particulado (ppb)	M. Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	v (m/h)	V (L)	Particulado (ppb)	F. Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	Remoção Part.(%)	Remoção Sol. (%)
1 (Água Lagoa)	48,10±6,25	30,92±1,64	3,98	4//8//12	55,4	33,81±4,36	16,41±4,09	1,8	30	51
2 (Água Filtrada)	27,77±0,51	25,43±1,36	0,8	4//12	27	16,94±4,56	14,06±2,09	0,4	45	43

### Conclusões gerais sobre a filtração com hidróxido de ferro

Tendo em conta os resultados obtidos no primeiro ciclo, dos dois ensaios, o hidróxido de ferro é um bom material filtrante de matéria solúvel, visto que, nos dois ciclos, obteve cerca de 50% de remoção.

Quanto ao particulado, com o hidróxido de ferro, os valores de remoção foram menores do que os obtidos pelos outros materiais estudados.

Com o uso do fluxo ascendente na filtração, conseguiu-se um maior volume de filtrado, em relação ao fluxo descendente. Tal aconteceu porque, ao utilizar-se um fluxo ascendente, melhorou-se o aproveitamento do leito, dando-se a filtração ao longo deste e não apenas nos seus primeiros centímetros.

#### 3.1.5 Conclusões sobre os leitos mistos em coluna d=2,5cm

De um modo geral, todos os materiais testados removeram particulado. Contudo, para a matéria solúvel, apenas os ensaios com meios filtrantes de tamanhos mais finos conseguiram removê-lo.

O hidróxido de ferro foi o composto que teve menores taxas de remoção, enquanto a calcite teve as taxas de remoção mais altas. Contudo, durante os ensaios com calcite, denotou-se que esta deixava a água filtrada com uma cor esbranquiçada.

Assim, optou-se por utilizar um leito misto de areia, com diferentes granulometrias, nas colunas de diâmetro maior.

## 3.2 Ensaio com Leitos Mistos em Colunas com d=5,2cm

Estes ensaios tiveram como objetivo testar o leito misto de areia, com duas granulometrias diferentes, e analisar qual o fluxo mais eficiente na remoção de partículas e matéria orgânica, ascendente ou descendente.

Para tal, foram realizados dois ensaios: um com fluxo ascendente e outro com fluxo descendente. Além disso, ao longo dos ensaios fez-se variar as velocidades superficiais de passagem no leito, por forma a obter o valor ótimo de trabalho.

As condições experimentais dos dois ensaios realizados encontram-se na tabela 36.

**Tabela 36 Condições experimentais dos ensaios realizados com leitos mistos de areia – fluxos ascendente e descendente**

	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>
<b>Fluxo</b>	Descendente	Ascendente
<b>Altura do leito (cm)</b>	109	120,5
<b>Volume do leito (cm<sup>3</sup>)</b>	2313,68	2557,78
<b>v (m/h)</b>	4//8//12//16//20	4//8//12//16//20
<b>BV/h</b>	3,8//7,5//11,2//14,8//18,4	3,3//6,8//10,6//13,4//16,7
<b>Q (mL/min)</b>	145//290//430//570//710	140//290//450//570//710

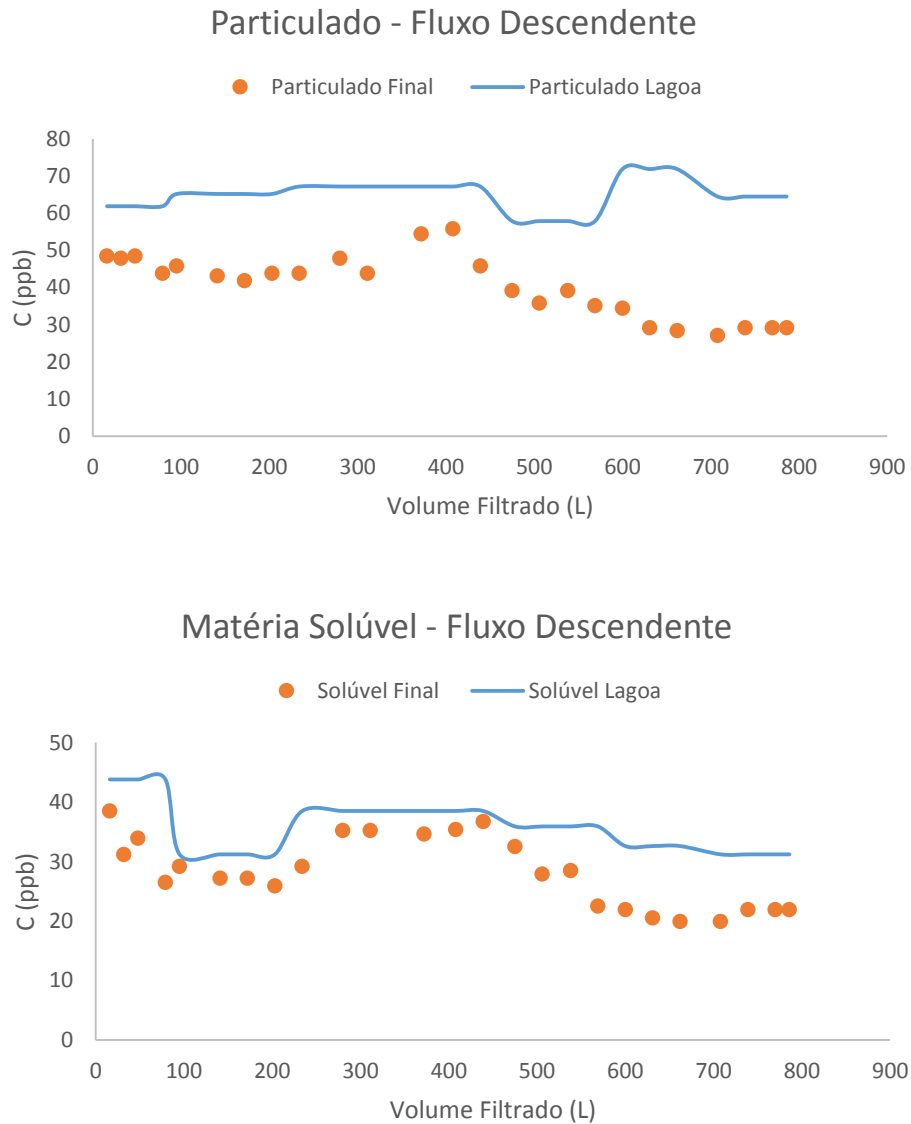
### 3.2.1 Ensaio 1 – Fluxo Descendente

As granulometrias das areias usadas no leito misto encontram-se na tabela seguinte 37.

