



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Carlos Machado Cruz Fonseca

DESEMPENHO DE  
SEDIMENTADORES PRIMÁRIOS EM ETAR

João Carlos Machado Cruz Fonseca DESEMPENHO DE SEDIMENTADORES PRIMÁRIOS EM ETAR

UMinho | 2012

Outubro de 2012





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João Carlos Machado Cruz Fonseca

DESEMPENHO DE  
SEDIMENTADORES PRIMÁRIOS EM ETAR

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

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professora Doutora Maria Manuela Carvalho de Lemos  
Lima

Outubro de 2012

## **RESUMO**

A sedimentação primária, principal operação do tratamento primário, é a mais antiga e mais utilizada operação unitária no tratamento de águas residuais. A sedimentação permite uma remoção significativa dos elementos constituintes de uma água residual, através do uso da força gravítica de uma forma simples, económica e prática.

Esta dissertação apresenta um contributo para o estudo em modelo físico da sedimentação de águas residuais. Foi utilizado um efluente laboratorial preparado a partir de uma mistura de água e caulino, para simular o comportamento de uma água residual no interior de um sedimentador primário. Utilizou-se um sedimentador circular de fluxo ascendente, com saída periférica através de descarregadores triangulares, com dimensões adequadas a uma instalação experimental. Estudou-se a influência no desempenho do sedimentador da concentração do efluente, da taxa de aplicação superficial e da utilização de pré-arejamento do efluente.

Verificou-se que a eficiência de remoção da sedimentação é superior para concentrações superiores do efluente. Para maiores taxas de aplicação superficiais foram observados rendimentos de remoção inferiores. O pré-arejamento do efluente não aumentou a eficiência de remoção da sedimentação, tendo sido observada maior variabilidade nos resultados, atribuída à turbulência em excesso observada nesses ensaios. Para maiores tempos de retenção a eficiência de remoção é superior. Os resultados obtidos experimentalmente permitiram validar a possibilidade de utilização de uma mistura de água e caulino como efluente laboratorial, e a determinação de concentrações através da determinação da massa de caulino presente na solução após evaporação das amostras.

### **Palavras chave:**

Sedimentação, Águas residuais, Eficiência de remoção, Modelo físico, Semelhança hidráulica



## **ABSTRACT**

Primary sedimentation, the main operation of the primary treatment, is the oldest and most widely operation unit used in the wastewater treatment. The sedimentation allows significant removal of the constituents from a wastewater, through the use of gravitational force in a simple, economic and practical way.

This dissertation presents a contribution to the study of wastewater sedimentation by means of modelling and similitude. A mixture of water and kaolin was used as a laboratory effluent to simulate the behaviour of wastewater within a sedimentation tank. An upflow circular sedimentation tank with peripheral v-notch weirs was used, with dimensions suited to an experimental installation. The influence of the effluent concentration, overflow rate and use of pre-aeration of the effluent were studied.

It was found that the removal efficiency of sedimentation is higher for higher concentrations of the effluent. The increase of overflow rates leads to a decrease of sedimentation removal yield. Pre-aeration of the effluent did not increase the removal efficiency of sedimentation and was observed a greater variability in the results attributed to excessive turbulence observed during the experiments. For higher detention times, the removal efficiency is higher. The experimental data allowed the validation of the possibility of using a mixture of water and kaolin as an laboratory effluent, and determination of concentrations by means of determining the mass of kaolin present in the solution after evaporation of the samples.

### **Key words:**

Sedimentation, Wastewater, Removal efficiency, Physical model, Hydraulic similitude



# ÍNDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....  | 1  |
| 1.1   | Interesse e enquadramento do tema .....                         | 1  |
| 1.2   | Objectivos .....  | 2  |
| 1.3   | Estrutura da Dissertação .....                                  | 2  |
| 2     | REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....                                  | 5  |
| 2.1   | Introdução .....  | 5  |
| 2.2   | Água residual .....   | 6  |
| 2.2.1 | Características da água residual doméstica .....                | 6  |
| 2.2.2 | Água residual sintética.....                                    | 8  |
| 2.3   | A sedimentação no tratamento de águas residuais.....            | 9  |
| 2.4   | Princípios físicos da sedimentação .....                        | 10 |
| 2.4.1 | Partículas discretas .....                                      | 10 |
| 2.4.2 | Sedimentação de partículas floculadas .....                     | 13 |
| 2.4.3 | Sedimentação em manto .....                                     | 15 |
| 2.4.4 | Sedimentação por compressão .....                               | 17 |
| 2.5   | Tipos de sedimentadores.....                                    | 17 |
| 2.5.1 | Sedimentador circular.....                                      | 17 |
| 2.5.2 | Sedimentador retangular.....                                    | 18 |
| 2.5.3 | Sedimentador quadrado .....                                     | 19 |
| 2.5.4 | Sedimentador tipo de lamelas.....                               | 19 |
| 2.6   | Critérios de dimensionamento de sedimentadores.....             | 21 |
| 2.7   | Desempenho de sedimentadores primários.....                     | 21 |
| 2.7.1 | Fenómenos que influenciam o rendimento de um sedimentador ..... | 22 |
| 2.7.2 | Parâmetros que influenciam o rendimento de um sedimentador..... | 25 |
| 2.7.3 | Análise do desempenho de um sedimentador.....                   | 28 |
| 2.8   | Estudo do desempenho de um sedimentador .....                   | 29 |
| 2.8.1 | Estudo em modelo real .....                                     | 29 |
| 2.8.2 | Estudo em modelo de simulação numérica .....                    | 29 |
| 2.8.3 | Estudo em modelo reduzido de processos de sedimentação .....    | 30 |
| 3     | MÉTODO EXPERIMENTAL .....                                       | 31 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.1   | Introdução.....   | 31 |
| 3.2   | Instalação Experimental .....   | 31 |
| 3.3   | Metodologia Experimental .....  | 32 |
| 3.3.1 | Método Simplificado.....  | 33 |
| 3.3.2 | Método segundo S. Clesceri et al (1999) .....   | 33 |
| 3.4   | Equipamento de Medida.....  | 34 |
| 4     | CONTRIBUTO PARA UM MODELO À ESCALA REDUZIDA .....   | 39 |
| 4.1   | Introdução.....   | 39 |
| 4.2   | Semelhança Hidráulica.....  | 39 |
| 4.3   | Análise da aplicabilidade do estudo .....   | 41 |
| 4.3.1 | Análise através da instalação laboratorial usada nesta dissertação.....                         | 41 |
| 4.4   | Conclusão .....   | 43 |
| 5     | AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SEDIMENTADOR PRIMÁRIO .....                                       | 45 |
| 5.1   | Introdução.....   | 45 |
| 5.2   | Condições Experimentais .....   | 45 |
| 5.3   | Resultados Experimentais .....  | 47 |
| 5.3.1 | Sem arejamento.....   | 47 |
| 5.3.2 | Com arejamento .....  | 51 |
| 5.3.3 | Discussão dos resultados.....   | 54 |
| 5.3.4 | Varição do rendimento para ensaios com uma duração igual a duas vezes o tempo de retenção ..... | 55 |
| 5.3.5 | Método de acordo com S. Clesceri et al. (1999).....   | 57 |
| 5.4   | Conclusões.....   | 59 |
| 6     | CONCLUSÃO.....  | 61 |
| 6.1   | Reflexões gerais e conclusões principais .....  | 61 |
| 6.2   | Sugestões para trabalhos futuros .....  | 62 |
|       | Bibliografia .....  | 63 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1- Relação entre o coeficiente de resistência e o número de Reynolds através da forma da partícula discreta (Encyclopædia Britannica) ..... | 11 |
| Figura 2.2- Floco agregado artificialmente através de coagulante de polímero orgânico (Metcalf & Eddy, 2002).....                                    | 14 |
| Figura 2.3- Sedimentador circular com poço central flocculante (Monroe Environmental) .....  | 15 |
| Figura 2.4- Teste de colunas de sedimentação (Metcalf & Eddy, 2002).....   | 16 |
| Figura 2.5- Gráfico que identifica as zonas de manto/compressão segundo a altura no tempo (Metcalf & Eddy, 2002).....                                | 16 |
