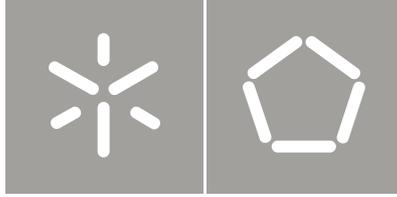




Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Luís Pinto Leite Quaresma

Estudo experimental do desempenho  
de um sistema coagulação / filtração de água



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Luís Pinto Leite Quaresma

Estudo experimental do desempenho  
de um sistema coagulação / filtração de água

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Júlio F. Ferreira da Silva

## **Agradecimentos**

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos aos seguintes:

Ao Professor Doutor Júlio F. Ferreira da Silva, meu orientador, pela sabedoria, paciência e incentivo.

Ao Sr. Rui Oliveira do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil pela ajuda que me proporcionou.

À Engenheira Luísa Faria e Engenheiro Nuno Brandão por toda a ajuda fornecida.

À Ashland na pessoa do Sr. Pedro Henriques pela cedência dos materiais e orientação da sua utilização.

À minha família por todo o apoio e ajuda que sempre me deram.



## RESUMO

Esta dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento de estudos experimentais sobre o desempenho de um sistema de coagulação / filtração no tratamento de água. Para melhor conhecer a realidade, foram utilizados alguns coagulantes existentes no mercado (sulfato de alumínio, polímeros orgânicos, inorgânicos e misturas de ambos), totalizando 9 coagulantes diferentes.

O sulfato de alumínio é o coagulante mais utilizado no mercado devido à sua eficiência de coagulação, fácil manuseamento e transporte, e baixos custos.

Os ensaios foram realizados utilizando um aparelho de “*Jar-Test*”, fazendo variar numa 1ª fase as dosagens de coagulante, assim como os tempos de mistura. Numa 2ª fase foi variada a dosagem do coagulante e a turvação inicial da água.

Após cada experiência, a água era filtrada e de imediato eram medidos os valores dos parâmetros indicadores de qualidade analisados.

Foi desta maneira possível examinar o desempenho dos diversos coagulantes face a diferentes turvações da água bruta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Saúde pública; Tratamento de Água; Coagulação/Floculação; filtros de areia; coagulantes orgânicos e sulfato de alumínio.



## **ABSTRACT**

This dissertation aimed to the development of experimental studies on the performance of a system of coagulation / filtration in water treatment. To better know the reality, coagulants available in the general market (aluminium sulphate, organic polymers, inorganic and mixtures thereof) were used, in a total of nine different coagulants.

Aluminium sulfate is the most commonly used coagulant due to its coagulation efficiency, ease of handling and transport, and low cost.

The tests were conducted using a "*Jar-Test*" apparatus and varying in a 1<sup>st</sup> stage the coagulant dosages, as well as mixing times. In the 2<sup>nd</sup> Stage, coagulant dosage and the initial turbidity of the water were varied. After each experiment, the water was filter and the values of the quality of the water parameters were measured.

This made possible to assess the ability of various coagulants using different raw water turbidities.

**KEYWORDS:** Public health, water treatment, coagulation / flocculation, sand filters, organic coagulants and aluminium sulphate



## INDICE

RESUMO .....	V
ABSTRACT .....	VII
INDICE DE FIGURAS .....	XIII
INDICE DE QUADROS.....	XIV
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Organização da dissertação.....	2
2 DESCRIÇÃO DOS FUNDAMENTOS DA COAGULAÇÃO E DA FILTRAÇÃO DE ÁGUA .....	3
2.1 Impurezas presentes na água.....	3
2.2 Coagulação.....	3
2.3 Processo de Coagulação / Flocculação .....	3
2.4 Mecanismos de coagulação.....	6
2.4.1 Compressão da dupla camada .....	6
2.4.2 Adsorção-Neutralização de cargas .....	7
2.4.3 Arrastamento .....	7
2.4.4 Adsorção-Formação de pontes .....	7
2.5 Fatores que influenciam o processo de Coagulação / Flocculação.....	8
2.6 Tipos de Coagulantes.....	10
2.6.1 Sulfato de alumínio.....	10
2.6.2 Coagulantes Orgânicos .....	11
2.7 Filtração Direta .....	12
2.7.1 Filtração Rápida.....	12

2.7.2	Mecanismos Atuantes .....	13
2.7.3	Características do meio filtrante .....	14
2.7.4	Fatores que influenciam a qualidade da água à saída do filtro .....	15
2.7.5	Tipos de Filtração utilizados .....	18
2.7.6	Controlo dos filtros .....	21
2.8	Microtamisação .....	23
3	REVISÃO DO ESTADO DE ARTE .....	24
4	METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO .....	27
4.1	Introdução.....	27
4.2	Material e equipamento utilizados .....	27
4.3	Desenvolvimento Experimental: Estudo de bancada .....	28
4.4	Ensaios.....	29
4.4.1	Preparação da água bruta .....	29
4.4.2	Ensaios de coagulação/floculação no <i>Jar-Test</i> .....	31
4.4.3	Filtros de areia descendentes.....	32
4.4.4	Lavagem de filtros entre experiências .....	33
4.4.5	Medições Complementares para Sulfato de alumínio.....	34
4.4.6	Medição dos parâmetros .....	35
4.5	Condições da experiência.....	37
5	RESULTADOS E SUA DISCUSSÃO .....	38
5.1	Descrição geral.....	38
5.2	Coagulantes Utilizados.....	38
5.3	Resultados obtidos.....	39
5.3.1	1ª Fase Experimental.....	40
5.3.2	2ª Fase Experimental.....	47
5.3.3	Alumínio Remanescente .....	51
6	CONCLUSÕES.....	53
6.1	Considerações Finais.....	53

6.2 Possíveis trabalhos futuros.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
LISTA DE SITES CONSULTADOS .....	63
ANEXOS.....	64
Anexo A – Análise granulométrica da areia usada.....	65
Anexo B – Registos das experiências .....	67



## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de tratamento de água para consumo (Di Bernardo 1995) .....	4
Figura 2.2 - Distribuição do tamanho das partículas presentes na água (CEPIS 1973) .....	5
Figura 2.3 - Diagrama típico de coagulação com sulfato de alumínio e potencial zeta – água de turvação alta em relação à cor verdadeira – Amirtharajah e Mills, 1982, (traduzido por Di Bernardo e Dantas, 2005a) .....	8
Figura 2.4 - Etapas da filtração com taxa constante (Di Bernardo 2005) .....	17
Figura 2.5 - Etapa inicial da filtração descendente (Di Bernardo 2005) .....	17
Figura 2.6 - Esquema de funcionamento de um filtro ascendente com calha única (Di Bernardo 2003).....	19
Figura 4.1 - <i>Jar-Test</i> e filtros.....	28
Figura 4.2 - Local da recolha de amostras na Ribeira de Santa Luzia, Azurém, Guimarães. ..	29
Figura 4.3 - Agitador mecânico (esq.) e Turbidímetro Hach (dir.) .....	30
Figura 4.4 - Leitura da Condutividade e OD e %OD (esq.) e leitura de pH e temperatura (dir.) .....	31
Figura 4.7 - Esquema do filtro de areia .....	32
Figura 4.8 - Bomba utilizada no processo da retro lavagem .....	33
Figura 4.9 - Filtro de areia com tampa de retenção de finos .....	34
Figura 4.10 - Fotómetro utilizado para a medição do alumínio .....	35
Figura 5.1– Remoção da turvação (%), com sulfato de alumínio para o tempo de mistura T1	43
Figura 5.2 – Remoção da turvação (%), com sulfato de alumínio para o tempo de mistura T2 .....	43
Figura 5.3 – Remoção da turvação para coagulantes polímeros com o tempo de mistura T1 .	44
Figura 5.4 – Remoção da turvação para coagulantes polímeros com o tempo de mistura T2 .	45
Figura 5.5 – Remoção da turvação (%), utilizando o sulfato de alumínio para a turvação entre 10 a 15 NTU .....	48
Figura 5.6 – Remoção da turvação (%), utilizando o sulfato de alumínio para a turvação entre 35 a 40 NTU .....	49
Figura 5.7 – Remoção da turvação (%), utilizando os coagulantes polímeros para a turvação entre 10 a 15 NTU .....	49

Figura 5.8 – Remoção da turvação (%), utilizando os coagulantes polímeros para a turvação entre 35 a 40 NTU .....	50
---	----

## **INDICE DE QUADROS**

Quadro 5.1- Características dos Coagulantes .....	39
Quadro 5.2 - Eficiência da filtração na remoção da turvação da água bruta .....	41
Quadro 5.3- Valores recomendados de caudal retirado de Di Bernardo <i>et al.</i> (2000).....	41
Quadro 5.4 - Determinação do caudal médio .....	41
Quadro 5.5 - Eficiência da remoção da turvação (%) para o tempo de mistura T1 .....	42
Quadro 5.6 – Eficiência da remoção da turvação (%) para o tempo de mistura T2 .....	42
Quadro 5.7 – Valor mediana para a % da remoção de turvação para o T1.....	46
Quadro 5.8 – Valor mediana para a % da remoção de turvação para o T2.....	46
Quadro 5.9 – Eficiência da remoção da turvação (%) para turvação entre 10 a 15 NTU.....	47
Quadro 5.10 – Eficiência da remoção da turvação (%) para turvação entre 35 a 40 NTU.....	48
Quadro 5.11 – Registo das medições de alumínio remanescente .....	51
Quadro 5.12 – Resumo da remoção da turvação .....	52

# 1 INTRODUÇÃO

A água é um bem essencial à vida humana e a sua qualidade é uma preocupação que sempre se colocou. Nos nossos dias, e apesar da maior consciencialização pela preservação do meio ambiente existente, a poluição e o seu efeito nas mudanças climáticas têm vindo a condicionar os recursos hídricos disponíveis. Apesar de um aumento de qualidade da água na bacia hidrográfica do Ave, devido à diminuição de descargas poluentes aí efetuadas, o problema mantém-se e hoje em dia é tão ou mais importante utilizar métodos eficientes de tratamento de águas e se possível reduzir custos.

Uma das fases iniciais do tratamento da água numa estação de tratamento de água (ETA) é a coagulação química. Sendo este processo um dos mais importantes do tratamento, se não ocorrer de forma eficiente pode influenciar todo o tratamento, levando até ao desperdício de toda a água. Devido às consequências daí inerentes, é de extrema importância estudar de forma exaustiva o processo de coagulação.

Tem-se vindo a verificar um aumento dos estudos sobre a coagulação/floculação, permitindo assim um acréscimo de conhecimento sobre a mecânica da mistura e floculação, os filtros rápidos, a decantação, o emprego de reagentes auxiliares, técnicas laboratoriais e de controlo. Tudo isso tem registado um aumento de qualidade nos tratamentos de água superficial, mostrando-se bastante eficaz na remoção da turvação, cor e matéria orgânica.

O sulfato de alumínio tem sido o coagulante mais utilizado no tratamento de água, devido à sua facilidade de manuseamento e transporte, baixo custo e boa eficiência. Apesar das vantagens inúmeradas, tem também desvantagens, como só efetuar uma coagulação eficiente para uma determinada gama de pH e o facto de poder deixar resíduos de alumínio no final do tratamento.

Devido às desvantagens apresentadas é importante o conhecimento aprofundado de outros tipos de coagulantes, os coagulantes polímeros que têm vindo a evoluir e, de acordo com algumas publicações, estão a atingir melhores resultados no tratamento da água.

## **1.1 Objetivos**

Nesta dissertação vai comprovar-se a eficiência do sistema coagulação/filtração direta utilizando coagulantes polímeros disponíveis no mercado, em comparação com o coagulante mais utilizado de momento, o sulfato de alumínio.

Os principais objetivos que orientaram esta dissertação foram:

1. Estudo do desempenho de vários coagulantes no tratamento de amostras de água recolhidas na Ribeira de Santa Luzia, Azurém, Guimarães;
2. Estudo da eficácia da coagulação para tempos de mistura diferentes;
3. Estudo da eficácia da coagulação para águas brutas de diferentes turvações;
4. Estudo da eficácia na remoção de alumínio remanescente após o tratamento com o sistema de coagulação/filtração utilizando o sulfato de alumínio.

## **1.2 Organização da dissertação**

A seguir a esta introdução far-se-á a descrição dos fenómenos objeto dos estudos desenvolvidos. Inicialmente no capítulo 2 apresentar-se-á a descrição dos fundamentos da coagulação e da filtração de água. No capítulo 3 encontrar-se-á a revisão de literatura, onde serão dispostos os últimos trabalhos sobre o tema. No capítulo 4 teremos a metodologia de investigação, onde será explicada a metodologia aplicada no decurso dos trabalhos. No capítulo 5 mostram-se os resultados obtidos e faz-se a respetiva discussão. No sexto e último capítulo serão apresentadas as conclusões do estudo desenvolvido, assim como os possíveis trabalhos futuros de desenvolvimento sobre o tema.

## **2 DESCRIÇÃO DOS FUNDAMENTOS DA COAGULAÇÃO E DA FILTRAÇÃO DE ÁGUA**

### **2.1 Impurezas presentes na água**

Na natureza, a água é uma substância muito heterogênea, contendo vários compostos de diferentes origens, formatos e dimensões. As impurezas presentes na água podem ser classificadas sob várias categorias, como físicas (coloidais, em suspensão e dissolvidas), ou químicas, que se dividem em substâncias orgânicas (microrganismos, algas ou bactérias) e inorgânicas (silte, argila, etc.).

### **2.2 Coagulação**

Tem por finalidade transformar as impurezas finais que se encontram em suspensão, em estado coloidal e algumas que se encontram dissolvidas, em aglomerados de partículas que possam ser removidas pela decantação e filtração. Para isto, adiciona-se à água bruta uma substância química, denominada coagulante, que reagindo com a alcalinidade da água, forma, entre outros, produto insolúvel destinado a remover as impurezas responsáveis pela cor, turvação, bem como bactérias, vírus e outros elementos considerados indesejáveis.

### **2.3 Processo de Coagulação / Floculação**

Existem muitos métodos para se obter uma água própria para consumo. Estes métodos estão porém dependentes da água bruta existente, podendo ser mais ou menos complicados de realizar e tendo custos também variáveis, conforme as necessidades. Temos na figura 2.1 um quadro resumo dos principais tipos de tratamento atualmente utilizados.

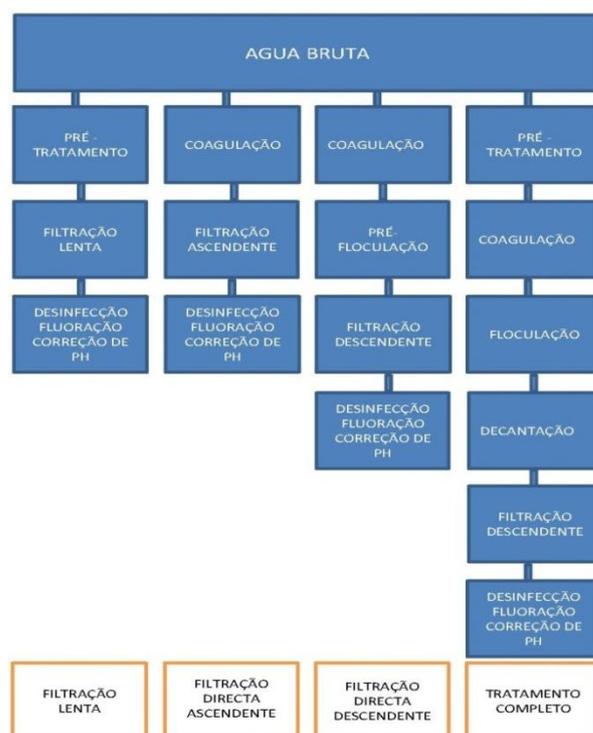


Figura 2.1 - Tipos de tratamento de água para consumo (Di Bernardo, 1995)

Como se pode observar no quadro anterior, apenas o tratamento por filtração lenta carece de coagulação. Em captações de água onde não se registem picos de turvação, principalmente nas épocas de chuva, poderá utilizar-se o sistema de tratamento de água por filtração direta.

Noutros locais em que a água bruta tenha variações de turvação elevadas, deverá utilizar-se o tratamento completo (Pavanelli, 2001).

As partículas coloidais, por exemplo, presentes em grandes quantidades, variam de dimensão, na ordem dos  $10^{-6}$  e os  $10^{-3}$ mm. Estas partículas, e outras como elas, têm normalmente uma carga superficial negativa, provocando uma força repulsiva entre elas que impede a sua aproximação e dificultando a sua aglutinação. Tudo isto aumenta as dificuldades de separação das partículas sólidas do meio líquido. Necessitamos então da coagulação, processo pelo qual se consegue promover a aproximação das partículas e a sua aglutinação.

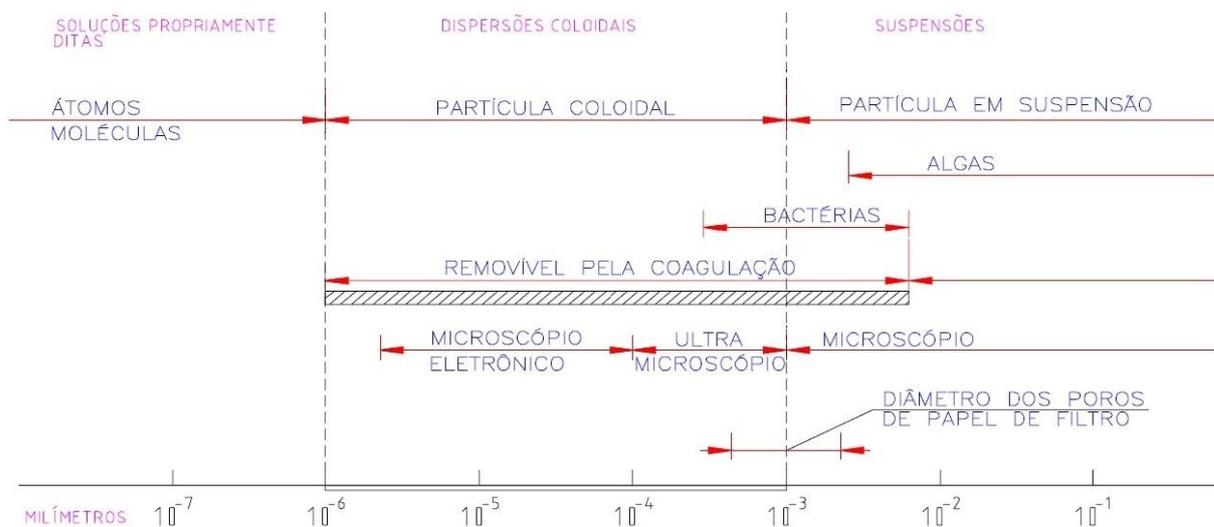


Figura 2.2 - Distribuição do tamanho das partículas presentes na água (CEPIS 1973)

Temos então que a coagulação consiste num processo químico que recorre à adição de um coagulante à água bruta. Este vai originar espécies hidrolisadas que reagem quimicamente com as impurezas ou atuam sobre as superfícies delas, aumentando o contacto entre elas, e facilitando a sua posterior remoção (Di Bernardo, 2003). Normalmente numa ETA utilizam-se coagulantes, tais como sais de alumínio ou ferro e polímeros, que devem ser utilizados em quantidades e condições adequadas, de modo a promover a desestabilização das partículas, que posteriormente serão agregadas, num processo chamado floculação, que origina flocos de partículas maiores, e já capazes de serem removidos do meio líquido. A coagulação é um processo rápido que pode ir de décimas de segundo até cerca de 100 segundos e toma parte na mistura rápida. Seguidamente é necessária a mistura lenta que promove a floculação, criando os choques entre partículas, e originando os flocos, que podem ser removidos através de várias técnicas como a sedimentação, flotação ou filtração rápida.