**Tabela 37 Granulometrias e porosidades da areia - Fluxo Descendente**

	<b>Areia Muito Grossa</b>	<b>Areia Grossa</b>
<b>Tamanho Partículas (mm)</b>	4 - 5	1,4 – 2
<b>Porosidade</b>	0,5	0,44

Na figura 21 estão representados os pontos experimentais obtidos da concentração de particulado e matéria solúvel, ao longo do ensaio 1.



**Figura 23 Variação da concentração particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 1 - Fluxo Descendente**

Tendo em conta os pontos experimentais obtidos, o leito misto de areia removeu em média 41,3% de particulado e 25,1% de matéria solúvel.

A turbidez da água, após passagem pelo leito misto de areia, diminuiu consideravelmente para valores na ordem de 1 NTU.

Neste ensaio, o leito misto de areia não colmatou, tendo-se terminado o ensaio ao fim de 786 litros de água tratada.

As concentrações de nutrientes na água tratada não variaram, significativamente, com a variação da velocidade superficial de passagem. Assim, concluiu-se que a velocidade superficial de passagem não influencia a taxa de remoção destes.

Com o leito misto de areia, a concentração de particulado na água baixou para 40,5 ppb. Este valor ficou acima do valor de concentração limite [3], pelo que a água tratada teria ainda de sofrer um tratamento adicional, para baixar a concentração de partículas para os valores pretendidos.

Os resultados médios do ensaio com fluxo descendente encontram-se na tabela 38.

Tabela 38 Resultados médios dos Ensaio em Fluxo Descendente com leitos mistos de areia

Água da Lagoa				Água Filtrada					%Remoção		
Particulado (ppb)	M. Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Part. (ppb)	M. Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção Part.(%)	Remoção Sol. (%)
64,8±4,7	35,5±5,0	4,6	7,5	4//8//12//16//20	786	40,5±8,4	26,4±7,8	1,1	7,3	41,3	25,1

### 3.2.2 Ensaio 2 – Fluxo Ascendente

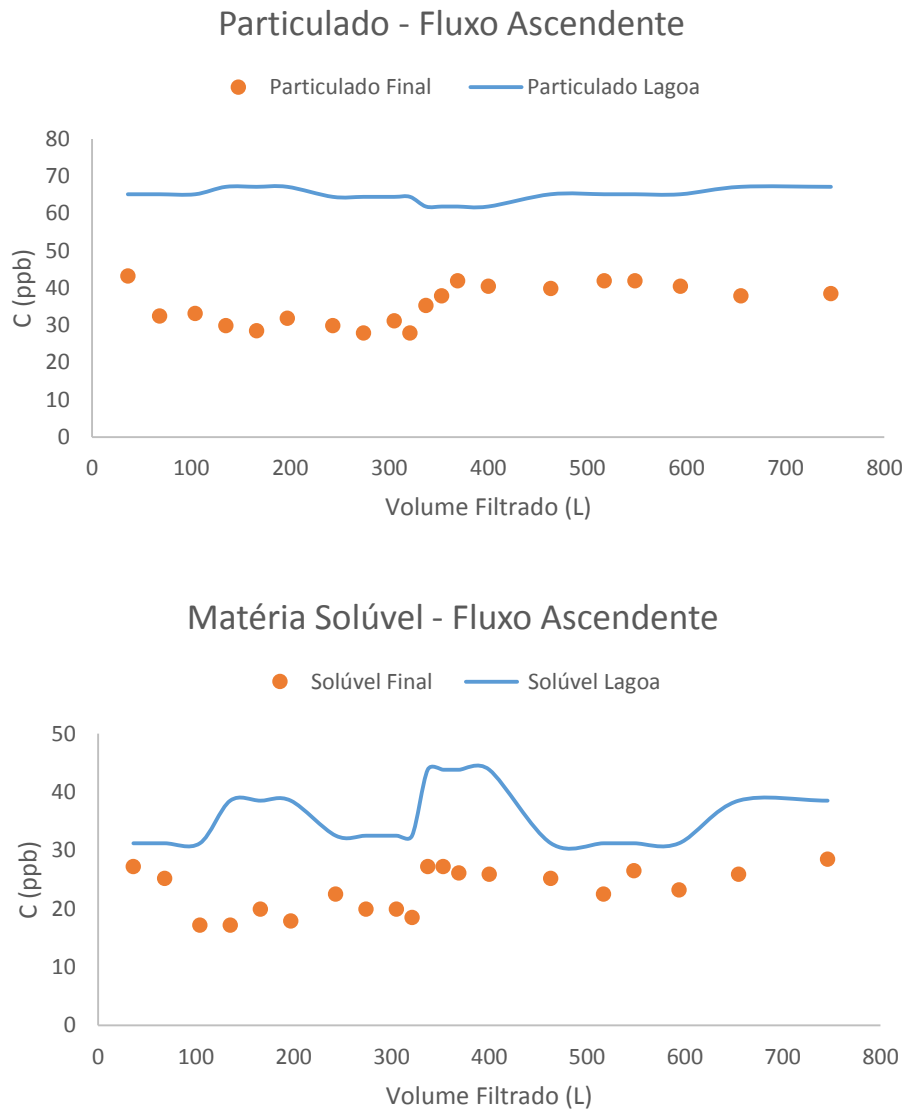
Para o ensaio em fluxo ascendente foram utilizadas três granulometrias de areia diferentes. O tamanho das partículas e a sua porosidade estão descritas na tabela 39.