| Figura 2.6- Interior sedimentador circular em perspectiva (Design Base).....   | 18 |
| Figura 2.7- Sedimentador retangular (Environmental Expert).....  | 19 |
| Figura 2.8- Sedimentador quadrado (Valley water) .....   | 19 |
| Figura 2.9- Corte de um sedimentador de lamelas (Huang, et al., 2008) .....  | 20 |
| Figura 2.10- Fases do desempenho de um sedimentador de lamelas (Leiblein) .....  | 20 |
| Figura 2.11- Simulação do curto-circuito hidráulico (NEFCO).....   | 23 |
| Figura 2.12- Gráfico do Flow Curve Test (WEF, 2005) .....  | 23 |
| Figura 2.13- Resultado de Dye Tracer Test (WEF, 2005).....   | 23 |
| Figura 2.14- Resultado de Drogue Current Test (WEF, 2005) .....  | 24 |
| Figura 2.15- Separador interior para sedimentadores circulares (WEF, 2005).....  | 26 |
| Figura 2.16- Gráfico que relaciona a concentração do efluente com a percentagem de remoção (WEF, 2005) .....   | 27 |
| Figura 2.17- Gráfico que relaciona a taxa superficial com o rendimento (WEF, 2005) .....   | 28 |
| Figura 2.18- Imagem da modelação de um sedimentador de lamelas (He, et al., 2008).....   | 30 |
| Figura 3.1 – Instalação experimental.....  | 31 |
| Figura 3.2- Sedimentador Primário .....  | 32 |
| Figura 3.3- Balança DEC.....   | 34 |
| Figura 3.4- Estufa DEC .....   | 35 |
| Figura 3.5- Balança AdW.....   | 35 |
| Figura 3.6- Estufa AdW .....   | 36 |
| Figura 3.7- Equipamento de Filtragem AdW .....   | 36 |
| Figura 3.8- Bomba de vácuo AdW .....   | 37 |
| Figura 5.1- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 1, 2 e 3 .....  | 48 |
| Figura 5.2- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 4, 5 e 6 .....  | 49 |
| Figura 5.3- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 7, 8 e 9 .....  | 50 |
| Figura 5.4- Variação dos rendimentos em função do tempo de retenção.....   | 50 |
| Figura 5.5- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 10,11 e 12 .....  | 51 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.6- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 13,14 e 15.....  | 52 |
| Figura 5.7- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 16, 17 e 18.....   | 53 |
| Figura 5.8- Gráfico que relaciona os rendimentos segundo o tempo de retenção .....  | 54 |
| Figura 5.9- Gráfico que relaciona o rendimento com a concentração para T.E./T.R.=2, para diferentes taxas superficiais em ensaios sem ar (SA) e com ar (CA) .....                 | 56 |
| Figura 5.10- Gráfico que relaciona o rendimento com a taxa superficial para T.E./T.R.=2 para diferentes concentrações em ensaios sem ar (SA) e com ar (CA) .....                  | 56 |
| Figura 5.11- Gráfico que relaciona o rendimento com a concentração para T.E./T.R.=2, para diferentes taxas superficiais em ensaios sem ar (SA) e com ar (CA) .....                | 58 |
| Figura 5.12- Gráfico que relaciona o rendimento com a taxa superficial para o segundo tempo de retenção, para diferentes concentrações em ensaios sem ar (SA) e com ar (CA) ..... | 58 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1- Composição típica de uma água residual bruta ((Metcalf & Eddy, 2002)..... | 7  |
| Tabela 2.2- Composição de uma água residual sintética ((Nopens, et al., 2001).....    | 8  |
| Tabela 4.1- Cálculo do tempo de retenção .....  | 46 |
| Tabela 4.2- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem.....                   | 47 |
| Tabela 4.3- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem.....                   | 48 |
| Tabela 4.4- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem.....                   | 49 |
| Tabela 4.5- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem.....                   | 51 |
| Tabela 4.6- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem.....                   | 52 |
| Tabela 4.7- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem.....                   | 53 |
| Tabela 4.8- Rendimento em percentagem para o segundo tempo de retenção.....           | 55 |
| Tabela 4.9- Rendimento em percentagem para o segundo tempo de retenção.....           | 57 |
| Tabela 5.1- Relação grandezas e escalas .....   | 41 |
| Tabela 5.2- Diâmetro de 0,08 metros .....   | 42 |
| Tabela 5.3- Diâmetro de 0,1metros .....   | 42 |
| Tabela 5.4- Diâmetro de 0,25 metros .....   | 42 |
| Tabela 5.5- Diâmetro de 0,5 metros .....  | 43 |
| Tabela 5.6- Diâmetro de 1 metro.....  | 43 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