Este processo de coagulação-floculação é geralmente aplicado no tratamento de águas para:

- Remover turvação;
- Remover cor verdadeira e cor aparente;
- Eliminar populações bacterianas, virais e outros microrganismos de natureza patogénica;
- Eliminar parcialmente substâncias com características organoléticas como gosto e cheiro;

- Remover metais pesados, fosfatos, algas e organismos planctónicos (Almeida, 2007).

## **2.4 Mecanismos de coagulação**

Na literatura são citados quatro mecanismos de coagulação: compressão da dupla camada, adsorção-neutralização de cargas, arrastamento e adsorção-formação de pontes (Di Bernardo, 2003).

### **2.4.1 Compressão da dupla camada**

Este mecanismo propicia a desestabilização de partículas através da adição de iões de carga contrária. Segundo Di Bernardo, (1993), já em 1900 Schulze e Hardy, haviam comprovado que quanto maior for a carga iões positivos, menor quantidade será necessária de coagulante.

As partículas coloidais adquirem maioritariamente, uma carga elétrica superficial quando em contacto com o meio dispersante, podendo essas cargas ser criadas por mecanismos de adsorção ou ionização (ácida) entre partículas e a solução aquosa. A carga superficial gerada entre o meio aquoso e a superfície coloidal varia, tendo uma grande influência na distribuição dos iões presentes nas proximidades.

Como as suspensões coloidais possuem, na sua maioria carga negativa, atraem a si iões de carga contrária (iões positivos). Porém, devido à reduzida superfície das partículas, apenas um número limitado de iões são adsorvidos. Esta adsorção forma a camada rígida em volta da partícula – Camada de Stern, e separando-a do meio circundante (AWWA, 1999).

A definição do mecanismo predominante depende de vários fatores como o pH da coagulação, a dosagem do coagulante, a intensidade da agitação e as características da água bruta tais como, alcalinidade, turvação, cor, sólidos suspensos, oxigénio dissolvido, condutividade, tamanho das partículas, entre outras (Di Bernardo, 2003).

## 2.4.2 Adsorção-Neutralização de cargas

Neste mecanismo os precipitados e cátions carregados positivamente serão adsorvidos na superfície dos coloides. Reduzindo assim, a repulsão entre partículas, possibilitando a sua coagulação e remoção por sedimentação/flotação ou filtração (Gonçalves *et al*, 1997).

O mecanismo de adsorção e neutralização de carga é de extrema importância quando o tratamento é realizado por meio de uma das tecnologias da filtração direta, pois não há necessidade de produção de flocos para posterior sedimentação ou flotação, mas de partículas desestabilizadas que serão retidas no meio granular (Cleasby, 1990; Di Bernardo e Dantas, 2005a, entre outros).

## 2.4.3 Arrastamento

O mecanismo de arrastamento é caracterizado pela utilização de grandes quantidades de coagulante, suficientes para a formação de precipitado de hidróxido de alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ou de ferro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), quando são utilizados sais destes metais como coagulante, sendo adequado para ETA com unidades de decantação ou de flotação, pois este mecanismo possibilita a formação de flocos maiores, facilitando a sua sedimentação ou flotação (Di Bernardo, 2003).

## 2.4.4 Adsorção-Formação de pontes

Este mecanismo envolve o uso de polímeros de grandes cadeias moleculares, os quais servem de ponte entre a superfície à qual estão aderidos e outras partículas (Di Bernardo e Dantas, 2005), promovendo assim a formação de pontes de hidrogênio entre o coagulante e o coloide.

Com o aumento do conhecimento dos mecanismos de coagulação, foi possível criar diagramas correlacionando a eficiência da coagulação com a dosagem de sulfato de alumínio, tornando-se uma ferramenta de grande utilidade para quem faz o tratamento da água, podendo-se prever as eficiências de remoção de cor e turvação para águas com diferentes pH de coagulação e dosagens de sulfato de alumínio (Gonçalves *et al*, 1997).

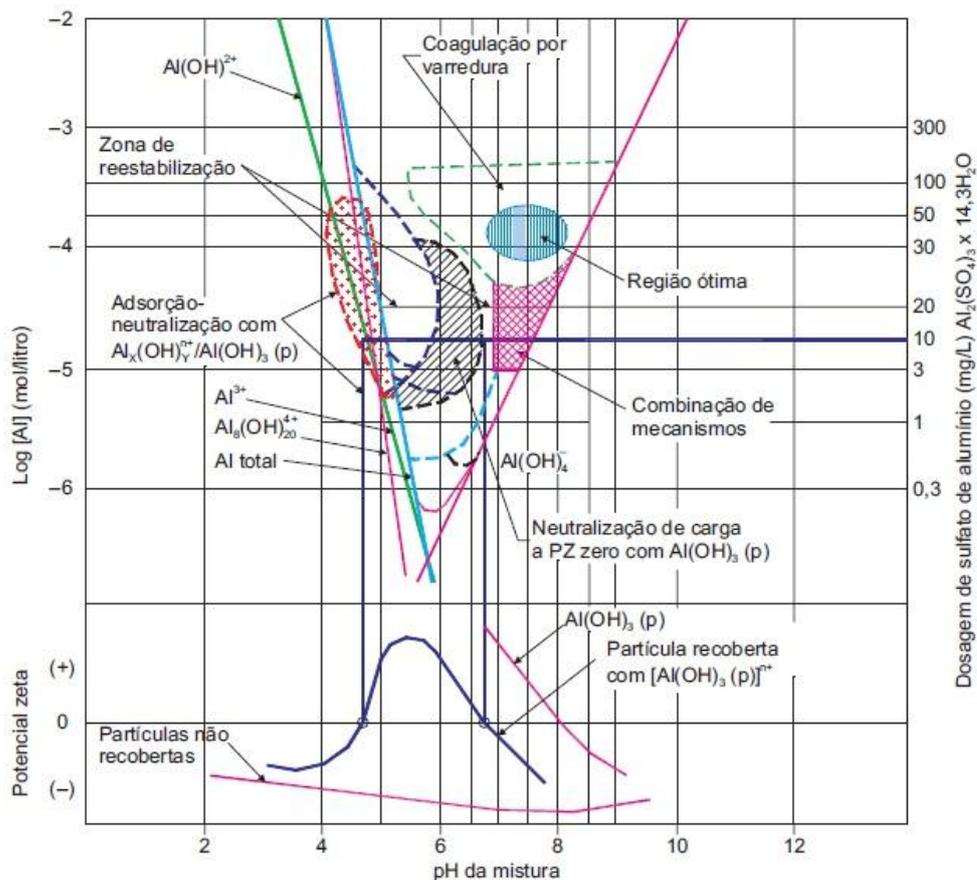


Figura 2.3 - Diagrama típico de coagulação com sulfato de alumínio e potencial zeta – água de turvação alta em relação à cor verdadeira – Amirtharajah e Mills, 1982, (traduzido por Di Bernardo e Dantas, 2005a)

Através da análise do gráfico anterior podemos facilmente ver as faixas em que o coagulante funciona melhor, assim como as zonas de reestabilização, que resulta da adição excessiva de coagulante quando predomina o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas.

## 2.5 Fatores que influenciam o processo de Coagulação / Floculação

- Turvação

Este consiste no grau de redução que a luz sofre ao atravessar uma certa quantidade de água, devido à presença de partículas e substância que esta possa conter (Pavanelli, 2001).

A água tem uma grande variação de dimensão e natureza de partículas que a constituem.

De forma geral quanto maior for a turvação existente, maior será a quantidade necessária de coagulantes de modo a promover uma eficaz agregação das partículas. Porém, do ponto de vista de solução ótima, já não é respeitado um padrão de adição linear, visto que em águas com grande quantidade de partículas, ou seja, com turvações elevadas, registou-se ser necessário menores quantidades de coagulante uma vez que existe maior probabilidade de choque entre as partículas (Trindade e Manuel, 2006).

- Temperatura

Para valores baixos de temperatura a homogeneização dos coagulantes é dificultada assim como a velocidade das reações diminui bastante. Estes factos resultam numa menor eficiência do processo de Coagulação/Floculação, existindo a necessidade de aplicação de maior quantidade de coagulantes. Acresce também que devido ao aumento da densidade da água com as baixas temperaturas, dificulta a floculação das partículas (Pavanelli, 2001).

- PH

De modo a obter os melhores resultados no processo de coagulação/floculação, um dos parâmetros mais importantes é o pH. Este deve estar na gama ótima do coagulante para manter alta a eficiência do processo, podendo gerar, caso não aconteça, gastos maiores e uma fraca qualidade do clarificado (Silva, 2010).

- Alcalinidade

Consiste na capacidade que a água possui de neutralizar os ácidos. Como a adição da maioria dos coagulantes atua como acidificante, vai consumir alcalinidade da solução, diminuindo o valor de pH (Brum, 2005).

- Gradiente e tempo de mistura

O processo de coagulação/floculação divide-se em duas fases. Numa primeira fase, temos a agitação rápida em que se promove o choque entre as partículas. Nesta fase é adicionado o coagulante, de modo a promover um espalhamento mais homogéneo da mistura. Na segunda fase, temos a mistura lenta, que proporciona a agregação das partículas formando flocos maiores e mais fáceis de ficarem retidos nos filtros.

Neste momento ainda não há dados concretos relativamente a tempos e velocidades ideais de mistura, sendo necessária uma avaliação caso a caso, sendo consensual que o contacto não

deverá ser muito prolongado e que a mistura rápida necessita de períodos muito inferiores aos da mistura lenta (Silva, 2010).

Poderá dizer-se também que as velocidades de agitação não deverão ser muito reduzidas, uma vez que vai dificultar a formação dos flocos, nem demasiado rápidas pois poderá desagregar em demasia as partículas, dificultando posteriormente a sua agregação.

- Natureza e dosagem do coagulante

É vital a importância da escolha do coagulante a utilizar. Os mais utilizados hoje em dia derivam de substâncias como o ferro ou o alumínio, como o cloreto férrico ou o sulfato de alumínio.

## 2.6 Tipos de Coagulantes

### 2.6.1 Sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio é provavelmente, a substância química mais amplamente utilizada para coagulação dos suprimentos públicos de água, devido à excelente formação do floco, o seu baixo custo, facilidade de transporte e de manuseamento. O pH utilizado no processo de coagulação com sulfato de alumínio é de 5,0 a 8,0 (Corbitt, 1998). É bastante eficiente na remoção da cor, turvação,  $\text{CBO}_5$  e CQO, diminuindo estas concentrações em 43%. (Fiekja (1995 apud Silva, 1999, p. 29) e Bessa (1997 apud Silva, 1999, p. 29).

É um reagente que pode ser utilizado no estado sólido ou em soluções concentradas. De cor branca-acinzentada, contém aproximadamente 17% de óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) solúveis em água.

Para valores de pH inferiores ou iguais a 5,0, as formas predominantes do alumínio na água são os monómeros  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  e  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O}_5)(\text{OH})^{2+}$ , e o dímero  $\text{Al}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$ . Para a gama de valores de pH entre 5,0 e 6,5 predominam os compostos poliméricos ( $\text{Al}_3(\text{OH})_{34}^{5+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$  entre outros), resultantes do mecanismo de adsorção com neutralização de carga. Quando o valor de pH é superior a 6,5 ocorre a formação de um coloide de carga positiva (hidróxido  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3$  (sólido)), capaz de promover a coagulação mútua dos coloides de carga negativa que predominam em solução (Guedes *et al*, 2004).

Embora se observe um elevado grau de remoção de partículas coloidais com a aplicação do sulfato de alumínio, é de ponderar o facto de a sua utilização causar um aumento de concentração de alumínio no produto final, gerando grandes volumes de lama (em relação aos demais coagulantes), para além de acentuar o grau de acidez da água residual tratada, em virtude dos processos de hidrólise envolvidos. O alumínio dissolvido na água tratada pode produzir efeitos tóxicos nefastos em seres vivos (Carvalho, 2005).

## 2.6.2 Coagulantes Orgânicos

Por coagulantes orgânicos entende-se todos os polímeros orgânicos, de natureza sintética ou natural, que são aplicados de forma alternativa aos coagulantes inorgânicos. Estes polímeros atuam como agentes de coagulação e/ou de floculação, por formação de pontes de ligação entre as partículas coloidais, levando à formação de aglomerados de maior decantabilidade (Guedes *et al*, 2004). Trata-se de macromoléculas solúveis em água (Silva 2010).

- Polímeros orgânicos sintéticos

Os polímeros sintéticos são substâncias químicas orgânicas de cadeia longa e de elevada massa molecular, estando disponíveis sob uma variedade de nomes comerciais. Alguns exemplos de polímeros sintéticos utilizados no tratamento de efluentes industriais e de água para consumo humano são o óxido de polietileno, o álcool polivinílico e o polietilenoimina (Letterman e Pero, 1990).

- Polímeros orgânicos naturais

Os polímeros naturais, também designados por biocoloides, compreendem compostos orgânicos contendo centros ativos ionizáveis, tais como o amido e seus derivados, compostos de celulose, gomas de polissacarídeos e proteínas, podendo ser aplicados quer como coagulantes primários, quer como adjuvantes no processo de coagulação (Guedes *et al*, 2004).

## 2.7 Filtração Direta

A filtração direta é usada para o tratamento de água para abastecimento público. Consiste na adição de coagulante, mistura rápida, floculação e filtração. A grande diferença relativamente ao tratamento convencional é a ausência de um processo de separação, como a sedimentação ou flotação, entre a adição de coagulante e a filtração.

São vários os tipos de filtração utilizados atualmente:

### 1) Filtração de fluxo descendente

- a) Filtros rápidos
  - i) Camada Simples (Areia)
  - ii) Camada Dupla (Areia e antracite)
- b) Filtros lentos

### 2) Filtração de fluxo ascendente

- a) Filtros rápidos
- b) Filtros lentos

### 2.7.1 Filtração Rápida

A filtração consiste na remoção de partículas suspensas, coloidais e de microrganismos presentes na água que escoam através de um meio poroso.

Geralmente é um processo utilizado no final do processo de remoção das impurezas nas estações de tratamento de água (Di Bernardo e Dantas 2005a).

Teoricamente pode-se empregar na filtração direta descendente as mesmas taxas que se empregam na filtração de uma ETA com tratamento completo (120 a 600 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d), porém, isso só é possível, se o material filtrante for especificado adequadamente, uma vez que a taxa de filtração está intimamente relacionada à granulometria do meio filtrante, à qualidade da água e às dosagens de produtos químicos. A taxa de filtração também está relacionada com a duração do ciclo de filtração, isto é, para determinada especificação do material filtrante, quanto maior for a taxa de filtração para determinada qualidade de água bruta, menor será o ciclo de filtração.

Preferivelmente deverão existir ciclos de filtração superiores a 24 h, não se aceitando inferior a 12 h (Di Bernardo 2003).

### **2.7.2 Mecanismos Atuantes**

São dois os tipos de mecanismos de retenção de impurezas existentes na filtração rápida, o de profundidade e o de superfície. O mecanismo com ação superficial consiste na remoção das impurezas através da parte superficial do filtro, coando as partículas. Acontece quando este é o mecanismo principal e geralmente não ultrapassa os 0,15m. Na filtração com ação de profundidade, a ação superficial deixa de ser predominante, ficando outros mecanismos responsáveis pela retenção das impurezas.

Os mecanismos responsáveis pela remoção de partículas durante a filtração com ação de profundidade são complexos e influenciados principalmente pelas características físicas e químicas das partículas, da água e do meio filtrante, da taxa de filtração e do método de operação dos filtros. Considera-se a filtração o resultado da ação de três mecanismos distintos: transporte, aderência e desprendimento (Amirtharajah 1988)

Os mecanismos de transporte são responsáveis pela condução das partículas suspensas para a proximidade da superfície dos coletores (antracite, areia ou outro material granular), aderindo a este meio através de forças superficiais, contrapondo as forças de corte que resultam das características de escoamento ao longo do meio filtrante.

Quando as forças de corte superam as forças de aderência, resulta no desprendimento das partículas. Os mecanismos de transporte são: impacto inercial, ação hidrodinâmica, interceção, difusão e sedimentação. Foi constatado por Amirtharajah (1988), que os mecanismos principais na filtração são a difusão e sedimentação.

A difusão é resultante do movimento aleatório de algumas partículas quando estão suspensas em meio líquido, devido ao fenómeno conhecido como movimento Browniano, que pelo bombardeio das partículas pelas moléculas da água provoca a aproximação das mesmas do coletor. Esse é o mecanismo predominante para a retenção de partículas menores que 1µm (Ives, 1970 e 1975). Apesar de este mecanismo não ser importante em estações de tratamento de água com floculação e sedimentação, é bastante importante na filtração direta (O`Melia, 1985).