Tabela 39 Granulometrias e porosidades da areia - Fluxo Ascendente

	Areia Muito Grossa	Areia Grossa	Areia Fina
Tamanho Partículas (mm)	4 - 5	1,4 – 2	1 – 1,4
Porosidade	0,5	0,44	0,33

O tamanho das partículas de areia fina não pôde ser menor, porque poder-se-ia dar uma fluidização do leito, para velocidades superficiais de passagem mais elevadas, visto a coluna funcionar em fluxo ascendente.

Na figura 24 estão representadas as concentrações de particulado e matéria solúvel ao longo do ensaio



**Figura 24 Variação da Concentração de particulado e matéria solúvel ao longo do Ensaio 2 - Fluxo Ascendente**

Para este ensaio, a percentagem de remoção média de particulado foi de 45% e para a matéria solúvel foi de 34%. O leito misto de areia não colmatou e passaram, no total, 746 litros de água. Quanto à turbidez, no final do ensaio obtiveram-se valores próximos de 1 NTU.

A concentração média final de partículas na água foi de 31,6 ppb. Este valor ficou abaixo do valor limite (35 ppb). [3]

Os resultados deste ensaio encontram-se na tabela 40.

**Tabela 40 Resultados médios do ensaio 2 - fluxo ascendente**

Água da Lagoa				Água Filtrada						%Remoção	
Particulado (ppb)	M. Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	v (m/h)	V (L)	Part. (ppb)	Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	pH	Remoção Part.(%)	Remoção Sol. (%)
67,2±3,3	34,5±3,3	4,4	7,5	4//8//12//16//20	746	31,6±4,5	20,5±3,4	1,1	7,4	45	34

### 3.2.3 Conclusões relativas aos fluxos ascendente e descendente

A remoção de particulado e matéria solúvel, pelo leito misto de areia foi eficaz, tanto no ensaio com fluxo descendente, como no ensaio com fluxo ascendente.

A remoção média de particulado foi de 45% no ensaio com fluxo ascendente e de 41%, no ensaio com fluxo descendente. Quanto à remoção de matéria solúvel, os valores foram de 34% para o fluxo ascendente e 25% para o fluxo descendente.

A concentração média final de particulado obtida foi de 40,5 ppb, no fluxo descendente, e de 31,6 ppb, no fluxo ascendente. Tendo em conta estes valores, o leito misto de areia com fluxo ascendente permitiu diminuir a concentração de partículas na água para valores abaixo do valor limite (35 ppb) [3], enquanto o ensaio com fluxo descendente necessitaria de um tratamento adicional.

No ensaio em fluxo ascendente, utilizaram-se três granulometrias diferentes de areia: areia muito grossa (4 – 5 mm), areia grossa (1,4 – 2 mm) e areia fina (1 – 1,4 mm). No ensaio em fluxo descendente, o leito de areia teve apenas duas granulometrias diferentes: areia muito grossa (4 – 5 mm) e areia grossa (1,4 – 2 mm). Esta diferença de granulometrias nos leitos mistos derivou do facto de que, no fluxo descendente, se se colocasse a camada de areia fina no topo, esta colmataria mais rápido, pois as partículas de maiores dimensões ficariam retidas na superfície do leito, provocando um aumento da perda de carga durante o ensaio e, conseqüentemente, a colmatção do leito.

Tendo em conta que nenhum dos ensaios chegou à colmatção, isto é, em nenhum dos fluxos chegou à saturação do leito, o leito misto de areia é uma opção eficiente para a remoção de partículas, independentemente do fluxo do processo.

Quanto à turbidez, qualquer um dos ensaios conseguiu diminuir o seu valor até valores próximos de 1NTU.

Tanto no primeiro ensaio, como no segundo, alterou-se a velocidade superficial de passagem, de modo a analisar a influência desta na remoção de particulado. Em ambos os ensaios, as alterações ocorridas na concentração final de particulado, na água filtrada, não foram significativas. Assim, a escolha de uma velocidade mais elevada, que não prejudique a percentagem de remoção do particulado, é uma escolha eficiente para o tratamento da água da lagoa.

### 3.3 Ensaaios de Ultrafiltração

Nos ensaios de ultrafiltração foram testadas duas amostras de água diferentes:

- A água da lagoa de modo a testar o processo de ultrafiltração, para remover o particulado e solúvel.

- A água da lagoa filtrada, após passagem pelos leitos de areia, de modo a testar a possibilidade de um processo integrado de leitos mistos e ultrafiltração.

Além das amostras de águas diferentes, também foram alteradas as condições experimentais entre ensaios, de modo a estudar qual o melhor modo de operar: pressão constante ou caudal constante. De notar que, durante os ensaios a caudal constante, a pressão subiu ao longo do tempo e, nalguns ensaios, a pressão atingiu o máximo permitido pela membrana ( $P=2,5$  bar), pelo que se terminaram os mesmos.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores de remoção de particulado e solúvel, para os ensaios realizados com as duas águas iniciais.

Nas tabelas 41 e 42 encontram-se os resultados obtidos, em termos de concentração final de partículas, bem como as condições experimentais, destes ensaios.