CBO- Carência bioquímica de oxigénio

CQO- Carência química de oxigénio

AdW- Águas do Noroeste

DEC- Departamento de Engenharia Cível

CFD- Computational Fluid Dynamics

T.R.- Tempo de retenção

ETAR- Estação de tratamento de águas residuais

SST- Sólidos Suspensos Totais

TSe - Concentração de sólidos totais do efluente

TSa – Concentração de sólidos totais do afluente.

1-D – Uma dimensão

2-D – Duas dimensões

3-D – Três dimensões

## **SIMBOLOGIA**

$\Phi$  – Factor de forma das partículas

$\lambda$  – Escala da grandeza velocidade média de um escoamento

$\lambda_1$  – Escala geométrica

$\rho$  – Massa volúmica da água

$\rho_p$  – Massa específica da partícula

$\rho_s$  – Massa volúmica do floco

$\rho_w$  – Massa específica do fluido

$\nu$  – Viscosidade cinemática do fluido

$A$  – Área da secção

$A$  – Área superficial

$A_p$  – Área projetada da partícula na direção do movimento

$B$  – Largura do sedimentador retangular

$C_d$  – Coeficiente de resistência

$d$  – Diâmetro da partícula ou floco

$d$  – Diâmetro das partículas

$d_p$  – Diâmetro da partícula

$f$  – Coeficiente de resistência

$F_D$  – Força de resistência

$F_G$  – Força gravítica

$Fr$  – Número de Froude

$(Fr)_m$  – Número de Froude do modelo

$(Fr)_p$  – Número de Froude do protótipo;

$g$  – Aceleração da gravidade

$H$  – Profundidade do sedimentador rectangular

$H$  – Profundidade da coluna de sedimentação

$h_0$  – Altura da coluna

$H_2$  – Altura da lama no tempo  $t_2$

$H_t$  – Altura da lama no tempo  $t$

$H_\infty$  – Altura da lama após um longo período, por exemplo. 24 h

$i$  – Constante para uma determinada suspensão.

$K$  – Coeficiente em função das características da água e dos químicos envolvidos

$K$  – Constante função do tipo de material

$l$  – Comprimento característico

$l_m$  – Grandeza linear no modelo

$l_p$  – Grandeza linear correspondente no protótipo

$N$  – Azoto

$P$  – Fósforo

$pH$  – Simétrico do logaritmo de base 10 da concentração dos iões de  $H^+$

$Q$  – Caudal

$q_0$  – Taxa superficial

$s$  – Densidade das partículas

$T_C$  – Tempo necessário para uma de determinada percentagem de remoção

$t_u$  – Tempo necessário para alcançar a concentração de sólidos preconizada

$U$  – Velocidade média de um escoamento

$V_c$  – Velocidade de sedimentação

$V_H$  – Velocidade de re-suspensão

$V_p$  – Volume da partícula

$V_p$  – Velocidade de sedimentação da partícula





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Interesse e enquadramento do tema

O principal objetivo do tratamento das águas residuais é a proteção da saúde pública, de uma forma compatível com preocupações ambientais, económicas, sociais e políticas. Desta forma, o desenvolvimento económico de um país, que terá como fim último a promoção do bem-estar dos seus cidadãos, é indissociável da proteção do meio ambiente. Esta assume especial relevo face ao aumento de resíduos sólidos e líquidos que o desenvolvimento industrial acarreta, assim como o aumento do nível de vida das populações. Em certos países, o desenvolvimento económico resulta igualmente de uma aposta no turismo, a qual acarreta preocupações acrescidas com o meio ambiente. Desta forma se conclui sobre a importância que o tratamento de águas residuais deve assumir no desenvolvimento de uma política de proteção ambiental. Em Portugal tem-se assistido a um franco desenvolvimento do tratamento de águas residuais, inserido numa agenda da União Europeia sobre esta temática.

O tratamento das águas residuais é baseado numa conceção integradora de diversos equipamentos inseridos num circuito hidráulico, projetado em função da quantidade da água residual, da sua origem e do seu uso final. O tratamento das águas residuais é efetuado em estações de tratamento de águas residuais (ETAR), nas quais a água residual é sujeita a um circuito de tratamento que pode corresponder a três níveis de tratamento:

- Tratamento Primário
- Tratamento Secundário
- Tratamento Terciário

O tratamento primário permite que os componentes sólidos da água residual sejam removidos através de operações físicas como a sedimentação dos constituintes sedimentáveis de uma água residual no interior de um sedimentador, possibilitando uma remoção significativa da concentração de sólidos suspensos e da carência bioquímica de oxigénio (CBO) de uma água residual. A sedimentação constitui uma solução económica, de fácil operação e manutenção para uma fase inicial do tratamento da água residual e fornece uma proteção adicional dos processos de tratamento secundário e terciário posteriores. O desempenho dos sedimentadores depende das condições assumidas no projeto, opções construtivas e eventuais intervenções

futuras na estação de tratamento de águas residuais. O estudo do desempenho e da eficiência da sedimentação tem como objetivo a otimização de funcionamento destes órgãos através de:

- Estudo de casos reais
- Estudo em modelo reduzido
- Estudo em modelo numérico

O estudo em modelo reduzido, escolha feita nesta dissertação, apresenta a vantagem de permitir analisar a sedimentação de águas residuais em experiências laboratoriais simples e semelhantes à realidade. Os resultados assim obtidos possibilitam ainda a validação de estudos em modelo numérico. Comparativamente ao estudo de casos reais, o estudo em modelo reduzido é usualmente mais simples, permitindo a seleção dos parâmetros tidos como determinantes no desempenho de um sedimentador, o que dificilmente acontecerá em casos reais.

Por estas razões, se conclui sobre o interesse de estudar experimentalmente em modelo reduzido o fenómeno da sedimentação primária de águas residuais.

## **1.2 Objectivos**

Pretende-se com a presente dissertação efetuar o estudo do desempenho de um sedimentador primário de uma ETAR, função dos diversos parâmetros que influenciam a sedimentação da matéria em suspensão em águas residuais. A dissertação assenta na análise por via experimental do fenómeno de sedimentação, recorrendo a um modelo reduzido de um sedimentador inserido numa instalação laboratorial.

Pretendeu-se desenvolver um método experimental que permita a avaliação da eficiência da sedimentação. Uma vez estabelecido este método experimental, ele poderá ser adotado para propor alterações ao funcionamento de sedimentadores de maneira a otimizar o seu funcionamento.

## **1.3 Estrutura da Dissertação**

Incluindo a presente introdução, esta dissertação está organizada em 6 capítulos.

No capítulo 2 apresenta-se a revisão do estado da arte relativa à sedimentação de águas residuais.

No capítulo 3 são expostos os métodos experimentais e os instrumentos usados para obter os resultados experimentais.

O capítulo 4 é constituído por um estudo da viabilidade de utilização de um modelo à escala reduzida, para analisar experimentalmente o fenómeno da sedimentação primária em ETAR.

A avaliação experimental do desempenho de um sedimentador primário é apresentada no capítulo 5, com a recolha e estudo dos resultados obtidos na instalação laboratorial.

No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões da dissertação e algumas propostas de trabalho futuro.



## **2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE**

### **2.1 Introdução**

As águas residuais são, desde tempos remotos, objeto de cuidado das sociedades mais evoluídas. Este cuidado permite diferenciar no patamar civilizacional as sociedades. De facto, desde a Antiguidade que o Homem sabe que a separação entre a água residual e a água para consumo humano, e o destino final das águas residuais, está relacionado com questões de saúde pública. O défice de higiene e das condições sanitárias gerais acarretou sempre problemas muito graves para as sociedades que não tinham este cuidado, o que pode ser historicamente comprovado (HDR, 2006).

Provir as cidades unicamente de um sistema de esgotos com descarga no curso de água próximo, revelou-se insuficiente, dado que as populações vizinhas ficavam sujeitas aos poluentes contidos nas águas residuais, que punham em risco a sua saúde pública (Steel & McGhee, 1979). Esta noção surge com a Revolução Industrial, e acompanha o aumento exponencial do número de habitantes nas cidades, assim como os problemas associados às águas residuais de origem industrial. Nasce assim a Engenharia Sanitária e o tratamento das águas residuais.

O tratamento de águas residuais é efetuado em estações de tratamento de águas residuais, através da conjugação de diversas operações e processos unitários num circuito hidráulico. As operações unitárias correspondem a métodos de tratamento com base em fenómenos físicos, como é o caso da sedimentação. Por seu lado, os processos unitários correspondem a métodos de tratamento com base em reações químicas ou biológicas. O nível de tratamento a adotar é definido em função da quantidade e qualidade da água residual a tratar, da população equivalente correspondente e do meio hídrico onde se fará a rejeição da água residual tratada. Assim pode adotar-se um tratamento primário onde a sedimentação permite retirar parcialmente os sólidos presentes na água residual, seguido de um tratamento secundário onde processos biológicos e químicos são usados para remover grande parte da matéria orgânica, tendo por fim o tratamento terciário onde se faz a desinfecção e remoção de azoto e fósforo.