O mecanismo de intercepção atua sobre as partículas que se encontram muito próximas do coletor, nas linhas de corrente em que a distância da superfície ao coletor é inferior a metade do diâmetro das partículas. De alguma forma, os restantes mecanismos induzem as partículas para a corrente mais próxima da superfície do coletor, sendo a intercepção o mecanismo final (Di Bernardo 2005).

### **2.7.3 Características do meio filtrante**

O conhecimento das características granulométricas do meio filtrante é imprescindível para o projeto de um meio filtrante (Di Bernardo 2005).

Os tipos mais comuns de filtros utilizados são os de areia (massa específica na ordem dos 2600 a 2700 kg/m<sup>3</sup>), antracite (massa específica na ordem dos 1400 a 1700 kg/m<sup>3</sup>) e de gravilha (massa específica na ordem dos 4100 a 4500 kg/m<sup>3</sup>). Podendo ser ainda divididos em filtros de camada simples, dupla ou tripla. A diferença de densidades entre os grãos permite fabricar filtros de varias camadas, ficando os maiores e com menor densidade na parte superior, enquanto os menores e de maior densidade repousam na parte inferior do filtro.

O material filtrante mais utilizado nos filtros de camada simples ou dupla é a areia. Este material tem uma grande resistência à abrasão, e por essa razão o efeito abrasivo que provoca perda de material nas lavagens não acontece com a areia. Materiais com menos resistência como o carvão antracitoso, perdem meio filtrante nas sucessivas lavagens, variando a curva granulométrica e colmatando os filtros com maior rapidez, diminuindo assim a carreira da filtração (Wiecheteck, 1997).

Os filtros de dupla camada tem uma duração maior, com uma taxa de filtração melhor, visto existir a camada de antracite com granulometria maior, permitindo que uma maior quantidade de sólidos fique retido, diminuindo assim a taxa de perda de carga (Cleasby, 1990).

Podemos então referir que para um bom funcionamento de um filtro é necessário um conhecimento exaustivo da sua granulometria. Fatores como o tamanho do grão, tamanho efetivo, distribuição dos grãos, coeficiente de uniformidade, forma e geometria dos grãos, porosidade, dureza dos grãos, massa específica, entre outros), são essenciais para a sua realização.

Vários autores assim como (Cleasby, 1990; Kawamura, 2000; Di Bernardo e Dantas 2005a, entre outros), têm referido a importância do coeficiente de uniformidade. Pequenos valores para este fator resultam num material granular mais uniforme, proporcionando uma entrada mais profunda das impurezas, aumentando assim as carreiras de filtração.

#### **2.7.4 Fatores que influenciam a qualidade da água à saída do filtro**

De entre os vários fatores que podem condicionar a atuação de um filtro, podemos referir a existência ou não de pré-tratamento e a qualidade do mesmo, a deterioração inicial do filtro e o seu posterior amadurecimento, as perdas de carga que poderão ocorrer, o transpasse e a lavagem do filtro.

Segundo Di Bernardo (2005) podemos diferenciar em três grupos de fatores que podem influenciar a qualidade do efluente:

1. Características da suspensão
  - Tipo, tamanho e massa específica das partículas
  - Resistência das partículas retidas pelas forças de cisalhamento
  - Temperatura da água
  - Concentração de partículas
  - Potencial Zeta
  - PH da água
  
2. Características do meio filtrante
  - Tipo do material granular
  - Tamanho efetivo
  - Maior e menor dimensão do grão
  - Coeficiente de uniformidade
  - Massa específica do material granular
  - Espessura da camada filtrante
  
3. Características hidráulicas
  - Taxa de filtração
  - Carga hidráulica disponível

- Método de controlo da taxa e do nível de água nos filtros

É importante neste tema lembrar, que para interromper um ciclo de filtração (momento entre o início da operação e a lavagem do filtro), é necessário que ocorra um destes motivos:

- Atravessamento da turvação

O atravessamento caracteriza-se através de uma deterioração na qualidade do efluente do filtro, geralmente devido a um longo período de atuação do mesmo. É provocado pelo desprendimento de partículas previamente retidas ou partículas que seguem diretas para o efluente não ficando retidas no filtro.

- Igualdade entre a perda de carga total e a carga hidráulica disponível

De acordo com Di Bernardo (2005) deverá considerar-se que teoricamente, a carga hidráulica disponível ideal para certa taxa de filtração corresponderia àquela para a qual o final do ciclo de filtração ocorresse simultaneamente com a perda de carga máxima e a turvação máxima, como exemplificado na Fig. 2.4.

Considera também que a filtração pode ser dividida em três etapas:

- Etapa inicial – Em que o efluente apresenta qualidade de água insatisfatória.
- Etapa intermédia – Em que existe produção de água com qualidade satisfatória.
- Etapa do atravessamento – Em que se regista um aumento contínuo da turvação da água.

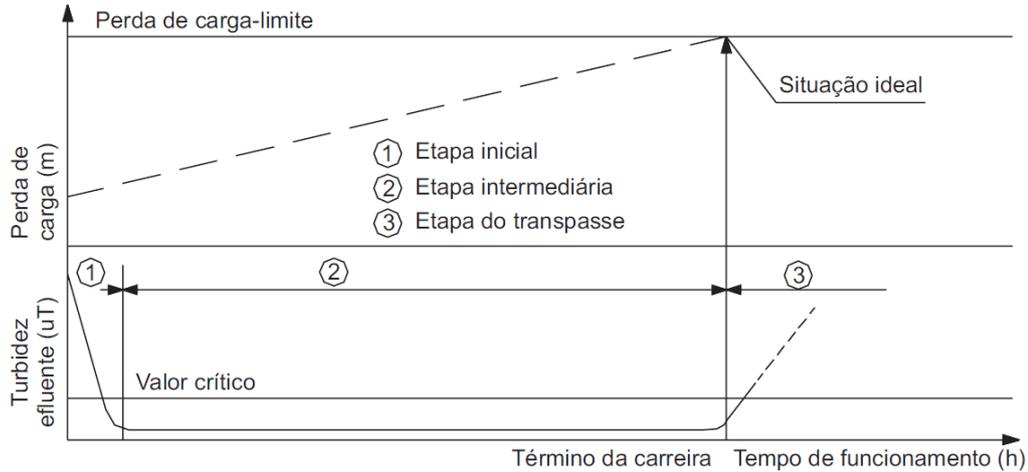


Figura 2.4 - Etapas da filtração com taxa constante (Di Bernardo 2005)

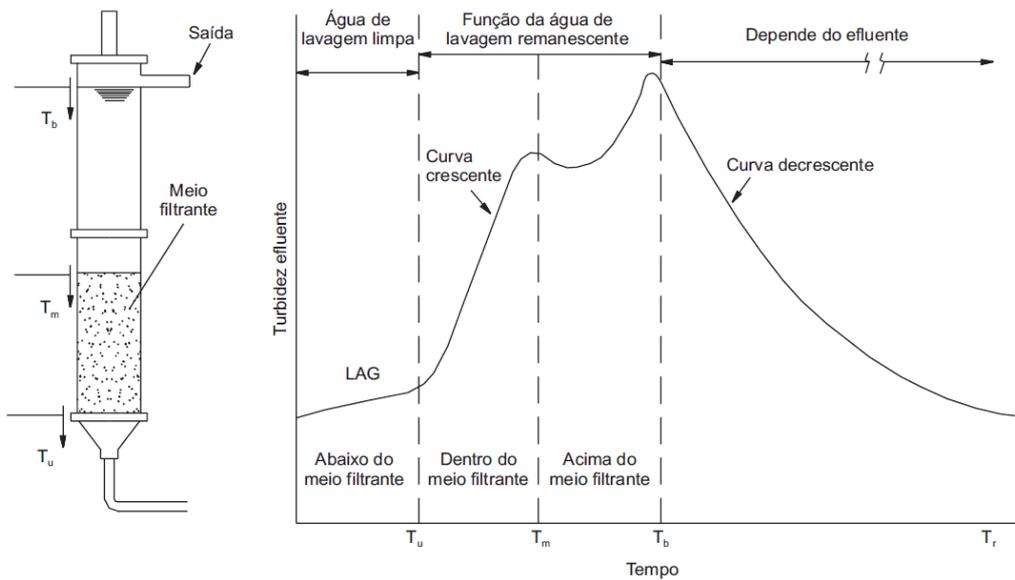


Figura 2.5 - Etapa inicial da filtração descendente (Di Bernardo 2005)

A primeira fase da filtração, conhecida como “maturação”, consiste na primeira água que sai do filtro ainda com remanescências da lavagem do filtro. Esta fase tem qualidade satisfatória e tem duração até  $T_u$ , como se ilustra na Fig. 2.5. Seguidamente inicia-se a fase de degradação do efluente até atingir um primeiro pico de turvação em  $T_m$ , que é o tempo de deslocamento da segunda fração remanescente de água da lavagem (dependendo da lavagem, esse pico poderá não acontecer). No período entre  $T_m$  e  $T_b$  é filtrada a terceira fração de água

remanescente, de pior qualidade podendo originar um pico de turvação ainda mais elevado. Após esta fase é observada uma melhoria contínua da qualidade do efluente até atingir a fase intermédia (Di Bernardo 2005).

A função da lavagem dos filtros rápidos é a da restauração da sua capacidade inicial, através de um fluxo ascensional, com velocidade suficiente de modo a promover a fluidificação do meio filtrante, assegurando assim uma expansão adequada do mesmo. A lavagem inadequada do meio filtrante pode provocar uma série de problemas futuros dos quais podemos destacar o aparecimento de bolas de lodo no seu interior, água filtrada de pior qualidade, menor volume de água produzida por carreira e aumento da perda de carga do meio.

Devido a estes problemas várias têm sido as técnicas que têm sido utilizadas ao longo do tempo para a lavagem dos filtros. Di Bernardo (2003) refere que a técnica utilizando ar e água tem demonstrado bons resultados em filtros duplos, permitindo poupança de água, tempo de tratamento tendo conseqüentemente menores custos.

Outro fator que poderá afetar a qualidade dos filtros será as oscilações hidráulicas. Estas poderão acontecer rapidamente ou gradualmente, varias vezes no decurso do ciclo do filtro. Quando a taxa de filtração é subitamente aumentada num filtro sujo, vai provocar um desequilíbrio entre as forças de aderência que agarram os sólidos e as forças hidráulicas de cisalhamento que os separam, provocando um desprendimentos das partículas retidas, enviando as para o efluente (Cleasby, 1990).

## **2.7.5 Tipos de Filtração utilizados**

### **2.7.5.1 Filtração direta ascendente**

Um filtro ascendente consiste em uma câmara com fundo falso sobre a qual é colocada uma primeira camada base de granulometria maior, seguindo-se por cima desta a camada filtrante (normalmente areia), assim como está exemplificado na Fig. 2.6. O fluxo de água regista-se no sentido ascendente, e é coletado numa calha no topo do filtro, que também poderá servir para coletar a água da lavagem.

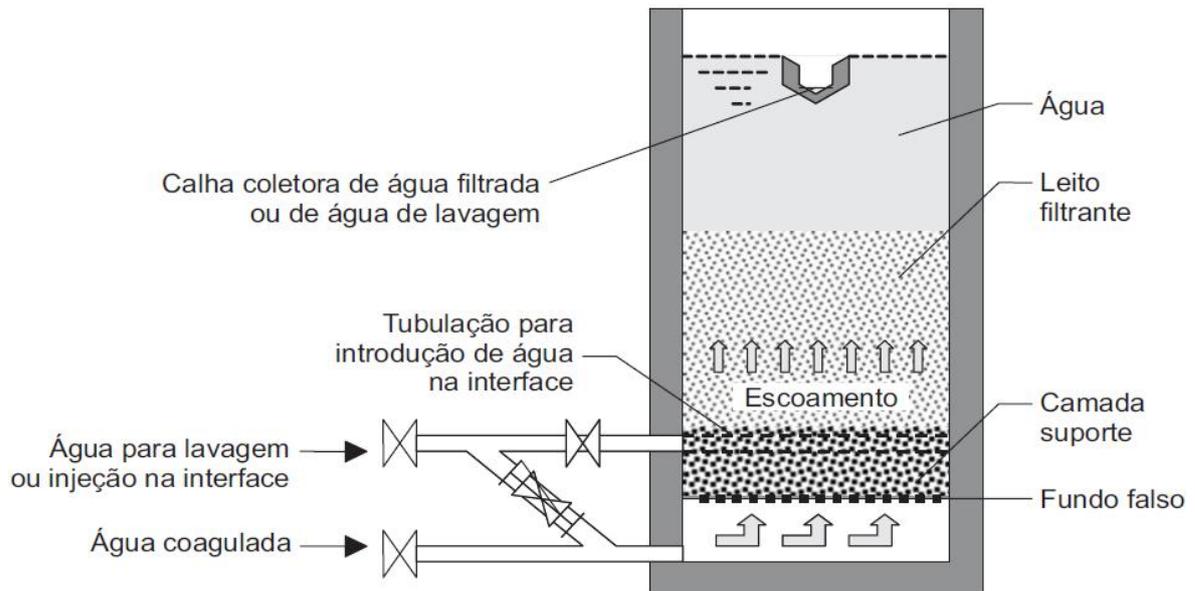


Figura 2.6 - Esquema de funcionamento de um filtro ascendente com calha única (Di Bernardo 2003)

Podemos considerar vantagens do FDA em relação ao sistema de tratamento completo:

- a) Custo da construção 50% menor, tendo em vista que não há necessidade de unidades adicionais de floculação e decantação;
- b) Menor custo de operação e manutenção;
- c) Menor produção de lodo.

Como desvantagens em relação ao tratamento em ciclo completo destacam-se:

- a) Exige controlo mais rigoroso da dosagem de produtos químicos;
- b) Limitações relativas à qualidade da água bruta, principalmente a biológica (como as totalidades dos sólidos ficam retidas no filtro, a qualidade da água bruta limita sua aplicação), a presença de algas e outros organismos microscópicos são amplamente restritivos ao uso dessa tecnologia;
- c) A mudança na qualidade da água afetará o ciclo de filtração – como 100% dos sólidos ficam retidos no filtro, a variação em sua distribuição modifica a duração das carreiras de filtração, para mais ou para menos;

- d) O tempo de contacto na unidade é relativamente curto, exigindo ação rápida nas dosagens de produtos químicos durante a mudança da qualidade da água bruta – como não há unidades de floculação nem de decantação, o tempo de detenção é bem menor;
- e) Possibilidade de contaminação do reservatório de água filtrada após a lavagem do filtro – nos sistemas em que a mesma calha é usada para coleta da água filtrada e de lavagem, após recolocar o filtro em operação, é necessário descartar por alguns minutos a água produzida, pois esta promoverá certa limpeza das superfícies que tiveram contacto anterior com a água de lavagem;
- f) Necessidade de cobertura do filtro, pois a água filtrada fica exposta ao ar livre.

### **2.7.5.2 Filtração direta descendente**

A filtração direta descendente consiste no tratamento da água prescindindo do tratamento completo, não sendo necessária realizar a sedimentação, e pode ser executada das seguintes formas:

- a) Filtração direta descendente sem pré-floculação – Sistema com unidade de mistura rápida e encaminhamento da água coagulada diretamente para o filtro;
- b) Filtração direta descendente com pré-floculação – Sistema com unidade de mistura rápida, floculação e filtro;

Comparado ao tratamento completo, a filtração direta descendente apresenta as seguintes vantagens:

- a) Custo da construção de 30% a 50% menor;
- b) Redução dos custos de operação e manutenção, uma vez que se tem menor consumo de coagulante e de energia elétrica são eliminados os equipamentos de remoção de lodo dos decantadores e, também, algumas vezes, os equipamentos de floculação;
- c) Menor produção de lodo;
- d) Facilidade no tratamento de água bruta com baixa turvação.

Dentro das desvantagens, destacam-se:

- a) Necessidade de controlo mais rigoroso da dosagem de produtos químicos aplicados, principalmente quando não se tem a pré-floculação;
- b) Dificuldades no tratamento de água bruta com turvação ou com cor verdadeira altas;
- c) A mudança na qualidade da água bruta afeta rapidamente o ciclo de filtração;
- d) Tempo de detenção total da água no sistema é relativamente curto para a oxidação de substâncias orgânicas presentes no afluente;
- e) O tempo de detenção em todo o tratamento é bastante curto, necessitando de ação rápida nas mudanças de dosagens de produtos químicos durante a mudança da qualidade da água bruta;
- f) Período inicial de melhoria da qualidade do efluente mais longo (Di Bernardo 2003).

## **2.7.6 Controlo dos filtros**

### **2.7.6.1 Relação entre a perda de carga e o funcionamento dos filtros**

No processo da filtração, o item mais importante a considerar, e que deve ser controlado, é a velocidade. Este ponto pode ser dividido em 2 categorias importantes:

- Velocidade de aproximação ou taxa de filtração ( $V_{ap}$ ).
- Velocidade intersticial média ( $V_{im}$ ).

A velocidade de aproximação consiste no caudal afluente dividido pela área em planta do filtro.

A velocidade intersticial média é a razão entre a  $V_{ap}$  e a porosidade média do meio filtrante.

Segundo Di Bernardo, à medida que os filtros vão sendo utilizados, as impurezas são retidas nos vazios intergranulares de cada subcamada do meio filtrante, reduzindo os vazios e a porosidade, resultando num aumento da velocidade intersticial e da perda de carga na região do meio filtrante.

Como o regime de escoamento na filtração é laminar, tem-se que:

$$\frac{H_{mf}}{L_{mf}} = Kr \times V_{ap} \quad (2.1)$$

Sendo:

$H_{mf}$ = Perda de carga do meio granular (m)

$L_{mf}$ = espessura do meio filtrante (m)

$Kr$ = Coeficiente de Resistividade (s/m)

$V_{ap}$ = Taxa de filtração (m/s)

E considerando que,

$$\text{Taxa de filtração} = \frac{\text{Carga Hidraulica Disponivel}}{\text{Resistência Total do Filtro}} \quad (2.2)$$

Ou

$$\text{Taxa de filtração} = \frac{\text{Carga Hidraulica Disponivel}}{\text{Perda de Carga Total}} \quad (2.3)$$

Podemos deprender destas equações que existem as seguintes quatro condições para descrever as condições possíveis de funcionamento de um filtro:

- Carga hidráulica disponível constante e resistência total do filtro variável;
- Carga hidráulica disponível constante e resistência total do filtro constante;
- Carga hidráulica disponível variável e resistência total do filtro constante;
- Carga hidráulica disponível variável e resistência total do filtro variável.