Tabela 41 Resultados obtidos na Ultrafiltração com água pré-filtrada

Ensaio	Água inicial (Filtrada nos Leitos de Areia)			Água Filtrada na unidade de UF				Remoção Part. (%)	Remoção M. Solúvel (%)	Condições operatórias
	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	Part. (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	Vol. Permeado (L)			
1	39,2	23,9	1,0	24,5	24,5	0,10	814	38	0	Caudal constante (300 L/h)
2	30,5	15,9	2,2	14,5	14,5	0,08	708	52	9	Pressão constante (Pe=1 bar)

Tabela 42 Resultados obtidos na Ultrafiltração com água da lagoa

Ensaio	Água inicial (Água da Lagoa)			Água Filtrada na unidade de UF				Remoção Part. (%)	Remoção Solúvel (%)	Condições operatórias
	Particulado (ppb)	M.Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	Part. (ppb)	Solúvel (ppb)	Turbidez (NTU)	Vol. Permeado (L)			
3	45,2	23,2	4,40	19,2	19,2	0,10	450	58	17	Caudal constante (225 L/h)
4	48,9	23,2	9,41	20,9	19,2	0,09	415,4	57	17	Caudal constante (277 L/h))
5	48,9	23,2	9,41	17,2	15,9	0,21	180	65	31	Caudal constante (360 L/h)
6	46,5	17,9	7,56	14,5	13,2	0,1	450	69	26	Pressão constante (Pe=1 bar)
7	46,5	17,9	7,56	15,2	13,9	0,08	336	70	22	Pressão constante (Pe=2 bar)



Nos ensaios efetuados com água da lagoa, o processo de ultrafiltração foi eficiente na remoção de particulado, tendo-se obtido percentagens de remoção entre 57 e 70%. Comparando estes valores de remoção com os valores obtidos nos ensaios em leitos mistos, concluiu-se que a ultrafiltração pode ser um processo adequado a utilizar-se na remoção de particulado.

Quanto à matéria solúvel, as percentagens de remoção dos ensaios variaram entre 17 e 31%, concluindo-se que, com a ultrafiltração, houve remoção de solúvel.

Dos 5 ensaios realizados com água da lagoa, 3 foram em condições experimentais de caudal constante. As concentrações finais, dos 2 primeiros ensaios, de particulado e solúvel, foram muito semelhantes, assim como os seus valores de remoção. O último ensaio obteve melhores resultados, tendo a concentração final de particulado sido menor que nos ensaios anteriores e a sua percentagem de remoção mais elevada.

Quanto ao volume de permeado obtido, verificou-se que, nos ensaios a caudal constante, houve uma diminuição da quantidade de água processada, à medida que se aumentava o valor do caudal de processamento.

Dos dois ensaios efetuados a pressão constante, com água da lagoa, os valores de remoção alcançados, para o particulado, foram de 69% e 70%, e para o solúvel foram de 26% e 22%.

Comparando as duas condições operacionais estudadas, concluiu-se que a ultrafiltração a pressão constante foi a melhor condição. Os valores de remoção de particulado e solúvel foram ligeiramente maiores.

Para os ensaios realizados com água filtrada nos leitos de areia, as percentagens de remoção foram muito menores que nos ensaios realizados com água da lagoa, especificamente, não houve praticamente remoção de solúvel, neste caso.

Quanto ao volume de permeado, nestes ensaios com água filtrada, passou um volume muito maior de água que nos casos anteriores. O facto de esta água já ter sido processada anteriormente, permitiu que tivesse apenas partículas sólidas residuais, pelo que o risco da membrana colmatar foi muito mais reduzido.

Em todos os ensaios realizados de ultrafiltração, a turbidez diminuiu para valores residuais, isto é, valores entre 0 e 0,2NTU.

Concluiu-se, assim, que o método de tratamento combinado, para a água da lagoa, será o mais eficiente, pois a pré-filtração nos filtros de areia permite a remoção da matéria orgânica, presente em partículas sólidas de maiores dimensões, enquanto a ultrafiltração retira também as partículas de menor dimensão, sem colmatar num curto espaço de tempo, e diminuiu a turbidez da água para valores até 0,2NTU.

## 4. Conclusões Gerais e Perspetivas de trabalho futuro

---

Sendo o azoto um dos nutrientes essenciais na proliferação de algas, a solução deste problema passa não só pela diminuição das descargas de poluentes para a água, mas também pela redução destes elementos do meio aquático, quer na sua forma particulada, quer na sua forma solúvel.

No presente trabalho, foram estudados vários métodos de tratamento, com o intuito de melhorar a qualidade da água de uma lagoa.

Dos estudos preliminares de precipitação química efetuados, concluiu-se que os coagulantes de policloreto de alumínio são os mais eficientes na redução de nutrientes, tendo reduzido estes compostos para concentrações entre 10 e 20 ppb. Contudo, a concentração residual de alumínio nas amostras de água tratadas impossibilitou o tratamento da água por precipitação química.

Os ensaios com leitos mistos nas colunas de  $d=2,5$  cm estudaram a retenção de partículas, utilizando diversos materiais como a areia, antracite e calcite.

Dos materiais estudados, a maioria conseguiu reduzir satisfatoriamente os particulados, enquanto a matéria solúvel só foi parte removida pelos materiais de granulometrias mais finas. Contudo, é importante referir que, segundo o método analítico utilizado para a análise do teor em partículas, todas as partículas com tamanhos menores que  $0,45 \mu\text{m}$  são consideradas matéria solúvel.

Estudou-se ainda, a título de exemplo, a adsorção de matéria solúvel com um leito de hidróxido de ferro, obtendo-se valores de remoção entre 30 e 50%, para a matéria solúvel.

De um modo geral, os materiais granulares estudados conseguiram reduzir a turbidez da água para valores entre 1 e 2 NTU, com exceção da calcite e antracite que, em alguns ciclos dos ensaios, originaram valores acima dos 2 NTU.

Quanto ao volume de água tratada, este parâmetro variou muito nos ensaios, mas concluiu-se existir uma tendência para se obter um volume maior de filtrado com velocidades superficiais de passagem menores, nas colunas de  $d=2,5$  cm. Contudo, nas colunas de diâmetro maior, este efeito da velocidade de passagem não teve relevância, quer no volume tratado, quer na percentagem de remoção de particulado.