Existem de uma forma geral dois tipos de tratamento secundário que caracterizam o tipo de ETAR: tratamento biológico em suspensão (lamas ativadas e lagoas de estabilização) e tratamento biológico em suporte fixo (leitões percoladores e discos biológicos). Assim sendo, a escolha do tipo de tratamento secundário vai condicionar o tratamento primário, numa visão integrada e dinâmica. No caso das lamas ativadas, a sedimentação primária é a geralmente

adotada, exceto nos casos em que se trata de uma água residual produzida por uma pequena população equivalente. Neste caso em vez do sedimentador primário pode-se utilizar um tanque Imhoff, equipamento que faz a remoção de sólidos suspensos por sedimentação com digestão anaeróbica das lamas produzidas. No caso dos leitos percoladores e discos biológicos, adota-se a sedimentação primária, havendo que ter cuidado para que o efluente à saída do tratamento primário não tenha uma velocidade elevada que provoque o arrasto do filme biológico existente na superfície do meio de suporte físico deste tipo de tratamento. No tratamento através de lagoas de estabilização a sedimentação ocorre de uma forma natural, pois as lagoas atuam também como grandes sedimentadores.

## **2.2 Água residual**

A água residual varia na sua composição devido à sua origem, (Metcalf & Eddy, 2002) sendo esta essencialmente:

- Doméstica, água residual que advém de residências e de instalações comerciais e institucionais.
- Industrial, água residual com predominância de origem de indústrias.
- Pluvial, água residual com origem na chuva ou degelo.
- Infiltrada, água residual que sofreu uma significativa alteração devido a infiltrações no sistema de esgotos através de fendas, paredes porosas e da água das chuvas.

O tamanho, forma e densidade das partículas da água residual afetam o rendimento da sedimentação (Tillman, 1992), pois se a água residual contiver grandes quantidades de partículas de pequena dimensão o rendimento é reduzido dado que o tratamento primário é concebido para remover partículas de maior dimensão e com maior densidade.

### **2.2.1 Características da água residual doméstica**

A composição de uma água residual típica está presente na tabela 2.1 de acordo com Metcalf & Eddy (2002). A tabela apresenta valores para uma concentração fraca, encontrada com base numa capitação de  $750 \text{ L.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ . As concentrações média e forte correspondem a capitações de  $460$  e  $240 \text{ L.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ . Chama-se a atenção para o facto destes dados corresponderem aos Estados Unidos da América, com capitações muito superiores aos nosso

país. Em Portugal os valores de concentração tendem a ser superiores, situando-se entre a concentração média e forte (tabela 2.1).

Tabela 2.1- Composição típica de uma água residual bruta ((Metcalf & Eddy, 2002)

| Contaminantes  | Unidades  | Concentração                     |                                  |                                  |
|--|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|  |           | Fraca                            | Média                            | Forte                            |
| Sólidos Totais (ST)  | mg/L      | 350                              | 720                              | 1200                             |
| Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)                               | mg/L      | 250                              | 500                              | 850                              |
| Fixos  | mg/L      | 145                              | 300                              | 525                              |
| Voláteis   | mg/L      | 105                              | 200                              | 325                              |
| Sólidos suspensos (SST)  | mg/L      | 100                              | 220                              | 350                              |
| Fixos  | mg/L      | 20                               | 55                               | 75                               |
| Voláteis   | mg/L      | 80                               | 165                              | 275                              |
| Sólidos Sedimentáveis  | mL/L      | 5                                | 10                               | 20                               |
| Carência Bioquímica de Oxigénio aos 5 dias (CBO <sub>5</sub> ) | mg/L      | 110                              | 220                              | 400                              |
| Carbono Orgânico Total (COT)                                   | mg/L      | 80                               | 160                              | 290                              |
| Carência Química de Oxigénio (CQO)                             | mg/L      | 250                              | 500                              | 1000                             |
| Azoto (N)  | mg/L      | 20                               | 40                               | 85                               |
| Fósforo (P)  | mg/L      | 4                                | 8                                | 15                               |
| Cloretos   | mg/L      | 30                               | 50                               | 100                              |
| Sulfatos   | mg/L      | 20                               | 30                               | 50                               |
| Alcalinidade   | mg/L      | 50                               | 100                              | 200                              |
| Gorduras   | mg/L      | 50                               | 100                              | 150                              |
| Coliformes Totais  | NMP/100mL | 10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup> | 10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup> | 10 <sup>8</sup> -10 <sup>9</sup> |
| Compostos orgânicos voláteis (COV)                             | µg/L      | <100                             | 100-400                          | >400                             |