De acordo com o objetivo deste trabalho vai-se abordar especialmente a carga hidráulica disponível variável e resistência total do filtro variável.

### **2.7.6.2 Carga hidráulica disponível variável e resistência total do filtro variável**

Dependendo das características de entrada e de saída dos filtros, a taxa de filtração poderá permanecer constante ou variável (declinante), quando a carga hidráulica disponível e a resistência total à filtração forem variáveis (Di Bernardo, 2003).

Nos trabalhos experimentais de Di Bernardo & Cleasby (1980) foi observado que, independentemente do tipo de afluente nos vários filtros (água decantada ou coagulada), a filtração com taxa declinante variável apresentou melhor desempenho comparativamente à filtração com taxa constante, pois além da qualidade da água filtrada ter sido melhor ou no mínimo igual, a carga hidráulica necessária na filtração com taxa declinante foi menor para que a duração da carreira de filtração resultasse igual nos dois tipos de operação (Di Bernardo, 2003).

## **2.8 Microtamisação**

As grades são utilizadas na ETA ou no local de captação da água para reter os materiais grosseiros. Complementarmente a microtamisação destina-se à retenção de sólidos finos não coloidais em suspensão e geralmente contam com um sistema de lavagem em contracorrente. Como a presença de algas pode influenciar muito a duração das carreiras dos filtros, o micropeneiramento é importante para prolongar estas carreiras. Devido ao fator sazonal do aparecimento de algas mais numas alturas do ano que em outras, a microtamisação poderá funcionar melhor numas alturas e pior noutras. Outro fator que também poderá afetar o rendimento deste processo será os vários formatos e posições que as partículas têm quando chegam ao peneiro, podendo fazer variar a percentagem de partículas retidas.

De acordo com os ensaios de (Dalsasso e Sens, 2003), com microtamisadores de 25 e 50  $\mu\text{m}$ , foi possível constatar que houve uma diminuição da turvação e do número de fitoplâncton presente na água encaminhada para a filtração, proporcionando assim ciclos de filtração com maior duração.

### 3 REVISÃO DO ESTADO DE ARTE

Nos parágrafos seguintes registam-se as principais contribuições para o estudo do desempenho dos sistemas de coagulação publicadas nos últimos anos.

Segundo Sieliechi *et al*, (2009) a quantidade de alumínio remanescente derivado do tratamento de água é muito influenciado pela qualidade da água bruta e também pelas condições ótimas físico-químicas na fase de coagulação.

Bergamasco *et al*, (2011) utilizando como coagulantes o sulfato de alumínio e a quitosana aplicados a um processo de coagulação e ultrafiltração, concluíram que um processo híbrido utilizando ambos os coagulantes teve mais sucesso no tratamento da água com alta turvação que os processos com os coagulantes utilizados separadamente.

Abreu (2009) constatou que o uso de filtros de antracite proporcionou um ciclo de filtração mais longo comparativamente ao filtro de areia, independentemente dos coagulantes utilizados. Também é referido que o uso de polímeros catiónicos e aniônicos não apresentou melhorias no comportamento dos filtros.

Fletcher *et al*, (2002) comprovaram que o ponto-chave para o controlo da coagulação é a adição da quantidade certa de coagulante. Se for coagulante a mais pode cumprir a tarefa, mas provocando gastos excessivos de coagulante e maiores quantidades de lamas residuais. Coagulantes a menos afetam a coagulação e afetando o resto do processo, especialmente a filtração.

Ghernaout (2013) refere que a coagulação reduz o carbono orgânico dissolvido na ordem dos 30 a 60% através do aumento da dosagem do coagulante e da otimização do pH.

De acordo com Piantá (2008) a única variável na criação de lodo é a adição de produtos químicos, sendo necessário a pesquisa de outros tipos de coagulantes como os orgânicos à base de tanino utilizados pelo próprio, que atingiram bons resultados no processo de floculação e diminuíram o volume de lodo criado, melhorando a qualidade do mesmo.

Segundo Matilainen *et al*, (2010) a coagulação é um bom processo de remoção de matéria orgânica natural, e por isso deve ser otimizada a coagulação, assim como pesquisados processos alternativos para melhor remoção da matéria orgânica natural.

Zahrim *et al*, (2011) aludem ao facto de que a seleção do tipo de coagulante assim como a sua dosagem são críticas no processo da coagulação. A adição de coagulantes metálicos e polímeros permite eficácia com uma maior gama de pH's, diminuindo as lamas residuais.

Santos, E. (2004) constatou que utilizando filtração direta descendente, regulando em bancada os valores de pH, o tipo de coagulante e com a adição de um polímero como adjuvante, permite otimizar a quantidade de coagulante utilizado, atingindo os valores recomendados para a utilização da filtração descendente.

Hu *et al*, (2012) compararam, com grandes valores de turvação, coagulantes polímeros catiónicos naturais e coagulantes derivados de alumínio, concluindo que o coagulante polímero criava cerca de 1/5 dos resíduos, gerados pelo coagulante de alumínio. Apesar dos bons resultados o polímero ainda não atinge bons níveis de remoção da turvação, sendo que a mistura de ambos é a que atinge melhores resultados globalmente.

Pritchard *et al*, (2010) estudaram as diferenças entre Moringa oleífera, sulfato de alumínio e sulfato férrico, tendo concluído que apesar de melhores taxas de remoção de turvação com os coagulantes sulfato férrico e alumínio, a Moringa oleífera atingiu resultados bastante satisfatórios, podendo-se encorajar o seu uso em países em desenvolvimento.

Franco (2009) constatou após a realização de um trabalho utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico, num sistema de coagulação/floculação em *Jar-Test*, que existe uma correlação entre os parâmetros turvação/dosagem e a qualidade da água bruta e tipo de coagulante utilizado, podendo ser utilizada para a otimização do processo.

De acordo com Konieczny *et al*, (2009) utilizando um sistema “em linha” de coagulação/ultrafiltração, com sulfato de alumínio, sulfato férrico e cloreto férrico como coagulantes, foram atingidos bons resultados na remoção de matéria orgânica, resultando numa melhoria da qualidade da água.

Julio *et al*, (2009) estudaram o sistema de filtração direta, com o uso de sulfato de alumínio, cloreto de polialumínio, cloreto férrico e reagente de Fenton, tendo atingido bons resultados

no tratamento da água especialmente no período do Inverno e com o uso do sulfato de alumínio.

Já Máximo (2007) após ter feito um estudo de bancada em *Jar-Test*, com os coagulantes sulfato de alumínio, cloreto férrico e taninos, dividido numa primeira fase de otimização de dosagens e tempos de mistura, seguida de outra fase em que foram mediadas as taxas de remoção de metais pesados, concluiu que terá sido o tanino que obteve as melhores remoções de contaminantes orgânicos, sendo que o cloreto férrico apresentou as melhores remoções de fósforo.

## 4 METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO

### 4.1 Introdução

O trabalho realizou-se de acordo com as seguintes etapas:

- 1- Caracterização das águas brutas em termos de turvação, pH, condutividade, oxigénio dissolvido e percentagem de oxigénio dissolvido seguido da determinação das dosagens ótimas de cada coagulante, para dois tempos de mistura.
- 2- Seleção de quatro coagulantes e tempo de mistura, com melhor eficiência de remoção de turvação.
- 3- Série experimental com a seleção determinada anteriormente, para dois níveis de turvação diferente, com caracterização de todos os parâmetros antes e depois da filtração.
- 4- Contabilização da eficiência dos filtros na remoção do alumínio remanescente para os dois níveis de turvação.
- 5- Considerações finais.

### 4.2 Material e equipamento utilizados

No decurso da fase experimental foi necessário utilizar diverso material disponibilizado pelos laboratórios da Universidade do Minho para registar a evolução das variáveis em estudo.

Seguidamente apresenta-se a lista do material necessário:

- a) Turbidímetro HACH 2100Q is, com provete de medição.
- b) Medidor de pH HANNA Instruments.
- c) *Jar-Test* de bancada da marca AQUALYTIC - AMF 6, com velocidade variável de 1 a 220 rpm, com tempo programável. Possui seis reatores com capacidade de 2 litros cada, dotados de palhetas de agitação em aço inox.
- d) Tubos em PVC

- e) Bomba WATSON – MARLOW 501U
- f) Medidor portátil multifunções HACH HQ40d e respectivas sondas de medição condutividade, pH e oxigénio dissolvido
- g) Peneiro Impact 0,053mm
- h) Agitador mecânico HEIDOLPH
- i) Cronómetro
- j) Balança de precisão RADWAG AS220/C/2
- k) Fotómetro Multiparâmetros HI 83200 da Hanna Instruments
- l) Copos com 300 e 1000mL
- m) Seringas graduadas para coagulantes líquidos
- n) Garrafões de 6 litros para a recolha de água

### 4.3 Desenvolvimento Experimental: Estudo de bancada

Para testar a eficiência dos coagulantes recorreu-se a ensaios de bancada, utilizando um aparelho de *Jar-Test*, no laboratório de Hidráulica juntamente com um sistema de filtros de areia simples (Fig. 4.1).



Figura 4.1 - *Jar-Test* e filtros

Este equipamento com seis unidades de teste, e velocidade variável de 30 a 220 rpm, permite estudar à escala laboratorial, os diversos parâmetros da coagulação, como o coagulante mais adequado, a dosagem apropriada e a velocidade e tempo ideal de agitação da solução.

## 4.4 Ensaio

### 4.4.1 Preparação da água bruta

Em primeiro lugar realizou-se a colheita da água bruta proveniente da ribeira próxima da Universidade, recolhida em garrações de 5 e 6 litros. (Fig. 4.2)



Figura 4.2 - Local da recolha de amostras na Ribeira de Santa Luzia, Azurém, Guimarães.

Importante ressaltar que depois de recolhida a água esta é guardada numa zona do laboratório onde apanha menos luz de modo a melhor preservar a água até à elaboração das experiências. De referir também, que a água utilizada foi *in natura*, não tendo sido utilizado nenhum acidificante ou alcalinizante para correção do pH.

De modo a conseguir uma maior uniformidade antes da utilização, a água é inicialmente agitada durante 5 minutos em agitador mecânico (Fig. 4.3 esq), repousando durante 1 minuto até ser passado pelo peneiro com 0,053mm de abertura, tirando as partículas mais grosseiras, sendo então medido o valor de turvação utilizando o turbidímetro. (Fig. 4.4 Dir.)



Figura 4.3 - Agitador mecânico (Esq.) e Turbidímetro Hach (Dir.)

Adiciona-se, se necessário, lodo de modo a regular o valor de turvação para os 10 e 40 NTU, conforme requerido, repetindo-se todo o processo.

Como segundo passo, são medidos os parâmetros da água bruta: pH, temperatura, condutividade, oxigénio dissolvido (OD) e percentagem de oxigénio dissolvido (%OD). (Figura 4.4)



Figura 4.4 - Leitura da Condutividade e OD e % OD (Esq.) e leitura de pH e temperatura (Dir.)

#### 4.4.2 Ensaios de coagulação/floculação no *Jar-Test*

Numa terceira fase enchem-se os copos com a água bruta (250 mL para os coagulantes Ashland), e 1000 mL para o sulfato de alumínio. Coloca-se os copos no *Jar-Test* e acrescenta-se os coagulantes nas doses pré-determinadas, tendo já o equipamento a uma velocidade rápida (120 rpm), de modo a permitir uma distribuição o mais homogênea possível do coagulante pelo líquido. No caso dos coagulantes da Ashland foram utilizados as instruções sugeridas nos manuais fornecidos pela própria empresa.

Na primeira fase foram testados dois tipos de velocidade, um de mistura rápida e outro de mistura lenta.

Os escolhidos foram o T1 - 1min de mistura rápida a 120rpm, e 20min de mistura lenta a 30rpm. E o T2 - 25s de mistura rápida a 120rpm e 10min de mistura lenta a 30rpm (Elton Franco, 2009).

### 4.4.3 Filtros de areia descendentes

Terminado o tempo o *Jar-Test* é desligado e o conteúdo do copo é colocado no filtro de areia descendente, onde é filtrado durante 5 minutos.

O filtro de areia foi dimensionado segundo as especificações de Di Bernardo (et. al. 2002) com variações. É composto por um tubo em pvc com 50mm de diâmetro interno, fechado em baixo com uma tampa do mesmo material furada (4mm de diâmetro). O tubo tem uma altura de 30cm, sendo que a areia ocupa 15cm. Tem na sua base um duplo filtro para retenção da areia da TenCate Geotube com 100 microns (Fig. 4.7).

A areia tem uma granulometria fina, entre 0,25 a 1mm na sua maioria (ver anexo).

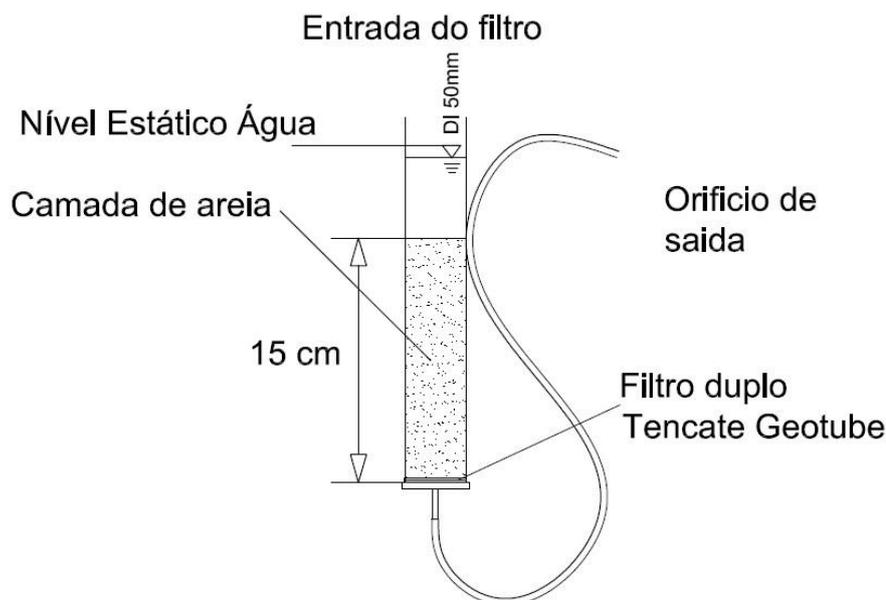


Figura 4.5 - Esquema do filtro de areia

Para finalizar, é medida e registada a turvação de cada copo. São também medidos os parâmetros medidos inicialmente para uma posterior comparação.

Nota: A cada remessa de água bruta nova, é feito um teste medindo a turvação após passagem pelos filtros de modo a comparar a eficiência dos filtros por si só, sem usar os coagulantes.

#### 4.4.4 Lavagem de filtros entre experiências

Após cada série de experiências é realizada uma retro lavagem com caudal constante durante dois minutos em cada filtro, com velocidade suficiente para criar uma expansão do meio (Di Bernardo 2003), provocando uma desagregação da areia libertando as impurezas retidas (Fig. 4.6).



Figura 4.6 - Bomba utilizada no processo da retro lavagem

Para evitar a perda do material arenoso, é colocado na entrada do filtro uma tampa com rede metálica e abertura de 0.053mm tal como se ilustra na figura 4.7.



Figura 4.7 - Filtro de areia com tampa de retenção de finos

Após este procedimento, cada filtro é retirado, e compactado novamente segundo um processo padronizado.

#### **4.4.5 Medições Complementares para Sulfato de alumínio**

Terminadas as experiências e determinada a dosagem de coagulante ótima para cada turvação é realizada a medição do alumínio remanescente. Esta medição é realizada através do uso de um fotômetro (fig. 4.8), tendo sido realizada a experiência para cada uma das águas brutas (turvação de 10 e 40 NTU), sendo posteriormente realizada no final da filtração direta depois do tratamento com as respectivas dosagens de sulfato de alumínio ótimas.



Figura 4.8 - Fotómetro utilizado para a medição do alumínio

#### **4.4.6 Medição dos parâmetros**

##### **4.4.6.1 Medição do pH**

O procedimento seguido para a medição do pH foi o seguinte:

Foi medido o pH da água bruta e da água após filtração. As medições foram realizadas de acordo com o manual de instruções do fabricante, tendo-se o cuidado de calibrar o eletrodo regularmente entre as soluções padrão de pH 4 e 7. Teve-se cuidado com o tamanho da amostra de modo a se conseguir cobrir todo o sensor.

A legislação portuguesa o Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto estipula que para efeitos de consumo humano o valor do pH deve estar compreendido entre 6,5 e 9,0.

##### **4.4.6.2 Medição da turvação**

As medições foram realizadas de acordo com o manual de instruções do fabricante. Realizou-se uma calibração regular, se bem que durante o decurso das experiências não se tenha registado variações na calibração.

Teve-se um cuidado especial com o provete de medição do turbidímetro de modo a que este esteja completamente limpo, para não adulterar as medições.

A medição da turvação foi realizada para a água bruta e após a filtração. A leitura fez-se imediatamente à colocação da amostra no provete, uma vez que o diferencial de temperatura poderá influenciar também as medições.

Em cada medição foram retirados três valores sendo o valor utilizado a média entre eles.

Segundo a legislação portuguesa o Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto estipula que para efeitos de consumo humano o valor da turvação não deve ultrapassar 4 NTU sendo que o valor paramétrico para águas superficiais deve ser  $\leq 1$  NTU.

#### **4.4.6.3 Medição da temperatura**

As medições foram realizadas de acordo com o manual de instruções do fabricante. A temperatura foi medida para a água bruta e após a filtração. Teve-se o cuidado do eletrodo de medição estar completamente submerso no líquido.

#### **4.4.6.4 Medição de oxigénio dissolvido, % oxigénio dissolvido e condutividade**

As medições foram realizadas de acordo com o manual de instruções do fabricante. Mediram-se os parâmetros na água bruta e após a filtração da água. A medição foi efetuada rapidamente, sem agitar a amostra, de modo a ter uma amostra o mais homogénea possível. Teve-se em consideração uma amostra em quantidade suficiente para uma total imersão das sondas. Em todos os parâmetros foram tirados três valores consecutivos, sendo o utilizado a média dos valores.

Segundo a legislação portuguesa o Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto estipula que para efeitos de consumo humano, o valor paramétrico da condutividade é de 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 20C.