Nas colunas de diâmetro  $d=5,2$  cm foram efetuados ensaios com fluxos ascendente e descendente e fizeram-se variar a velocidade superficial de passagem ao longo do ensaio, concluindo-se que o fluxo ascendente obteve resultados, em termos de remoção de particulado, ligeiramente melhores que o fluxo descendente. Além disso, apenas o ensaio com fluxo ascendente obteve concentrações de particulado abaixo do limite [3].

Nos ensaios de ultrafiltração, com água da lagoa, obtiveram-se resultados satisfatórios de remoção de particulado total (57 – 70%), de turbidez final da água (<0,20 NTU) e de volume total tratado (entre 180L – 450L).

Nos ensaios de ultrafiltração com água pré-filtrada, obtiveram-se remoções de particulado total de 38% e 52% e turbidez final da água <0,2 NTU. Quanto ao volume total processado, os valores foram de 708L e 814L.

Tendo em conta os resultados obtidos, concluiu-se que um leito misto de areia, com várias granulometrias, seria o método mais eficiente. Além disso, a filtração em fluxo ascendente seria o mais indicado, visto ter um maior aproveitamento do leito e uma colmatação mais lenta, tendo, por isso, capacidade para filtrar um volume maior de água.

Um processo integrado de filtro de areia seguido de uma unidade de ultrafiltração, com o objetivo de clarificar a água e diminuir a turbidez, para valores na ordem de 0,2NTU, também foi uma solução eficaz, contribuindo para a melhoria da qualidade da água.

A reutilização do particulado retido, a sua concentração, através de unidades de ultrafiltração, é um assunto bastante importante e que deveria ser um dos pontos importantes de trabalho futuro.

Um dos pontos fundamentais de trabalho futuro é o tratamento de “backwash” com o intuito de produzir um bolo de biomassa, rico em nutrientes e que poderia ser utilizado como fertilizante, através do desenvolvimento de um processo de desidratação, utilizando filtros de prensa. Este tratamento pode requerer uma pré-concentração dos resíduos de “backwash”, utilizando processos de sedimentação ou ultrafiltração tangencial, usando membranas tubulares de cerâmica. Este tipo de membranas pode trabalhar a temperaturas altas e pressões até 10 bar.



## 5. Referências Bibliográficas

---

- [1] Sengupta, Sukalyan., Pandit, Arka., Selective removal of phosphorus from wastewater combined with its recovery as a solid-phase fertilizer (2011)
- [3] Pereira, Luís Alberto Martins., Rodrigues, Maria Armanda Reis (2005), Avaliação do estado trófico das águas nas albufeiras da região de Lisboa e Vale do Tejo, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR – LVT);
- [4] Yin, Hongbin., Kong, Ming., Simultaneous removal of ammonium and phosphate from eutrophic waters using natural calcium rich attapulgite based versatile adsorbent (2014)
- [5] Lin, Qiu., Ping, Zheng., et all, Phosphorus removal using ferric-calcium complex as precipitant: parameters optimization and phosphorus recycling potencial (Janeiro 2015)
- [6] Strom, Peter F., Technologies to Remove Phosphorus from Wastewater, Rutgers University August 2006
- [7] Bashan, Luz., Bashan, Yoav., Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003), *Water Research* 39, 4222-4246
- [8] Morse, G. K., Brett, S. W., Guy, J. A., Lester, J. N., Phosphorus removal and recovery technologies (Review), *The Science of the total Environment* 212 (1998) 69-81
- [9] Rushton, A., Ward, A. S., Holdich, R., G., *Solid-Liquid Filtration and Separation Technology*, 2<sup>nd</sup> edition completely revised edition – Wiley-VCH (2000)
- [10] Mohammed, Sawsan A. M., Shanshool, H. A., Phosphorus Removal from water and wastewater by chemical precipitation using alum and calcium chloride, *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering* Vol. 10 No. 2, June 2008, 35-42
- [11] Cheremisinoff, Paul N., *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology*, Marcel Dekker, Inc., 1995
- [12] Carvalho, J. M. R., *Aditamento ao tratamento de águas*, 2014
- [13] Xie, Weimin., Wang, Qunhui., Ma, Hongzhi., Ohsumi, Yukihide., Ogawa, Hiroaki I., Study on phosphorus removal using a coagulation system, *Process Biochemistry* 40, 2005, 2623-2627
- [14] Metcalf, Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, 3<sup>rd</sup> edition – McGraw Hill international Editions (1991)
- [15] Van de Ven, W. J. C., van't Sant, K., Punt, I. G. M., Zwijnenburg, A., Kemperman, A. J. B., van der Meer, W. G. J., Wessling, M., Hollow fiber dead-end ultrafiltration: Influence of ionic environment on filtration of alginates, *Journal of Membrane Science* 308 (2008) 218–229.
- [16] Van de Ven, W. J. C., Punt, I. G. M., Zwijnenburg, A., Kemperman, A. J. B., van der Meer, W. G. J., Wessling, M., Hollow fiber ultrafiltration: The concept of partial backwashing, *Journal of Membrane Science* 320 (2008) 319–324