### 2.2.2 Água residual sintética

É possível utilizar em laboratório uma água residual sintética (Torres Lozada, et al., 1998), conforme se apresenta na tabela 2.2, que pode ser feita em laboratório, o que tem a vantagem do investigador não necessitar de ir a uma ETAR, evitando as dificuldades de ordem prática existentes quando se trabalha com uma água residual real. A conceção desta assenta no estudo pretendido pelo investigador pois pode simular todas as componentes de uma água residual real (Nopens, et al., 2001) ou apenas certas componentes. No caso de só se pretender estudar a sedimentação das partículas, pode-se simular uma água residual recorrendo a uma mistura de água com argila (Yoon & Lee, 2000).

Tabela 2.2- Composição de uma água residual sintética (Nopens, et al., 2001)

| Compostos Químicos                                   | Concentração | CQO        | N      | P      |
|--|--------------|------------|--------|--------|
|  | [mg/L]       | [mg/L]     | [mg/L] | [mg/L] |
| Ureia  | 91.74        | 23.22      | 42.81  | 0      |
| NH <sub>4</sub> Cl                                   | 12.75        | 0          | 3.52   | 0      |
| Na-acetate   | 79.37        | 79.37      | 0      | 0      |
| Na-acetate.3H <sub>2</sub> O                         | 131.64       | 79.37      | 0      | 0      |
| Peptona  | 17.41        | 17.41      | 0,67   | 0      |
| MgHPO <sub>4</sub> .3H <sub>2</sub> O                | 29.02        | 0          | 0      | 5,14   |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                      | 23.4         | 0          | 0      | 3,14   |
| FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O                 | 5.80         | 0          | 0      | 0      |
| <b>Compostos Alimentares</b>                         |              |            |        |        |
| Amido  | 122.00       | 122.00     | 0      | 0      |
| Leite em pó  | 116.19       | 116.19     | 6,95   | 1,14   |
| Óleo de Soja   | 52.24        | 52.24      | 6,28   | 0      |
| Levedura   | 29.02        | 29.02      | 0      | 0      |
| <b>Total</b>   |              | 439,7      | 60,23  | 9,42   |
| <b>Resíduos Metálicos</b>                            | mg/L         | mg metal/L | X      |        |
| Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> .9H <sub>2</sub> O | 0.770        | 0.100      |        |        |
| CuCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O                 | 0.536        | 0.200      |        |        |
| MnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O                  | 0.108        | 0.035      |        |        |
| NiSO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O                 | 0.336        | 0.075      |        |        |
| PbCl <sub>2</sub>                                    | 0.100        | 0.075      |        |        |
| ZnCl <sub>2</sub>                                    | 0.208        | 0.100      |        |        |

### **2.3 A sedimentação no tratamento de águas residuais**

A sedimentação primária, principal operação do tratamento primário, é a mais antiga e mais utilizada operação unitária no tratamento de águas residuais (WEF, 1992).

A sedimentação é a operação pela qual é processada a remoção de partículas sólidas em suspensão com densidade superior à da água. O conceito baseia-se na simplicidade do uso da força gravítica e dá resposta a uma remoção significativa da carência bioquímica de oxigénio (25% -40% em sedimentação primária) (Metcalf & Eddy, 2002), sólidos suspensos (60-75%), organismos patogénicos, cor, odores, turvação, minerais dissolvidos e compostos químicos perigosos. De acordo com WEF (1992), historicamente a sedimentação primária tem sido menosprezada quer a nível de investigação, quer a nível de projeto. Isto acontece em especial se se prevê a adoção de um processo de tratamento secundário, que possa compensar eventuais deficiências no desempenho do sedimentador primário. No entanto, o investimento numa sedimentação primária adequada traduz-se numa economia significativa de recursos ao longo da vida útil da ETAR. De facto, a sedimentação garante vantagens energéticas e de operacionalidade ao sistema de tratamento de água e protege os processos a jusante, devido ao facto de homogeneizar a carga poluente e equalizar o caudal de água residual.