#### **4.4.6.5 Medição de alumínio**

As medições foram realizadas de acordo com o manual de instruções do fabricante. Medição foi realizada apenas após a escolha das melhores dosagens de coagulantes para cada valor de turvação. Utilizou-se material protetor no manuseamento dos reagentes utilizados. Utilizou-se um copo graduado de 50mL para mistura dos reagentes. Retirou-se o valor de  $Al^{3+}$  e de  $Al_2O_3$  em mg/l.

### **4.5 Condições da experiência**

Foram tidos em conta no início da experiência os valores tidos de experiências idênticas anteriores, assim como os manuais de procedimentos dos fabricantes. Como exemplo temos os tempos de mistura rápida e lenta, optando-se por aqueles que melhores resultados obtiveram, em condições similares a este ensaio.

De referir que não houve oportunidade de fazer um registo das experiências com a temperatura da água constante, assim como a regulação do pH ótimo de coagulação, podendo esses fatores fazer variar alguns resultados.

## **5 RESULTADOS E SUA DISCUSSÃO**

### **5.1 Descrição geral**

As experiências foram realizadas no laboratório de Hidráulica da Universidade do Minho, no Pólo de Azurém, em Guimarães, no período de Junho de 2012 a Janeiro de 2013.

As experiências consistiram num estudo de bancada recorrendo ao uso de um aparelho de *Jar-Test*, seguido de filtração direta descendente com meio filtrante de camada simples em areia.

Este é o método ideal para testar a dosagem ótima de coagulante para cada turvação diferente.

Nesta experiência foram consideradas como variáveis os 9 tipos diferentes de coagulantes e dois tempos de mistura.

### **5.2 Coagulantes Utilizados**

Foram utilizados nove coagulantes diferentes, sendo que oito eram polímeros e o nono sulfato de alumínio. Na gama de coagulantes testados podemos diferenciar os Amerfloc como polímero catiónico orgânico e o Chargepac como polímero catiónico com mistura orgânica e inorgânica. Em seguida encontra-se a listagem dos coagulantes.

1º - Amerfloc 2 em estado líquido

2º - Amerfloc 487 em estado líquido

3º - Chargepac 12 em estado líquido

4º - Chargepac 55 em estado líquido

5º - Chargepac 100 em estado líquido

6º - Chargepac 300 em estado líquido

7º - Chargepac 312 em estado líquido

8º - Chargepac 340 em estado líquido

9º - Sulfato de Alumínio ( $Al^2(SO_4)^3 \cdot (14 \text{ a } 18) H_2O$ ) em estado sólido

Todos os coagulantes polímeros foram cedidos pela empresa Ashland.

Na figura seguinte temos um quadro com algumas das propriedades dos coagulantes testados, fornecidos pelo fabricante.

Quadro 5.1- Características dos Coagulantes

Características dos coagulantes				
Coagulante	Cor	PH	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosidade Dinamica (Mpa.s)
Polimero - Amerfloc 2	Sem dados	Sem dados	1,52	Sem dados
Polimero - Amerfloc 487	Amarelo claro	6	1,04 / 20°C	Sem dados
Polimero - Chargepac 12	Amarelo	Sem dados	1,195 / 20°C	525 / 25°C
Polimero - Chargepac 55	Incolor / Amarelo claro	≈ 4,2 / 25°C	1,35	Não aplicavel
Polimero - Chargepac 100	Amarelo	2,7	1,22 / 25°C	Sem dados
Polimero - Chargepac 300	Amarelo	Sem dados	1,39 / 25°C	Sem dados
Polimero - Chargepac 312	Amarelo	Sem dados	1,195 / 20°C	525 / 25°C
Polimero - Chargepac 340	Amarelo	Sem dados	1,337 / 20°C	125 / 25°C
Sulfato de aluminio (Sólido)	Branco	Sem dados	2,67	Sem dados

### 5.3 Resultados obtidos

As experiências foram divididas em duas fases tendo numa fase inicial sido um estudo com todos os coagulantes e verificando a dosagem óptima para cada coagulante. Numa 2ª fase foram utilizados os quatro melhores resultados com os coagulantes polimeros e o sulfato de aluminio para uma nova serie de experiências sendo contabilizados todos os parametros em estudo.

Na 1ª fase de experiências foi testado um tipo de água com turvação de aproximadamente 10 NTU. Nesta fase foram testados dois tempos diferentes de coagulação/floculação tal como já referido no capítulo 4, que foram:

- T1 - 1mn de mistura rápida a 120rpm, e 20mn de mistura lenta a 30rpm
- T2 - 25s de mistura rápida a 120rpm e 10mn de mistura lenta a 30rpm

De acordo com as informações do fabricante do coagulante polímero e também com os resultados que se foram verificando, foram utilizadas concentrações que variavam entre 0,05 e 1,5%.

Após revisão bibliográfica sobre experiências com *Jar-Test* com o uso de sulfato de alumínio em condições semelhantes, optou-se pelo uso inicial de valores entre 5 e 45 mg/L.

Numa 2ª fase de experiências foram então reunidos os 4 coagulantes polímeros com os melhores resultados globalmente, e foram testados para dois níveis de turvação: 10 a 15 NTU e 35 a 40 NTU.

Nesta fase foi utilizado unicamente o tempo de floculação que melhores resultados proporcionou na 1ª fase.

Numa fase final, e com os melhores resultados do sulfato de alumínio para ambos os tempos, foi contabilizada a eficiência de remoção de alumínio.

### **5.3.1 1ª Fase Experimental**

Nesta fase foram contabilizados os seguintes parâmetros para a água bruta: turvação, pH, temperatura, oxigênio dissolvido (mg/L) e (%), e condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Após a filtração foi medida a turvação. De referir novamente que este parâmetro, assim como os restantes, é medido três vezes, sendo o valor final a media entre os três.

Foi também medido o valor da turvação da água bruta após passagem nos filtros, mas sem a fase inicial da coagulação/floculação, de modo a comparar a eficiência do filtro sem a adição dos produtos químicos.

Quadro 5.2- Eficiência da filtração na remoção da turvação da água bruta

	Turvação Inicial Média (NTU)	Turvação Final Média (NTU)	Remoção de Turvação Média (%)
Água Bruta	10,40	3,19	69,36

Foi também contabilizado o caudal para melhor corresponder às necessidades de caudal apontadas por Di Bernardo *et al.* (2000).

Quadro 5.3- Valores recomendados de caudal retirado de Di Bernardo *et al.* (2000)

Vazão (mL/min ou cm <sup>3</sup> /min)	Taxa de Filtração (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia)
12	61
14	71
16	81
18	91
20	102

Quadro 5.4 - Determinação do caudal médio

Tempo (min)	Caudal (mL/min)	Caudal Médio (mL/min)
0-1	22	16,4
1-2	18	
2-3	16	
3-4	14	
4-5	12	

De acordo com Di Bernardo, temos uma taxa de filtração a rondar os 81 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia.

Foram então realizadas as séries de experiências, testando as várias quantidades de coagulantes.

Quadro 5.5 - Eficiência da remoção da turvação (%) para o tempo de mistura T1

Quantidade Coagulante	Remoção de turvação (%)								
	Amerfloc 2	Amerfloc 487	Chargepac 12	Chargepac 55	Chargepac 100	Chargepac 300	Chargepac 312	Chargepac 340	
0,05%	86,21	13,79	83,00	78,31	90,29	85,50	87,38	91,21	
0,10%	80,67	78,70	85,14	82,89	91,26	87,89	81,84	86,61	
0,25%	91,41	47,09	81,63	88,18	90,00	92,25	79,94	86,61	
0,50%	94,22	66,20	78,82	80,43	82,28	89,15	75,00	87,37	
1%	93,67	62,56	80,14	85,64	85,81	84,26	82,01	88,35	
1,50%	30,91	57,55	84,51	87,53	83,60	88,45	79,83	83,93	
Quantidade Coagulante									
									Sulfato de Alumínio
5mg/L									92,86
10mg/L									92,52
15mg/L									92,84
25mg/L									89,41
35mg/L									89,48
45mg/L									90,48

Quadro 5.6 – Eficiência da remoção da turvação (%) para o tempo de mistura T2

Quantidade Coagulante	Remoção de turvação (%)								
	Amerfloc 2	Amerfloc 487	Chargepac 12	Chargepac 55	Chargepac 100	Chargepac 300	Chargepac 312	Chargepac 340	
0,05%	86,21	28,86	72,78	81,27	78,83	84,12	83,39	87,08	
0,10%	88,15	59,79	71,50	83,67	90,44	88,16	77,34	84,30	
0,25%	94,63	60,13	66,90	84,60	85,73	86,02	77,51	82,60	
0,50%	94,20	58,83	75,37	79,45	87,57	89,59	78,68	88,89	
1%	86,63	47,88	80,27	87,92	86,04	86,70	83,66	91,25	
1,50%	90,65	63,01	84,58	80,82	83,23	86,47	70,50	88,71	
Quantidade Coagulante									
									Sulfato de Alumínio
5mg/L									87,14
10mg/L									91,37
15mg/L									91,30
25mg/L									81,83
35mg/L									83,88
45mg/L									84,81

Todos os quadros com os valores e parâmetros medidos encontram-se em anexo.

Dos valores de remoção de turvação, realizaram-se os seguintes gráficos:

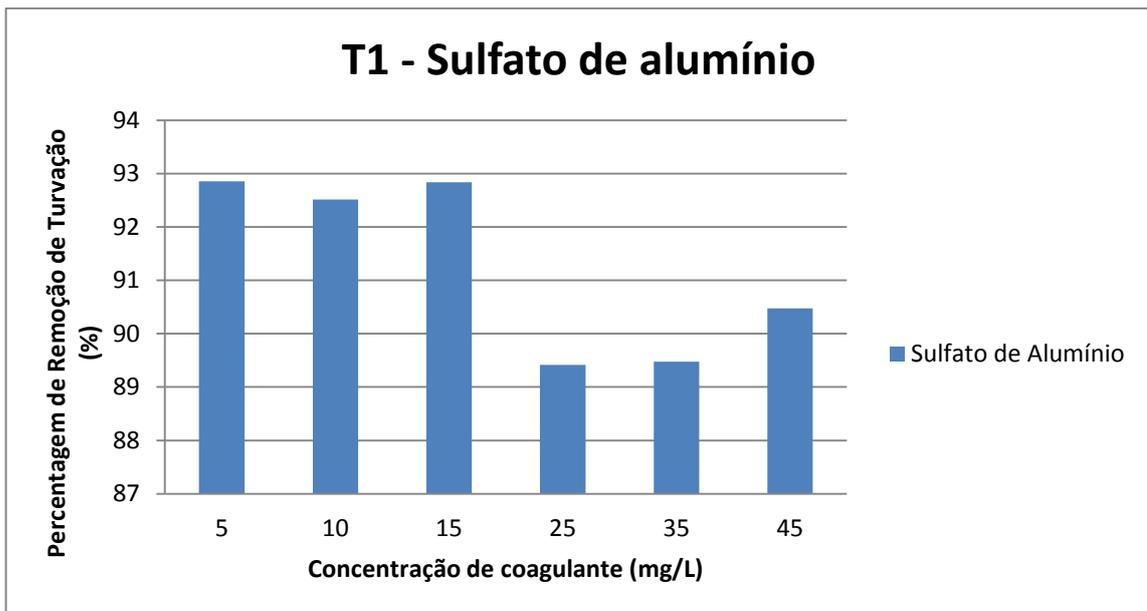


Figura 5.1– Remoção da turvação (%), com sulfato de alumínio para o tempo de mistura T1

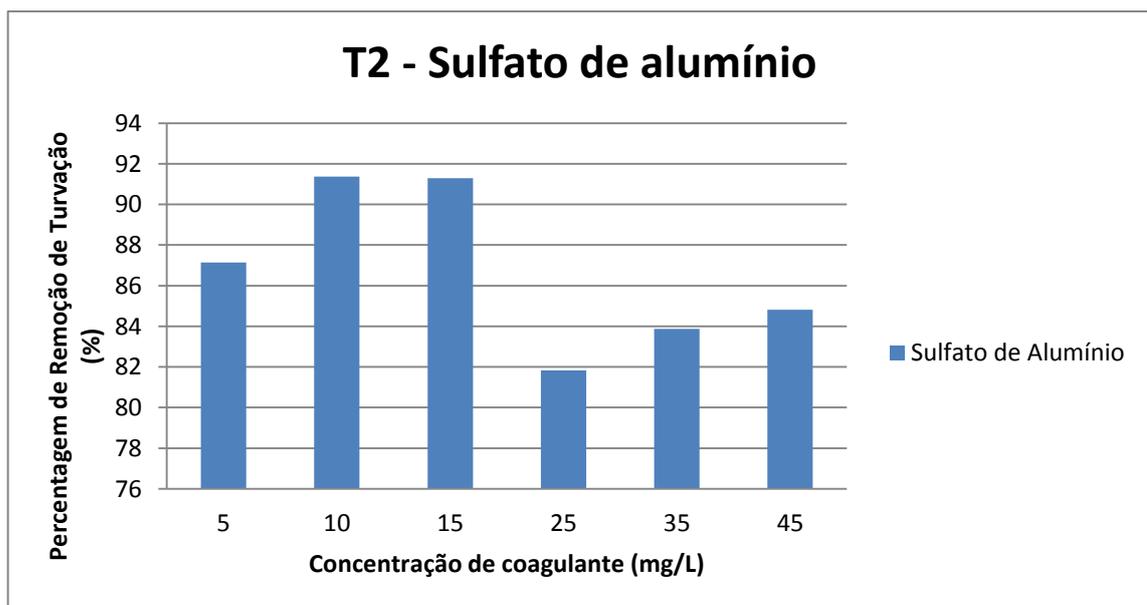


Figura 5.2 – Remoção da turvação (%), com sulfato de alumínio para o tempo de mistura T2

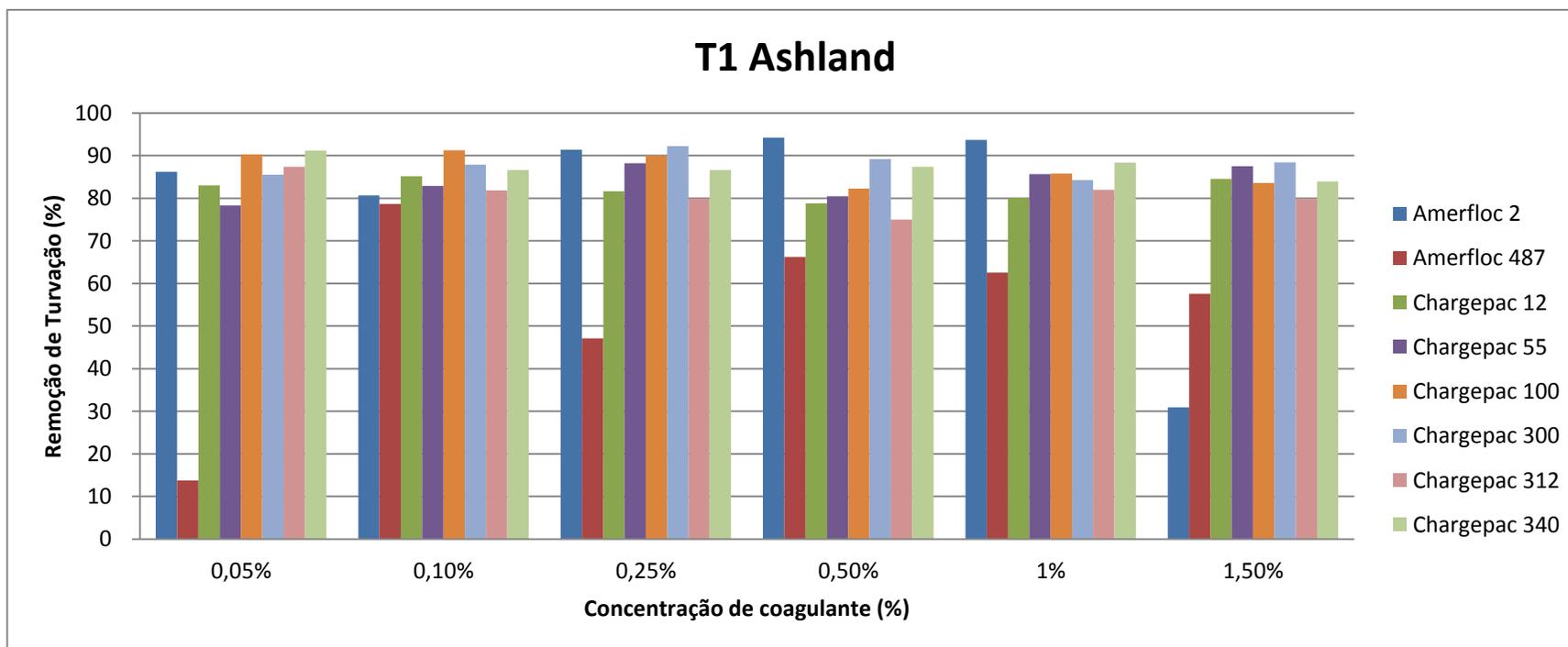


Figura 5.3 – Remoção da turvação para coagulantes polímeros com o tempo de mistura T1