- [17] Katsoufidou, K., Yiantsios, S. G., Karabelas, A.J., Experimental study of ultrafiltration membrane fouling by sodium alginate and flux recovery by backwashing, *Journal of Membrane Science* 300 (2007) 137–146
- [19] Wang, X., Liu, F., Tan, W., Li, W., Feng, X., Sparks, D.L., “Characteristics of Phosphate Adsorption-Desorption Onto Ferrihydrite: Comparison With Well-Crystalline Fe (Hydr) Oxides”, *Soil Science Volume* 178, Number 1, January 2013.
- [20] Genz, A., Kormuller, A., Jekel, M., “Advanced phosphorus removal from membrane filtrates by adsorption on activated aluminium oxide and granulated ferric hydroxide”, *Water Research* 38 (2004) 3523–3530.
- [21] Jiang, C., Jia, L., He, Y., Zhang, B., Kirumba, G., Xie, J., “Adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution using sponge iron and zeolite”, *Journal of Colloid and Interface Science* 402 (2013) 246–252.
- [22] Yang, M., Lin, J., Zhan, Y., Zhang, H., ” Adsorption of phosphate from water on lake sediments amended amended with zirconium-modified zeolites in batch mode”, *Ecological Engineering* 71 (2014) 223–233.
- [23] Hong, Xu., Jing, Zhang., Yiming, Gao., Experiment Study on the removal of phosphorus in eutrophic water bodies by the utilization of the mineral Calcite, *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4), 138-141
- [24] Karageorgiou, Kostantinos., Paschalis, Maximos., Anastassakis, Georgois N., Removal of phosphate species from solution by adsorption onto calcite used as natural adsorbent, *Journal of Hazardous Materials* A139, 2007, 447-452
- [25] Liu, Yun., Sheng, Xia., Dong, Yuanhua., Ma, Yijie., Removal of high concentration phosphate by calcite: Effect of sulfate and pH, *Desalination* 289, 2012, 66-71
- [26] Secretaria Regional de Ambiente – Governo Açores (<http://www.azores.gov.pt/Portal/pt/entidades/?view=AZ>), 2015
- [27] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 1998, 20th Edition, American Public Health Association - American Water Works Association – Water Environment Federation, Washington DC, USA.

## Anexos

---

### Anexo I – Caracterização inicial da água da lagoa em estudo

Tabela 43 Composição inicial da água da lagoa em estudo

Parâmetro	Resultado
Alcalinidade Total	39,3 mg(CaCO <sub>3</sub> )/L
Fosfato	<0,01 mg(P)/L
Sílica	11 mg(SiO <sub>2</sub> )/L
Azoto Amoniacal	0,14 mg(N)/L
Azoto Kjeldahl	0,59 mg(N)/L
Azoto Orgânico	0,45 mg(N)/L
Azoto Total	1,6 mg(N)/L
Nitrato	1,0 mg(N)/L
Nitrito	0,005 mg(N)/L
Cálcio Total	3,5 mg/L
Magnésio Total	2,7 mg/L
Bário Total	<0,06 mg/L
Estrôncio	<0,020 mg/L
Ferro Total	<0,23 mg/L

Tabela 44 Concentração inicial de particulado e matéria solúvel, da água da lagoa

<b>Data de análise</b>	<b>Fósf. Total (ppb)</b>	<b>Fósf. Solúvel (ppb)</b>
<b>28/mai/14</b>	64,2	23,9
<b>30/mai/14</b>	80,6	17
<b>4/jun/14</b>	84,5	17
<b>20/jun/14</b>	71,2	16,7
<b>9/jul/14</b>	97,7	18,7
<b>23/jul/14</b>	82,8	21,7
<b>30/jul/14</b>	80,6	17,8
<b>22/set/14</b>	38	17
<b>15/out/14</b>	115,9	46,5
<b>30/out/14</b>	159,9	48,5
<b>4/nov/14</b>	135,9	48,5
<b>7/nov/14</b>	71,9	22,5
<b>12/nov/14</b>	68,5	19
<b>17/nov/14</b>	136,5	72,5
<b>19/nov/14</b>	147,2	77,9
<b>24/nov/14</b>	109,9	75,2
<b>25/nov/14</b>	96,5	71,9
<b>1/dez/14</b>	89,9	64,5
<b>10/dez/14</b>	65,2	19,6



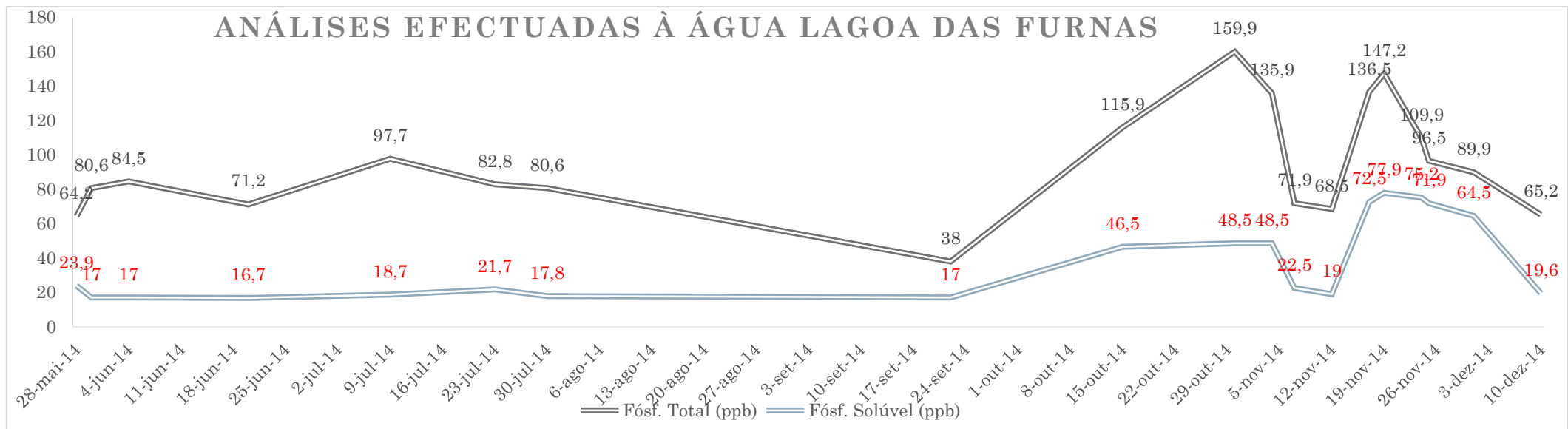


Figura 25 Concentração inicial de particulado e matéria solúvel da água da lagoa ao longo do tempo

## Anexo II – Retas de Calibração para a determinação do teor de nutrientes na água

Para a determinação do teor de nutrientes na água da lagoa, é necessário elaborar uma reta de calibração. A reta de calibração, utilizada durante os ensaios, foi calculada segundo o método do Standard Methods [27]

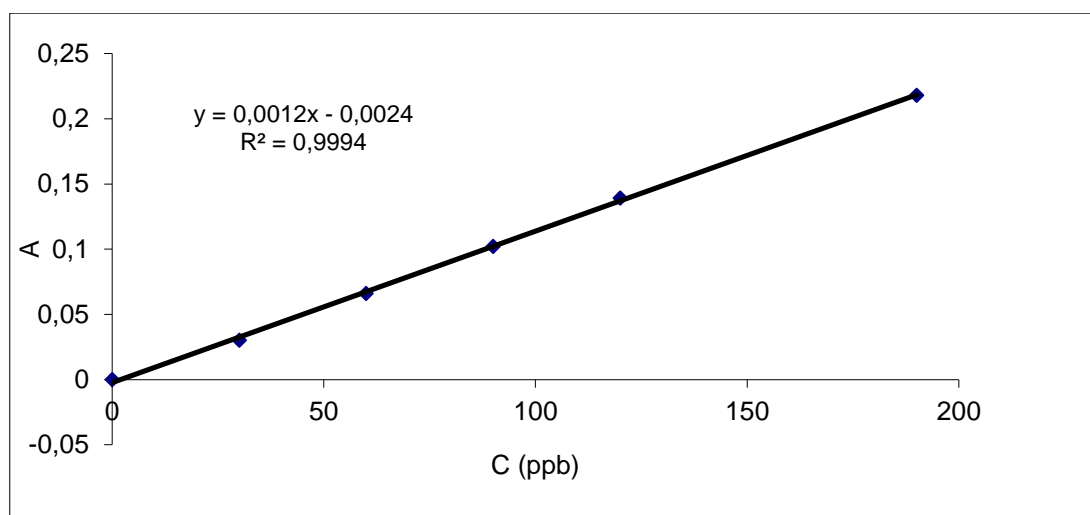


Figura 26 Reta de Calibração para a determinação do teor de nutrientes

## Anexo III – Retas de Calibração para a determinação do teor de Alumínio na água

Na determinação do teor de alumínio na água, é necessário efetuar uma reta de calibração, no início de cada análise.

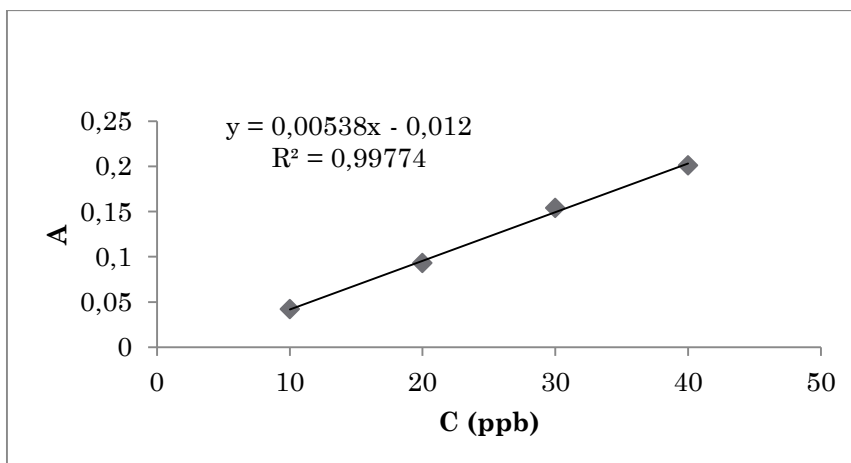


Figura 27 Reta de Calibração para a determinação do teor de Alumínio na água – 03/09/2014

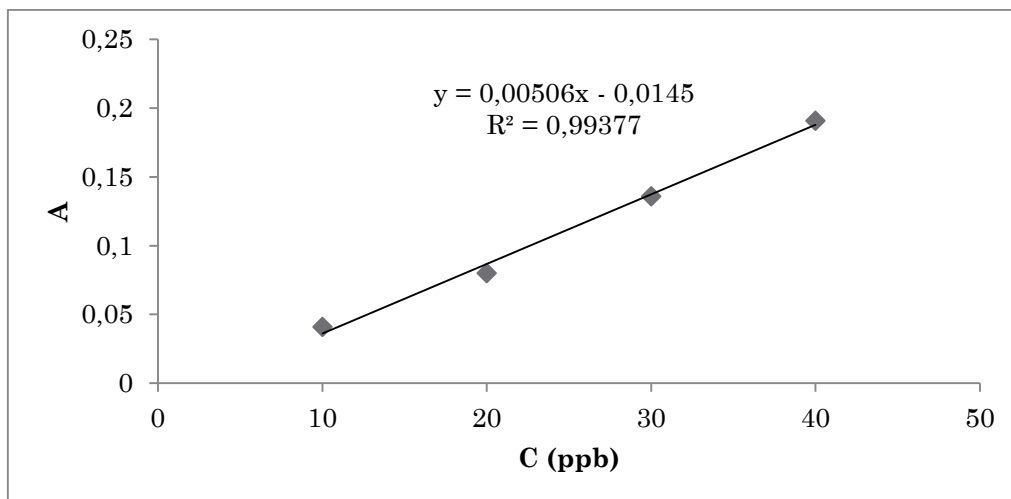


Figura 28 Reta de Calibração para a determinação do teor de alumínio na água - 04/09/2014