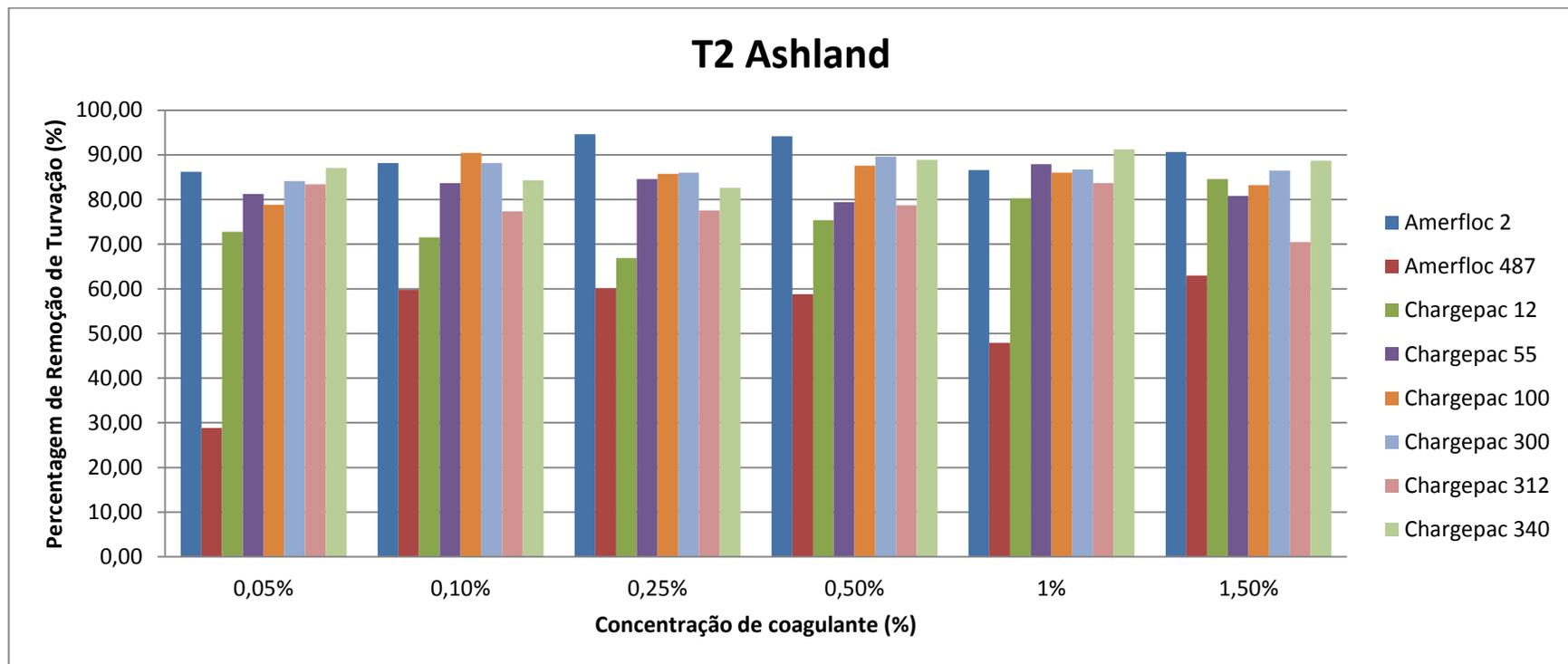


Figura 5.4 – Remoção da turvação para coagulantes polímeros com o tempo de mistura T2

Da análise dos gráficos anteriores, podemos retirar os seguintes quadros:

Quadro 5.7 – Valor da mediana para a % da remoção de turvação com o T1

<b>COAGULANTE</b>	<b>MEDIANA</b>
Amerfloc 2	88,81
Amerfloc 487	60,06
Chargepac 12	82,32
Chargepac 55	84,26
Chargepac 100	87,90
Chargepac 300	88,17
Chargepac 312	80,89
Chargepac 340	86,99
Sulfato de alumínio	91,50

Quadro 5.8 – Valor da mediana para a % da remoção de turvação com o T2

<b>COAGULANTE</b>	<b>MEDIANA</b>
Amerfloc 2	89,40
Amerfloc 487	59,31
Chargepac 12	74,07
Chargepac 55	82,47
Chargepac 100	85,89
Chargepac 300	86,58
Chargepac 312	78,10
Chargepac 340	87,89
Sulfato de alumínio	85,97

Fazendo uma análise recorrendo ao valor mediano, de modo a não contabilizar os valores mais díspares, e tendo em conta os melhores resultados de cada coagulante foi possível seleccionar o tempo T1 como o mais benéfico para a coagulação e para os resultados finais.

É possível também selecionar os coagulantes com o melhor comportamento:

- Amerfloc 2
- Chargepac 300
- Chargepac 100
- Chargepac 340
- Sulfato de alumínio

### 5.3.2 2ª Fase Experimental

Depois de selecionado o melhor tempo de mistura e restringido os coagulantes a cinco (4 polímeros e o sulfato de alumínio), foi efetuada uma segunda ronda de experiências.

Nesta fase todos os parâmetros foram controlados na água bruta e após a filtração, cujos resultados se encontram em anexo.

Seguidamente apresentam-se quadros resumo das experiências realizadas.

Quadro 5.9 – Eficiência da remoção da turvação (%) para turvação entre 10 a 15 NTU

Quantidade (%)	Remoção de Turvação (%)				
	Amerfloc 2	Chargepac 100	Chargepac 300	Chargepac 340	Sulfato de Alumínio
0,05	80,15	89,38	78,81	85,73	
0,1	60,13	81,42	55,12	71,65	
0,25	57,13	61,72	76,40	80,53	
0,5	86,93	75,88	62,11	70,61	
1	84,88	77,84	86,40	87,13	
1,5	86,32	78,51	62,19	76,75	
Quantidade (mg/L)					
10mg/L					93,82
12,5mg/L					87,63
20mg/L					86,37
30mg/L					86,60
40mg/L					91,06
45mg/L					93,21
50mg/L					93,60

Quadro 5.10 – Eficiência da remoção da turvação (%) para turvação entre 35 a 40 NTU

Quantidade (%)	Remoção de Turvação (%)				
	Amerfloc 2	Chargepac 100	Chargepac 300	Chargepac 340	Sulfato de Alumínio
0,1	42,71	95,17	96,54	93,37	
0,25	64,35	93,50	40,39	67,22	
0,5	72,40	65,00	65,37	70,84	
1	83,70	62,12	83,31	85,37	
1,5	71,87	56,27	79,01	81,24	
Quantidade (mg/L)					
10mg/L					58,96
12,5mg/L					93,35
20mg/L					99,12
30mg/L					97,75
40mg/L					94,05
45mg/L					92,44
50mg/L					96,45

Dos valores retirados de ambos os quadros anteriores pudemos resumir os resultados nos seguintes gráficos:

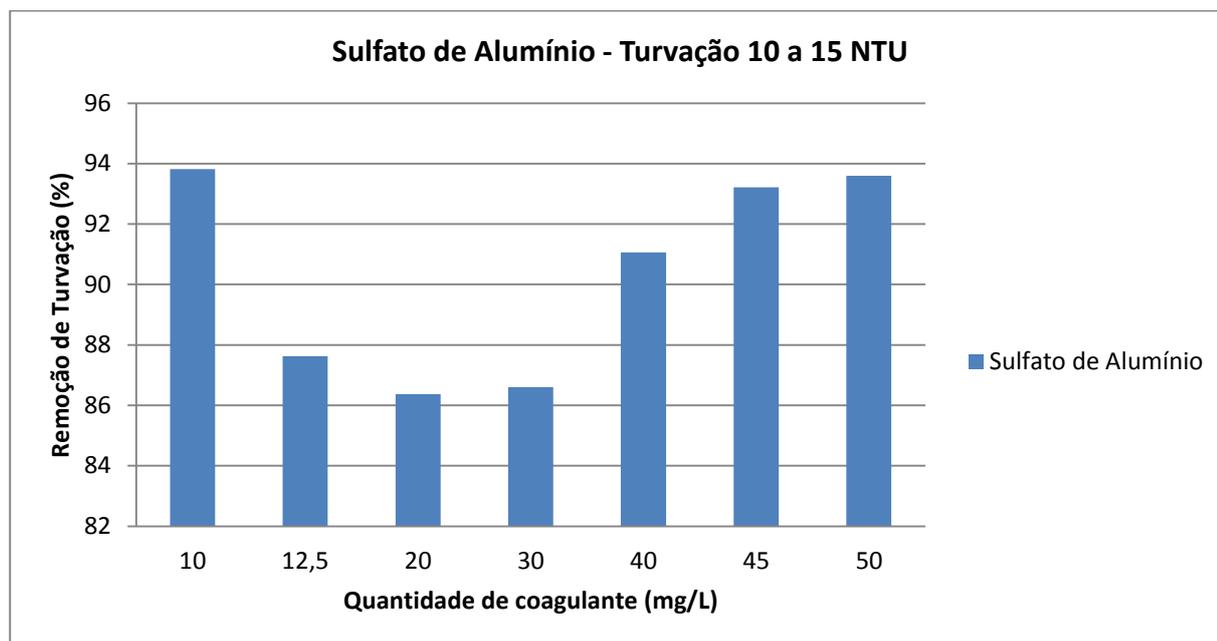


Figura 5.5 – Remoção da turvação (%), utilizando o sulfato de alumínio para a turvação entre 10 a 15 NTU

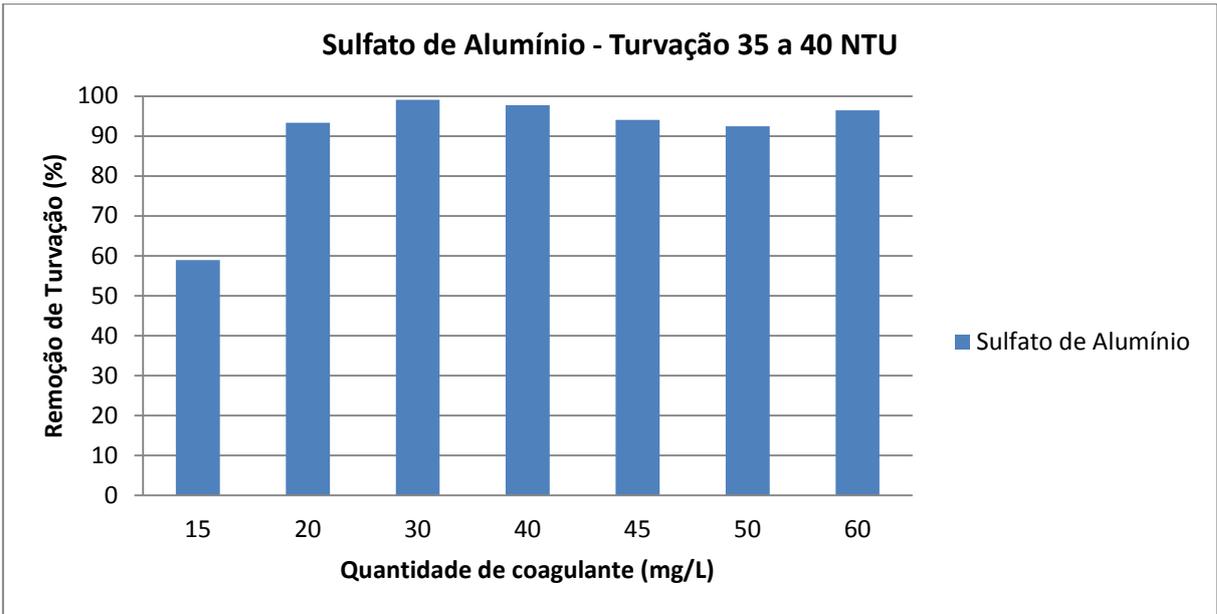


Figura 5.6 – Remoção da turvação (%), utilizando o sulfato de alumínio para a turvação entre 35 a 40 NTU

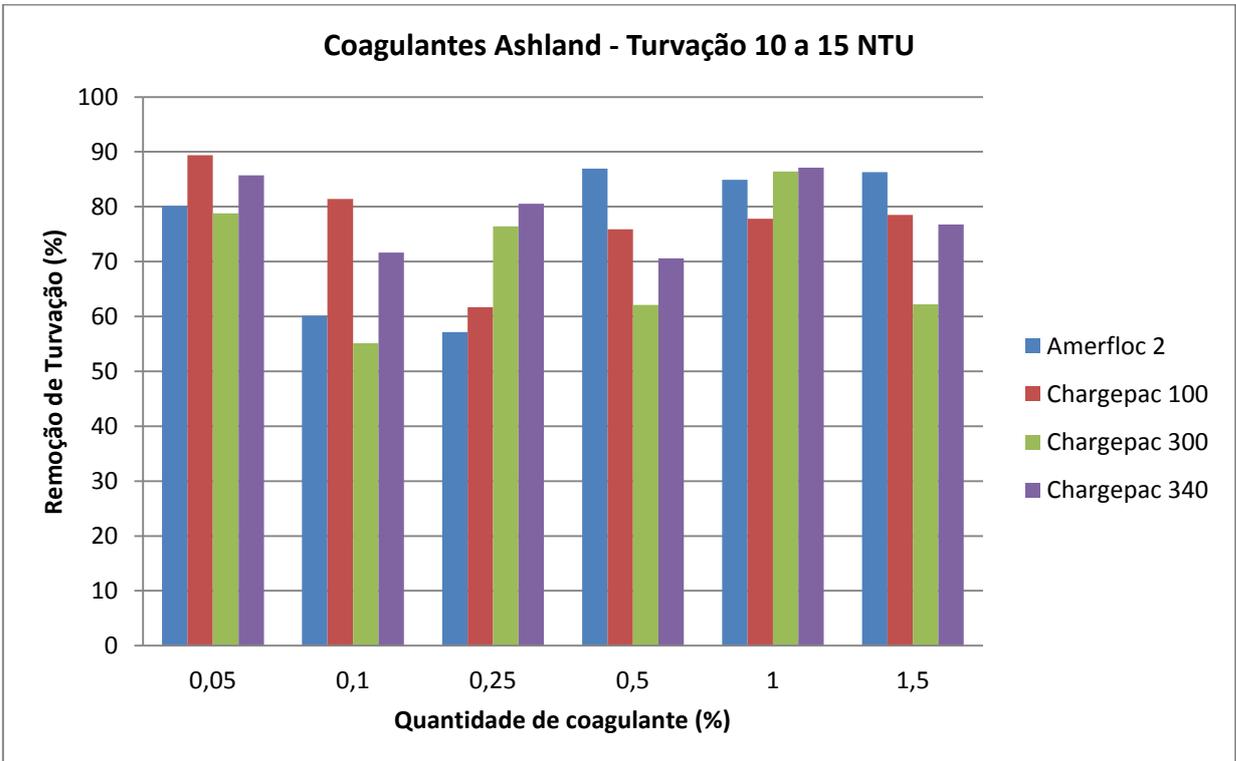


Figura 5.7 – Remoção da turvação (%), utilizando os coagulantes polímeros para a turvação entre 10 a 15 NTU

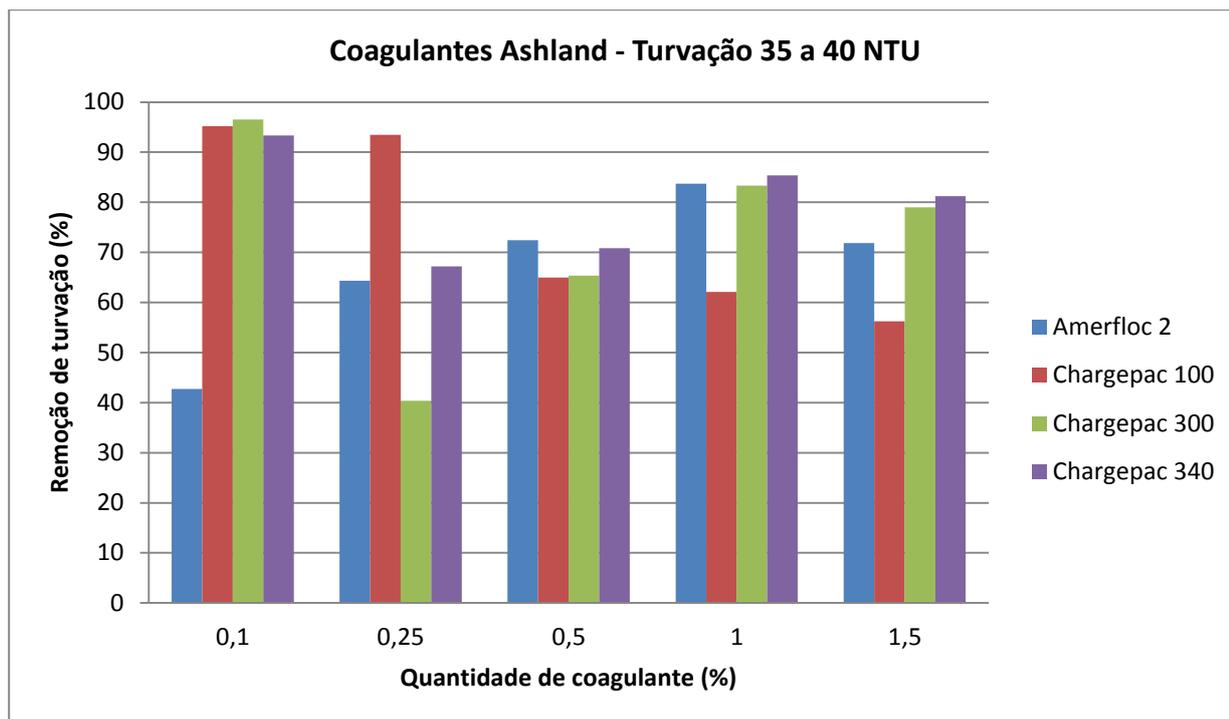


Figura 5.8 – Remoção da turvação (%), utilizando os coagulantes polímeros para a turvação entre 35 a 40 NTU

Analisando os gráficos podemos retirar as seguintes conclusões:

#### Sulfato de Alumínio

1. O sulfato de alumínio teve uma eficácia maior na remoção de turvação, quando a água se encontrava mais turva (entre os 35 e 40 NTU).
2. Para a faixa dos 10 a 15 NTU, a dosagem ótima de sulfato de alumínio foi de 10mg/L, atingindo uma turvação final de 0,77 NTU.
3. Para a faixa dos 35 a 40 NTU a dosagem ótima de sulfato de alumínio foi de 30mg/L, atingindo uma turvação final de 0,32 NTU.
4. Houve uma melhoria da qualidade dos resultados da 1ª Série de experiências para a 2ª série.

#### Coagulantes Polímeros

1. Também os coagulantes polímeros tiveram uma eficácia maior na remoção de turvação, quando a água se encontrava mais turva (entre os 35 e 40 NTU).

2. Para a faixa dos 10 a 15 NTU, o coagulante mais eficiente foi o Chargepac 100 com 0,05%, atingindo uma turvação final de 1,19 NTU.
3. Para a faixa dos 35 a 40 NTU, o coagulante mais eficiente foi o Chargepac 300 com 0,1%, atingindo uma turvação final de 1,24 NTU.
4. Houve um decréscimo da qualidade dos resultados da 1ª Série de experiências para a 2ª série.

Relativamente aos dados obtidos nas duas séries experimentais, pode-se constatar na 2ª série de experiências, houve na generalidade temperaturas mais baixas e pH mais altos, tendo piorado os valores de remoção de turvação dos coagulantes polímeros, enquanto os resultados do sulfato de alumínio, não sofreram com as condições diferentes, tendo até mesmo melhorado, especialmente na faixa de turvação dos 35 a 40NTU.

### 5.3.3 Alumínio Remanescente

Seguidamente foram realizadas as medições de alumínio. Com as águas brutas de 10 e 40 NTU de turvação, foi medido o alumínio presente, tendo sido feita nova medição apos a filtração. Foi também medida a turvação final. Os resultados apresentam-se no quadro seguinte.

Quadro 5.11 – Registo das medições de alumínio remanescente

Fotómetro Multiparâmetros HI 83200 da Hanna Instruments					Data 24-04-2013
Amostra em análise	Sulfato de aluminio (mg/L)	Turvação (NTU)	Al <sup>3+</sup> mg/L	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mg/L	
Água Bruta Turvação 10 NTU		10	0,06	0,12	
Água Turvação 10 NTU	10	0,72	0,04	0,08	
Água Bruta Turvação 40 NTU		40	0,04	0,08	
Água Turvação 40 NTU	30	0,53	0,02	0,03	

Quadro 5.12 – Resumo da remoção da turvação

<b>Remoção de Alumínio (%)</b>		
	$Al^{3+}$ mg/L	$Al_2O_3$ mg/L
Água Turvação 10 NTU	33,3%	33,3%
Água Turvação 40 NTU	50,0%	62,5%

A medição de alumínio remanescente mostrou-se dentro dos valores preconizados pelas normas portuguesas de 0,2 mg/L  $Al$ , quer na água bruta, quer na água após filtração. A adição de sulfato de alumínio para o processo de coagulação é bem contrabalançada com o processo de filtração, existindo uma boa percentagem de remoção de alumínio, como se pode verificar no Quadro 5.12.

Globalmente e da análise da medição do alumínio remanescente e da turvação atingida considera-se bastante efetiva o tratamento, atingindo em ambos os casos valores de 0,72 NTU e 0,53 NTU de turvação e valores de 0,04 e 0,02 mg/L para valores de 10 e 40 NTU iniciais, respetivamente.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Considerações Finais

O trabalho de investigação centrou-se no comparativo entre coagulantes polímeros disponíveis no mercado e o sulfato de alumínio, principal coagulante utilizado nos sistemas de tratamento de água atualmente.

O estudo de filtração direta descendente apresentou bons resultados na sua generalidade, atingindo valores de remoção de turvação acima dos 90%.

O sulfato de alumínio teve para uma turvação de 10 a 15 NTU uma dosagem ótima de 10mg/L. Para a faixa dos 35 a 40 NTU a dosagem ótima de sulfato de alumínio foi de 30mg/L, tendo atingido níveis de remoção de turvação na ordem dos 99,12%.

De todos os coagulantes polímeros disponíveis, foi o Chargepac 100 que atingiu melhor eficiência de remoção de turvação em águas com 10 a 15NTU, e o Chargepac 300 para as águas com 35 a 40NTU.

Denotou-se que os coagulantes polímeros tiveram uma perda de eficiência com temperaturas mais baixas e pH ligeiramente mais altos, na 2ª série de experiências.

Teve-se uma boa eficiência de remoção de alumínio remanescente, na casa dos 33 a 50%, conforme a turvação da água, tendo-se registado uma melhor remoção de alumínio para a água com turvação de 40NTU.

Conclui-se que sulfato de alumínio teve na sua generalidade uma melhor eficiência de remoção de turvação que os coagulantes polímeros, tendo tido também resultados mais constantes durante a série de experiências.

Este trabalho mostrou que o sistema coagulação/filtração pode ser um método muito eficiente na remoção de turvação, mas deverá ter-se em conta que necessita de uma monitorização constante das condições da água que podem facilmente afetar os valores da qualidade da água final, necessitando de ajustes rápidos das condições do tratamento. Não existindo uma situação de coagulação ótima, pode por um lado afetar a qualidade final do efluente, como

pode resultar em gastos de coagulante maiores que o necessário, sendo este equilíbrio e monitorização importante.

De acordo com as normas portuguesas no Decreto-Lei nº 306/2007 de 27 de Agosto em que o valor máximo de turvação admitido é de 1,0NTU, foi possível aferir que as dosagens ótimas de sulfato de alumínio ficaram abaixo do valor máximo, tendo os coagulantes polímeros ficado sempre acima do mesmo.

## **6.2 Possíveis trabalhos futuros**

De acordo com os resultados atingidos neste trabalho e nas dificuldades tidas durante a sua realização, pode-se sugerir recomendações para trabalhos futuros que envolvam a técnica de coagulação com filtração direta:

- Realizar experiências adicionais com os coagulantes polímeros, regulando o pH e a temperatura.
- Dever-se-ia realizar experiências adicionais com valores fixos de caudal, visto este ser um fator muito importante na eficiência do processo.
- Testar os coagulantes polímeros, não como primários, mas como auxiliares de coagulação, testando a possibilidade para minorar a produção de lamas residuais com presença de alumínio.
- Testar ao longo do tempo a eficiência do filtro até atingir a saturação.
- Testar granulometrias diferentes para a areia, e outros materiais como a antracite.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, S.B. - Comportamento de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento mediante o emprego de polímeros como auxiliares de filtração. São Paulo, Tese (Doutorado) – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2009.

Almeida, G. - Técnicas de Abastecimento e Tratamento de Água: Coagulação/Floculação. Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Universidade Nova de Lisboa (UNL), Lisboa, 2007.

*American Water Works Association – AWWA - A Handbook of Community Water Supplies*, 5ª ed; McGraw-Hill MWH, 1999.

Amirtharajah, A., Mills, K. M. - *Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. Journal AWWA*, v. 74, n. 4, 210-216, 1982.

Amirtharajah, A. - “Some theoretical and conceptual views of filtration.” *Journal of the American Water Works Association*, 80 (12), 36-46, 1988.

Bergamasco, R. *et al* - *Performance of a coagulation–ultrafiltration hybrid process for water supply treatment; Chemical Engineering Journal* 166 (2011) 483–489, 2011.

Bessa, M. - Avaliação da qualidade da água consumida no Parque Fluminense – enfoque para metais – Fe, Mg, Zn, Cl, Ni e Al - Duque de Caxias. Tese de Mestrado - Fiocruz, Rio de Janeiro, 1997.

Brum, M. C. - Remoção de Ácidos Húmicos da Água por Precipitação e Floculação com a Utilização de Sulfatantes Catiônicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

Carvalho, R. M. - Dissertação de Mestrado – Clarificação de Águas Pluviais Ricas em Óxidos de Ferro Acumulados em Cova de Mineração Através da Utilização de um Coagulante Natural, a Motinga Oleífera. Mestrado em Recursos Hídricos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

*Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente (CEPIS) - Filtración rápida – Manual II – Criterios de selección.* Peru: CEPIS/OPAS, 1992.

Cleasby, J.L. - “Filtration.” In: Pontius, F. W. (ed.) *Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies. 4<sup>a</sup> Edition.* American Water Work Association, McGraw Hill, Inc., E.U.A. 455-555, 1990.

Corbitt, R. A. - *Standard handbook of environmental engineering. 2nd ed.* Nova Iorque: McGraw-Hill, 1998.

Dalsasso, R.L.; Sens, M. L. - Filtração direta com pré-floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxiclreto de alumínio: Estudo com água de manancial eutrofizado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2003.

Decreto-Lei n° 149/2004 de 22 Junho de 2004 - altera o Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho, que transpôs para o direito interno a Diretiva 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio, relativa ao tratamento das águas residuais urbanas, e aprovou uma lista de identificação de zonas sensíveis e de zonas menos sensíveis, bem como respetivo mapa, constantes do anexo II ao referido diploma legal, 2004.

Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de Agosto de 2007 – Altera o Decreto -Lei n.º 243/2001, de 5 de Setembro, que transpôs para ordem jurídica interna a Directiva n.º 98/83/CE, do Conselho, de 3 de Novembro, relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano.

Di Bernardo, L.; Mendes, C. G. N. - Coagulação e filtração direta. *Revista DAE*, 6, 145, 202-208, 1986.

Di Bernardo, L.; Guimarães, A. F. ; Mendes, C. G. N. - Coagulação-floculação de água com turbidez ou cor elevada. Revista DAE, 47, 150, 227-239, 1987.

Di Bernardo, L. - Métodos e técnicas de tratamento de água. v. 1. Rio de Janeiro: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1993.

Di Bernardo, L. – Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento” – Rio de Janeiro: ABES, 1995.

Di Bernardo, L.; Centurione Filho, P. L. - Coagulação, floculação e flotação para remoção de algas. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Seguro, 2000.

Di Bernardo, L. - Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. São Carlos: RiMa. 2003.

Di Bernardo, L. - Parâmetros de projeto de unidades de floculação de estações de tratamento de água a partir de ensaios em equipamentos de jarreste. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Joinville, SC, 2003.

Di Bernardo, L. e Dantas, A, D. B. - Métodos e técnicas de tratamento de água. RiMa, v.1, 2ª Edição, São Carlos, SP, Brasil, 2005a.

Di Bernardo, L. e Dantas, A, D. B. - Métodos e técnicas de tratamento de água. RiMa, v.2, 2ª Edição, São Carlos, SP, Brasil, 2005b.

Ferreira, F. S. S.; Sobrinho, P. A. - Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água. Revista engenharia sanitária Ambiental, vol. 3, n. 3 e 4, 1997.

Fernandes, N. M. G. - Influência do pH de Coagulação e Dosagem de Sulfato de Alumínio na Remoção de Oocistos de *Cryptosporidium* por Filtração Direta Descendente. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

Fiekja, M. - *Effect of aluminium hydroxide administration on normal* – American Water Works Association. Varsóvia, Polónia, 1996.

Fletcher, I. *et al* – *Optimal coagulation control issues at surface water treatment works: Problems and a new solution. Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation - MED2002 Lisbon, Portugal, July 9-12, 2002.*

Franco, E. S. - *Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água*, 2009.

Gheraout, D. - *The hydrophilic/hydrophobic ratio vs. dissolved organics removal by coagulation - A review. Journal of King Saud University – Science*, 2013.

Gonçalves, R. *et al* - *Influência dos mecanismos de coagulação da água bruta na reciclagem de coagulantes em lodos de estações de tratamento de água*. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Trabalhos técnicos. Rio de Janeiro, ABES, 1997. p.14, 1997.

Gregory, D.; Carlson, K. - *Relationship of pH and Floc Formation Kinetics to Granular Media Filtration Performance; Environmental Science & Technology* 2003 37 (7), 1398-1403, 2003.

Guedes, C. D. - *Coagulação/Floculação de águas superficiais de minerações de ferro com turbidez elevada*. Tese de Doutorado. Degeo-em-Ufop. Ouro Preto, 2004.

Guedes, C. D. ; Pereira, J. G. - *Coagulação/Floculação de suspensões ricas em, óxidos de ferro por sulfato de alumínio*. Química Nova No.27 (5). pp. 715-719, 2004.

Hu *et al* - *Treatment of highly turbid water using chitosan and aluminum salts. Separation and Purification Technology* 104 (2013) 322–326, 2012.

*International Organization of Standardization - ISO 5667-3:2003 Water quality – Sampling: Part 3: Guidance on the preservation and handling of water samples, 2003.*

*International Organization of Standardization - ISO 5814:1990 - Water quality -- Determination of dissolved oxygen -- Electrochemical probe method, 1990.*

*International Organization of Standardization - ISO 7888:1985 - Water quality -- Determination of electrical conductivity, 1985.*

*International Organization of Standardization - ISO 10523:2008 Water quality – Determination of pH, 2008.*

Ives, K. J. - “Rapid filtration.” *Water Research*, 4, 201-223, 1970.

Ives, K. J. - *Capture mechanisms in filtration – The scientific basis of filtration. The Netherlands Nato Advanced Study Institute, 1975.*

Judd S. J.; Hillis P. - *Optimisation of combined coagulation and microfiltration for water treatment; School of Water Sciences, University of Cranfield, Bedfordshire, Water Technology Development Team, North West Water Limited, Huntington, Chester, UK; Wat. Res. Vol. 35, No. 12, pp. 2895–2904, 2001.*

Julio, M. *et al* - Avaliação da viabilidade técnica do emprego da tecnologia de filtração direta no tratamento da água bruta afluyente à Eta do município de Ponta Grossa/PR. *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*18 (1/2): 21 – 30, 2009.

Kawamura, S. - *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities. John Wiley & Sons, INC. New York, E.U.A., 2000.*

Krasner, S.W.; AMY, G. - *Jar-test evaluations of enhanced coagulation. Jour. AWWA, vol. 87, n.10, pp. 93-107, 1995.*

Konieczny, K. *et al* - *Coagulation - ultrafiltration system for river water treatment; Institute of Water and Wastewater Engineering, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland; Desalination* 240; pp. 151\_159, 2009.

Letterman, R. D.; Pero, R. W. - *Contaminants in polyelectrolytes used in water treatment. J. Amer. Water Works Assoc.* No.82 (11). pp. 87-97,1990.

Matilainen, A. *et al* - *Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. Advances in Colloid and Interface Science* 159 (2010) 189–197, 2010.

Máximo, V. A. - *Tratamento por coagulação-floculação dos lixiviados gerados no aterro da região metropolitana de Florianópolis / Vivian Alves Máximo; orientador Armando Borges de Castilhos Jr. – Florianópolis, 2007.*

Mendes, C. G. N. - *Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com cor e turbidez variáveis, Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade do Estado de São Paulo, 1989.*

Mccurdy, K.; Carlson, K.; Gregory, D. - *Floc morphology and cyclic shearing recovery. Comparison of alum and polyaluminum chloride coagulants. Water Research, Grã Bretanha, vol. 38, n.2, pp. 468-494, 2004.*

Mo, L.; Huang, X. - *Fouling characteristics and cleaning strategies in a coagulation/microfiltration combination process for water purification; Tsinghua University, Beijing; Desalination* 159 - 9 P, 2003.

Netto, J. M. Azevedo; Richter, C. A. - *Tratamento de Água – Tecnologia atualizada. Editora Edgard Blucher Ltda, Brasil; pp. 53 – 194, 1991.*

O'Melia, C. R. - *“Particles, pretreatment, and performance in water filtration.” Journal Environmental Engineering - ASCE, 111(6), 874-887, 1985.*

Pavanelli, G. - Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

Pawlowsky, U. - Tratamentos biológicos de águas residuárias. 1 ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Interior. 192 p, 1981.

Piantá, C. A.V. - Emprego de Coagulantes Orgânicos Naturais como Alternativa ao uso do Sulfato de Alumínio no Tratamento de Água. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Pritchard, M. *et al* - *A comparison between Moringa oleifera and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. Physics and Chemistry of the Earth* 35 (2010) 798–805, 2010.

Rodrigues, P. - Otimização do processo de Coagulação/Floculação química na ETA do Ferro. Águas do Douro e Paiva, 2004.

Santos, E. - Coagulação da água da Represa Vargem das Flores visando tratamento por filtração direta, 2004.

Sieliechi, J. M. *et al* - Effect of water treatment residuals (aluminum and iron ions) on human health and drinking water distribution systems. *International journal of conservation science*, Volume 1, Issue 3, July-September 2010: 175-182, 2010.

Silva, M. - Ensaio de coagulação floculação da água residual afluyente à Etar de Avis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.

Silva, T. - Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e de esgoto. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Escola de Saúde Pública. Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 1999.

Silveira A. - Remoção de algas da água da lagoa do peri através de filtração direta descendente com pré - filtração mecânica em micropeneiras. Dissertação de mestrado. Universidade Federal De Santa Catarina. Florianópolis, Sc – Brasil, 2003.

*Standard Methods - “9711 Pathogenic protozoa.” Microbiological Examination (9000), 9-161 – 9-168, 2001.*

Trindade, T.; Manuel, R. - Protocolo Experimental – Ensaio de Tratabilidade em Águas Residuais (Tratamentos Físico-Químicos: Coagulação/Floculação). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Química, pp 6-8, 2006.

Wiecheteck, G. K., Molina, F. R. O. e Di Bernardo, L. - “Influência do método de lavagem nas características de carvão antracitoso utilizado em meio filtrante”. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental- ABES, Foz do Iguaçu, Brasil, 1997.