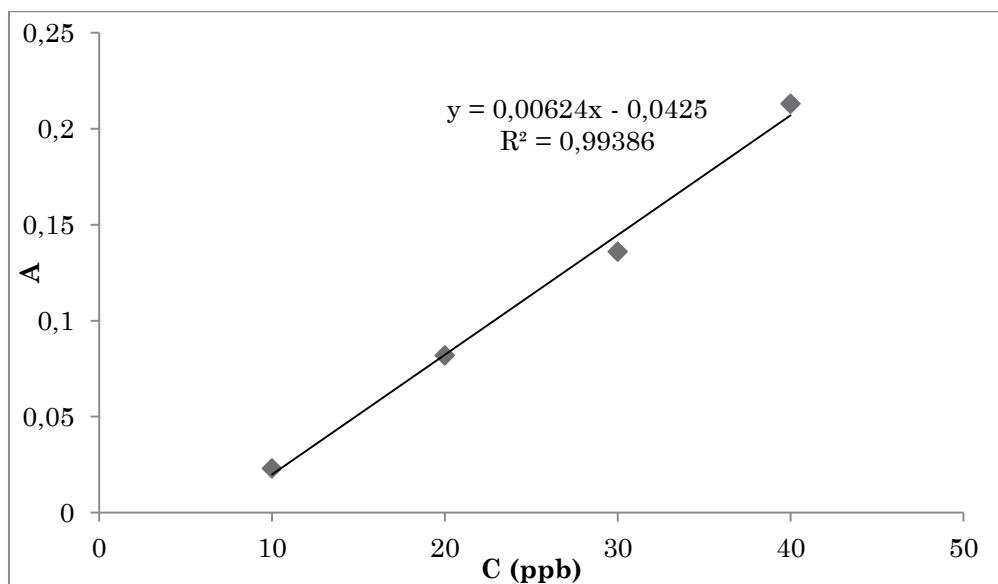


Figura 29 Reta de Calibração para a determinação do teor de alumínio na água - 05/09/2014

## Anexo IV – Especificações da Membrana de Ultrafiltração

- Modelo UF 100 XL S2 M 193
- Diâmetro externo das fibras: 0,72 mm
- Área de membrana: 6 m<sup>2</sup>
- Diâmetro do módulo: 75 mm
- Altura do módulo: 907,5 mm
- Fluxo com água pura: 780 l/h.bar
- Pressão transmembranar máxima: 3 bar
- Material da membrana: Polissulfona
- Temperatura máxima: 35°C
- Gama de pH: 2-12

## Anexo V – Técnicas Experimentais para a medição da porosidade e peneiração dos materiais

### Peneiração

A peneiração dos materiais filtrantes foi efetuada com os peneiros, com malhas entre 0,4 mm e 2,80 mm.

Para classificar os materiais quanto à sua granulometria, pesou-se uma certa quantidade de material e os peneiros vazios. De seguida, colocou-se o material pesado no peneiro com maior malha e procedeu-se à peneiração, durante 15 minutos. No final, pesou-se novamente os peneiros e registou-se os valores. Colocou-se novamente os peneiros no equipamento durante 15 minutos, pesando-os no final. Repetiu-se este procedimento até que os valores de massa dos peneiros fossem constantes.

### Porosidade

A porosidade dos materiais estudados foi determinada seguindo o seguinte procedimento: primeiro, pesou-se uma certa massa de material, colocou-se esse material numa proveta e anotou-se o volume que ocupava; depois encheu-se uma segunda proveta com água destilada e anotou-se o seu volume. Por fim, preencheu-se o volume de sólidos com a água destilada e anotou-se o volume de água que restou na segunda proveta.

A porosidade foi calculada pelo quociente entre o volume de vazios (diferença entre os volumes de água) e o volume total (volume de sólidos).

## Anexo VI – Cálculos para a obtenção dos valores médios de remoção de particulado.

Para o cálculo dos valores médios de remoção, particulado e solúvel, foram eliminados os valores obtidos da primeira e últimas amostras.

A título de exemplo, para o Ensaio 1 com leitos de areia grossa:

Tabela 45 Valores obtidos para a remoção de particulado e matéria solúvel com leitos de areia grossa - Ensaio 1

Entrada F.Total (ppb)	Saída F.Total (ppb)	%Remoção	Entrada F.Solúvel (ppb)	Saída F.Solúvel (ppb)	%Remoção	V acumulado (L)
80,6	24,8	0,69230769	17	12,6	0,25882353	3
80,6	27,6	0,65756824	17	13,4	0,21176471	6
80,6	25,3	0,68610422	17	16,7	0,01764706	9
84,5	24,2	0,71360947	17	17,6	-0,0352941	12
84,5	20,9	0,75266272	17	13,4	0,21176471	15
84,5	21,2	0,74911243	17	9,8	0,42352941	18
71,2	18,9	0,73455056	16,7	6,2	0,62874251	21
71,2	17	0,76123596	16,7	7,6	0,54491018	22,2
71,2	30,5	0,57162921	16,7	26,2	-0,5688623	2
71,2	26,2	0,63202247	16,7	16,7	0	4
71,2	22,3	0,68679775	16,7	15,1	0,09580838	6
71,2	19,8	0,72191011	16,7	16,7	0	8
71,2	25,1	0,64747191	16,7	19,2	-0,1497006	10
71,2	25,05	0,64817416	16,7	16,7	0	12
71,2	22	0,69101124	16,7	15,8	0,05389222	14
71,2	27	0,62078652	16,7	14,8	0,11377246	15,7
71,2	22,8	0,67977528	16,7	11,7	0,2994012	1

Assim, a percentagem de remoção é calculada em cada ponto do ensaio, através da equação 3.

$$\frac{\text{Entrada de Fósforo} - \text{Saída de Fósforo}}{\text{Entrada de Fósforo}} \times 100 \quad (3)$$

De seguida, faz-se a média dos valores de remoção obtidos em cada ponto do ensaio, utilizando a função Média, da folha de cálculo *Excel*.