Zahrim, A. Y. *et al* - *Coagulation with polymers for nanofiltration pre-treatment of highly concentrated dyes: A review. Desalination 266 (2011) 1–16, 2011.*

Zhonglian, Y.; Baoyu, G.; Qinyan, Y. - *Coagulation performance and residual aluminum speciation of Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> and polyaluminum chloride (PAC) in Yellow River water treatment; Shandong Key Laboratory of Water Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Ji’nan, China; Chemical Engineering Journal 165, 122–132, 2010.*

## **LISTA DE SITES CONSULTADOS**

<http://www.sulfatodealuminio.net/>

<http://repositorium.sdum.uminho.pt/>

<http://snirh.pt/>

<http://portaldagua.inag.pt/PT/Pages/Default.aspx>

<http://dqa.inag.pt/>

<http://www.apambiente.pt/>

<http://www.tratave.pt/sidva.html>

## **ANEXOS**

Anexo A - Análise granulométrica da areia usada

Anexo B - Registos das experiências

## Anexo A – Análise granulométrica da areia usada

Quadro A.1 – Quadro com granulometria da areia usada

Data: 05.12.2012		Local: Laboratório de Materiais - UM	
<b>Areia Mibal (0,25 - 1) mm</b>			
Massa seca total (kg)			0,588
Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa Passado
63	0,000	0,00	100
31,5	0,000	0,00	100
16	0,000	0,00	100
8	0,000	0,00	100
4	0,000	0,00	100
2	0,000	0,00	100
1	0,028	4,81	95
0,6	0,172	29,31	66
0,5	0,085	14,53	51
0,25	0,218	37,11	14
0,125	0,078	13,21	1
0,063	0,003	0,54	0
Resto	0,001	0,20	-
<b>Total</b>	0,587	100	-
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$		0,29%	<b>Observações:</b> ensaio válido (<1%)

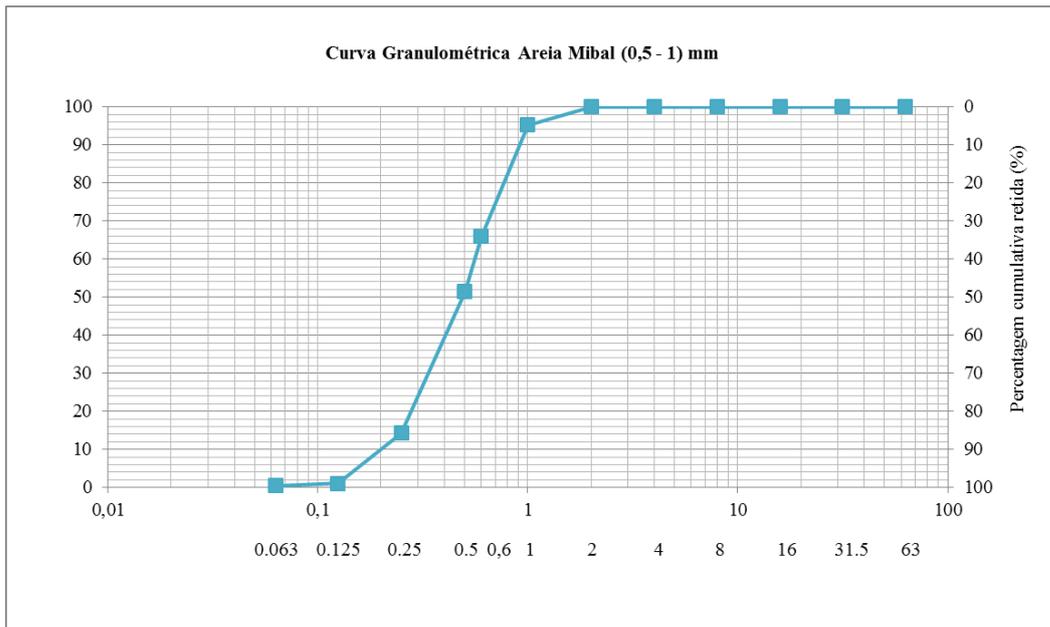


Figura A.1 – Curva Granulométrica da areia utilizada nos filtros

## Anexo B – Registos das experiências

Tempos de mistura utilizados no processo de coagulação/floculação no *Jar-Test*:

Quadro B.1 – Quadro com tempos de mistura T1 e T2

	Mistura Rápida (120RPM)	Mistura Lenta (30 RPM)
T1	1mn	20mn
T2	25s	10mn

Quadro B.2 - Resultados da 1ª série experiências (Tempo T1 e Turvação 10 NTU)

Coagulante	Tempo	Turvação Inicial (UNT)	T (°C)	PH	OD (mg/L)	OD%	Condutividade (µS/cm)	Coagulante (%)	Coagulante (mg/L)	Turvação Final (UNT)	Remoção de Turvação (%)
Amerfloc 2	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	0,05		1,43	86,21
Amerfloc 2	T1	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	45,70	0,1		1,80	80,67
Amerfloc 2	T1	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		0,90	91,41
Amerfloc 2	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,70	0,5		0,60	94,22
Amerfloc 2	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1		0,66	93,67
Amerfloc 2	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1,5		7,17	30,91
Amerfloc 487	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	0,05		8,94	13,79
Amerfloc 487	T1	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	45,70	0,1		1,98	78,70
Amerfloc 487	T1	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		5,52	47,09
Amerfloc 487	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,70	0,5		3,51	66,20
Amerfloc 487	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1		3,88	62,56
Amerfloc 487	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1,5		4,40	57,55
Chargepac 100	T1	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,05		1,01	90,29
Chargepac 100	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,1		1,00	91,26
Chargepac 100	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		1,14	90,00
Chargepac 100	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,5		2,02	82,28
Chargepac 100	T1	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1		1,43	85,81
Chargepac 100	T1	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1,5		1,66	83,60
Chargepac 12	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	0,05		1,76	83,00
Chargepac 12	T1	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	45,70	0,1		1,38	85,14
Chargepac 12	T1	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		1,92	81,63
Chargepac 12	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,70	0,5		2,20	78,82
Chargepac 12	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1		2,06	80,14
Chargepac 12	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1,5		1,61	84,51
Chargepac 300	T1	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,05		1,51	85,50
Chargepac 300	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,1		1,38	87,89
Chargepac 300	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		0,88	92,25
Chargepac 300	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,5		1,24	89,15
Chargepac 300	T1	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1		1,59	84,26
Chargepac 300	T1	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1,5		1,17	88,45
Chargepac 312	T1	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,05		1,32	87,38
Chargepac 312	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,1		2,07	81,84
Chargepac 312	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		2,29	79,94
Chargepac 312	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,5		2,85	75,00
Chargepac 312	T1	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1		1,82	82,01
Chargepac 312	T1	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1,5		2,04	79,83
Chargepac 340	T1	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,05		0,92	91,21
Chargepac 340	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,1		1,53	86,61
Chargepac 340	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		1,53	86,61
Chargepac 340	T1	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,5		1,44	87,37
Chargepac 340	T1	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1		1,18	88,35
Chargepac 340	T1	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1,5		1,62	83,93
Chargepac 55	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	0,05		2,25	78,31
Chargepac 55	T1	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	45,70	0,1		1,59	82,89
Chargepac 55	T1	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		1,23	88,18
Chargepac 55	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,70	0,5		2,03	80,43
Chargepac 55	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1		1,49	85,64
Chargepac 55	T1	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1,5		1,29	87,53
Sulf. Alu	T1	9,61	19,50	5,98	9,62	106,50	200,10		5	1,15	88,04
Sulf. Alu	T1	10,73	19,80	6,80	9,40	105,20	207,10		10	0,93	91,37
Sulf. Alu	T1	10,80	17,50	7,20	9,93	106,40	212,80		15	0,94	91,30
Sulf. Alu	T1	9,61	19,50	5,98	9,62	106,50	200,10		25	1,75	81,83
Sulf. Alu	T1	9,61	19,50	5,98	9,62	106,50	200,10		35	1,55	83,88
Sulf. Alu	T1	9,61	19,50	5,98	9,62	106,50	200,10		45	1,46	84,81

Quadro B.3 - de registo da 1ª série experiências (Tempo T2 e Turvação 10NTU)

Coagulante	Tempo	Turvação Inicial (UNT)	T (°C)	PH	OD (mg/L)	OD%	Condutividade (µS/cm)	Coagulante (%)	Coagulante (mg/L)	Turvação Final (UNT)	Remoção de Turvação (%)
Amerfloc 2	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	0,05		1,43	86,21
Amerfloc 2	T2	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	45,70	0,1		1,10	88,15
Amerfloc 2	T2	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		0,56	94,63
Amerfloc 2	T2	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	46,00	0,5		0,54	94,20
Amerfloc 2	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1		1,39	86,63
Amerfloc 2	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1,5		0,97	90,65
Amerfloc 487	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	0,05		7,38	28,86
Amerfloc 487	T2	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	45,70	0,1		3,74	59,79
Amerfloc 487	T2	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		4,16	60,13
Amerfloc 487	T2	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	46,00	0,5		3,83	58,83
Amerfloc 487	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1		5,41	47,88
Amerfloc 487	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1,5		3,84	63,01
Chargepac 100	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,05		2,41	78,83
Chargepac 100	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,1		1,09	90,44
Chargepac 100	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		1,63	85,73
Chargepac 100	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,5		1,42	87,57
Chargepac 100	T2	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1		1,41	86,04
Chargepac 100	T2	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1,5		1,69	83,23
Chargepac 12	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	0,05		2,82	72,78
Chargepac 12	T2	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	45,70	0,1		2,65	71,50
Chargepac 12	T2	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		3,45	66,90
Chargepac 12	T2	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	46,00	0,5		2,29	75,37
Chargepac 12	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1		2,05	80,27
Chargepac 12	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1,5		1,60	84,58
Chargepac 300	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,05		1,81	84,12
Chargepac 300	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,1		1,35	88,16
Chargepac 300	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		1,59	86,02
Chargepac 300	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,5		1,19	89,59
Chargepac 300	T2	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1		1,34	86,70
Chargepac 300	T2	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1,5		1,37	86,47
Chargepac 312	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,05		1,89	83,39
Chargepac 312	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,1		2,58	77,34
Chargepac 312	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		2,56	77,51
Chargepac 312	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,5		2,43	78,68
Chargepac 312	T2	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1		1,65	83,66
Chargepac 312	T2	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1,5		2,98	70,50
Chargepac 340	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,05		1,47	87,08
Chargepac 340	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,1		1,79	84,30
Chargepac 340	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		1,98	82,60
Chargepac 340	T2	11,40	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,5		1,27	88,89
Chargepac 340	T2	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1		0,88	91,25
Chargepac 340	T2	10,10	18,30	7,00	8,80	96,53	195,63	1,5		1,14	88,71
Chargepac 55	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	0,05		1,94	81,27
Chargepac 55	T2	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	45,70	0,1		1,52	83,67
Chargepac 55	T2	10,43	17,70	6,77	8,86	96,20	46,40	0,25		1,61	84,60
Chargepac 55	T2	9,31	19,60	6,77	8,09	91,90	46,00	0,5		1,91	79,45
Chargepac 55	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1		1,25	87,92
Chargepac 55	T2	10,37	19,30	6,77	8,28	92,90	45,00	1,5		1,99	80,82
Sulf. Alu	T2	10,73	19,80	6,80	9,40	105,20	207,10		5	0,77	92,86
Sulf. Alu	T2	10,73	19,80	6,80	9,40	105,20	207,10		10	0,80	92,52
Sulf. Alu	T2	10,80	17,50	7,20	9,93	106,40	212,80		15	0,77	92,84
Sulf. Alu	T2	10,80	17,50	7,20	9,93	106,40	212,80		25	1,14	89,41
Sulf. Alu	T2	10,80	17,50	7,20	9,93	106,40	212,80		35	1,14	89,48
Sulf. Alu	T2	10,80	17,50	7,20	9,93	106,40	212,80		45	0,60	94,48

Quadro B.4 – Quadro de registo da 2ª série experiências (Tempo T1 e Turvação de 10 a 15 NTU)

Parâmetros da Água Bruta								Parâmetros da Água após filtração											
Dia	Coleta Água Bruta	Turvação Inicial (NTU)	PH	Temperatura (°C)	Condutividade (µS/cm)	OD (mg/L)	%OD	Coagulante	Quantidade (%)	Quantidade (mg/L)	Tempo	Flocos	Turvação Final (NTU)	PH	Temperatura (°C)	Condutividade (µS/cm)	OD (mg/L)	%OD	% Remoção de turvação
09-11-2012	22-10-2012	11,23	7,27	18,60	181,73	7,27	79,00	2	0,05		T1	Inexistentes	2,23	7,12	19,30	241,70	9,40	104,90	80,15
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	2	0,10		T1	Mt pequenos	4,03	8,97	16,10	217,47	10,58	108,73	60,13
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	2	0,25		T1	Médios	4,33	5,20	15,70	244,00	10,73	108,63	57,13
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	2	0,50		T1	Excelentes/Bons	1,49	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	86,93
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	2	1,00		T1	Excelentes/Bons	1,72	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	84,88
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	2	1,50		T1	Excelentes/Bons	1,56	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	86,32
09-11-2012	22-10-2012	11,23	7,27	18,60	181,73	7,27	79,00	100	0,05		T1	Bons	1,19	7,12	19,30	241,70	9,40	104,90	89,38
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	100	0,10		T1	Médios	1,88	8,97	16,10	217,47	10,58	108,73	81,42
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	100	0,25		T1	Mt pequenos	3,87	5,20	15,70	244,00	10,73	108,63	61,72
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	100	0,50		T1	Inexistentes	2,75	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	75,88
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	100	1,00		T1	Mt pequenos	2,53	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	77,84
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	100	1,50		T1	Mt pequenos	2,45	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	78,51
09-11-2012	22-10-2012	11,23	7,27	18,60	181,73	7,27	79,00	300	0,05		T1	Bons	2,38	7,12	19,30	241,70	9,40	104,90	78,81
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	300	0,10		T1	Mt pequenos	4,53	8,97	16,10	217,47	10,58	108,73	55,12
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	300	0,25		T1	Mt pequenos	2,38	5,20	15,70	244,00	10,73	108,63	76,40
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	300	0,50		T1	Inexistentes	4,32	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	62,11
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	300	1,00		T1	Inexistentes	1,55	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	86,40
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	300	1,50		T1	Inexistentes	4,31	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	62,19
09-11-2012	22-10-2012	11,23	7,27	18,60	181,73	7,27	79,00	340	0,05		T1	Bons	1,60	7,12	19,30	241,70	9,40	104,90	85,73
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	340	0,10		T1	Inexistentes	2,86	8,97	16,10	217,47	10,58	108,73	71,65
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	340	0,25		T1	Inexistentes	1,97	5,20	15,70	244,00	10,73	108,63	80,53
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	340	0,50		T1	Inexistentes	3,35	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	70,61
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	340	1,00		T1	Inexistentes	1,47	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	87,13
11-12-2012	30-11-2012	11,40	7,38	14,10	181,37	10,09	101,57	340	1,50		T1	Inexistentes	2,65	6,73	14,60	194,30	10,97	106,40	76,75
29-11-2012	20-11-2012	12,47	7,20	12,30	182,13	10,43	99,80	Sulfato		10,00	T1	Excelentes	0,77	7,22	13,40	169,42	10,40	103,20	93,82
09-11-2012	22-10-2012	11,23	7,27	18,60	181,73	7,27	79,00	Sulfato		12,50	T1	Excelentes	1,39	7,12	19,30	241,70	9,40	104,90	87,63
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	Sulfato		20,00	T1	Médios	1,38	8,97	16,10	217,47	10,58	108,73	86,37
23-11-2012	20-11-2012	10,10	7,12	15,40	199,07	9,41	97,13	Sulfato		30,00	T1	Bons	1,35	5,20	15,70	244,00	10,73	108,63	86,60
23-11-2012	20-11-2012	15,40	7,26	14,50	190,47	10,50	105,60	Sulfato		40,00	T1	Médio	1,38	7,13	14,10	177,17	10,44	104,50	91,06
24-04-2013	23-04-2013	12,13	6,71	21,10	222,00	10,85	123,97	Sulfato		45,00	T1	Bons	0,82	6,36	20,60	218,90	10,60	122,60	93,21
24-04-2013	23-04-2013	12,13	6,71	21,10	222,00	10,85	123,97	Sulfato		50,00	T1	Excelentes	0,78	6,36	20,60	218,90	10,60	122,60	93,60

Quadro B.5 – Quadro de registo da 2ª série experiências (T1 e Turvação de 35 a 40 NTU)

Parâmetros da Água Bruta								Parâmetros da Água após filtração											
Dia	Coleta Água Bruta	Turvação Inicial (NTU)	PH	Temperatura (°C)	Condutividade (µS/cm)	OD (mg/L)	%OD	Coagulante	Quantidade (%)	Quantidade (mg/L)	Tempo	Flocos	Turvação Final (NTU)	PH	Temperatura (°C)	Condutividade (µS/cm)	OD (mg/L)	%OD	% Remoção de turvação
12-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	2	0,10		T1	Inexistentes	20,57	6,98	16,00	342,00	10,36	105,90	42,71
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	2	0,25		T1	Inexistentes	12,80	7,12	18,20	368,33	9,23	101,20	64,35
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	2	0,50		T1	Bom	9,91	9,45	18,10	411,33	9,34	102,47	72,40
20-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	2	1,00		T1	Excelente	5,85	4,64	17,00	1031,33	9,74	105,33	83,70
20-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	2	1,50		T1	Excelente	10,10	4,89	16,40	952,70	9,64	105,26	71,87
12-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	100	0,10		T1	Bons	1,73	6,98	16,00	342,00	10,36	105,90	95,17
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	100	0,25		T1	Excelente	2,33	7,12	18,20	368,33	9,23	101,20	93,50
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	100	0,50		T1	Bom	12,57	9,45	18,10	411,33	9,34	102,47	65,00
20-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	100	1,00		T1	Mt pequeno	13,60	4,64	17,00	1031,33	9,74	105,33	62,12
20-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	100	1,50		T1	Mt pequeno	15,70	4,89	16,40	952,70	9,64	105,26	56,27
12-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	300	0,10		T1	Bons	1,24	6,98	16,00	342,00	10,36	105,90	96,54
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	300	0,25		T1	Mt pequeno	21,40	7,12	18,20	368,33	9,23	101,20	40,39
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	300	0,50		T1	Mt pequeno	12,43	9,45	18,10	411,33	9,34	102,47	65,37
20-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	300	1,00		T1	Mt pequeno	5,99	4,64	17,00	1031,33	9,74	105,33	83,31
20-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	300	1,50		T1	Mt pequeno	7,54	4,89	16,40	952,70	9,64	105,26	79,01
12-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	340	0,10		T1	Bons	2,38	6,98	16,00	342,00	10,36	105,90	93,37
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	340	0,25		T1	Mt pequeno	11,77	7,12	18,20	368,33	9,23	101,20	67,22
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	340	0,50		T1	Mt pequeno	10,47	9,45	18,10	411,33	9,34	102,47	70,84
20-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	340	1,00		T1	Mt pequeno	5,25	4,64	17,00	1031,33	9,74	105,33	85,37
20-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	340	1,50		T1	Mt pequeno	6,73	4,89	16,40	952,70	9,64	105,26	81,24
12-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	Sulfato		15	T1	Inexistentes	14,73	6,98	16,00	342,00	10,36	105,90	58,96
12-12-2012	12-12-2012	40,47	7,65	12,60	191,53	15,10	99,60	Sulfato		20	T1	Bons	2,69	6,50	21,30	237,30	11,10	118,90	93,35
24-04-2013	23-04-2013	36,13	6,71	20,40	215,80	10,28	115,10	Sulfato		30	T1	Excelentes	0,32	6,50	21,30	237,30	11,10	118,90	99,12
24-04-2013	23-04-2013	36,13	6,71	20,40	215,80	10,28	115,10	Sulfato		40	T1	Bons	0,81	7,47	16,60	203,50	15,70	105,80	97,75
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	Sulfato		45	T1	Excelente	2,14	7,12	18,20	368,33	9,23	101,20	94,05
15-11-2012	12-11-2012	35,90	7,43	14,70	333,33	8,85	89,83	Sulfato		50	T1	Excelente	2,71	9,45	18,10	411,33	9,34	102,47	92,44
12-12-2012	12-12-2012	40,47	7,65	12,60	191,53	15,10	99,60	Sulfato		60	T1	Bons	1,44	7,47	16,60	203,50	15,70	105,80	96,45