Numa ETAR a sedimentação ocorre no sedimentador. As suas tipologias, tamanho e forma são função da dimensão da ETAR, das normas e regulamentos das autoridades locais, das condições do local e da experiência e conhecimento técnico do engenheiro projetista (Metcalf & Eddy, 2002).

A sedimentação divide-se em sedimentação primária e secundária, que apesar de obedecerem ao mesmo princípio físico, se distinguem na sua função no processo de tratamento de águas residuais, o que se traduz em algumas diferenças na forma e operação dos sedimentadores.

A sedimentação primária tem como principal objetivo a remoção dos sólidos suspensos totais e correspondente CBO. Desta forma consegue-se aumentar a eficiência do tratamento secundário a jusante, por este ficar sujeito a cargas poluentes inferiores. A sedimentação secundária, situada a jusante do tratamento biológico, atua no seu afluente de forma a sedimentar as lamas secundárias, ricas em microrganismos para criar um efluente límpido.

## 2.4 Princípios físicos da sedimentação

Existem quatro tipos de sedimentação: sedimentação de partículas discretas, de partículas floculadas, em manto e em compressão.

### 2.4.1 Partículas discretas

A sedimentação de partículas discretas obedece exclusivamente às propriedades físicas da água residual e características da partícula isolada, propriedades que são parâmetros das forças que solicitam a partícula em movimento descendente, força gravítica e força de resistência.

Força gravítica:

$$F_G = (\rho_p - \rho_w)gV_p \quad (2.1)$$

em que:

$F_G$ [N] é a força gravítica;

$\rho_p$  [Kg m<sup>-3</sup>] é a massa específica da partícula;

$\rho_w$  [ms<sup>-2</sup>] é a massa específica do fluido;

$g$  [ms<sup>-2</sup>] é a aceleração da gravidade;

$V_p$ [m<sup>3</sup>] é o volume da partícula.

Força de resistência:

$$F_D = \frac{C_d A_p \rho_w V_p^2}{2} \quad (2.2)$$

em que:

$F_D$  [N] é a força de resistência;

$C_d$ [---] é o coeficiente de resistência;

$A_p$ [m<sup>2</sup>] é a área projetada da partícula na direção do movimento;

$V_p$  [ms<sup>-1</sup>] é a velocidade de sedimentação.

Através da igualdade das expressões acima referenciadas temos, para partículas esféricas, a lei de Newton. Este cálculo é de natureza iterativa dado o facto do coeficiente de resistência  $c_d$  variar com o regime de escoamento em torno da partícula (figura 2.1), logo depende do número de Reynolds do escoamento e consequentemente da velocidade de sedimentação.

A velocidade de sedimentação é igual a:

$$V_p = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho_w)d_p}{3c_d\rho_w}} \quad (2.3)$$

em que:

$V_p[\text{ms}^{-1}]$  é velocidade de sedimentação da partícula

$d_p$  [mm] é o diâmetro da partícula

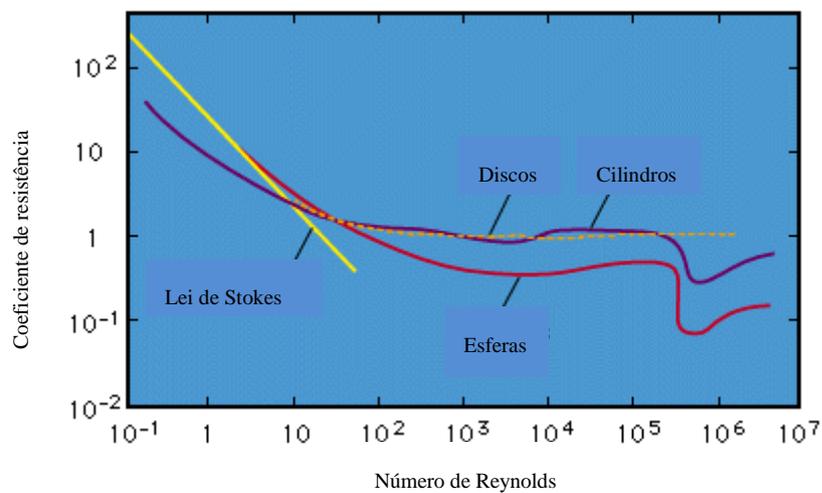


Figura 2.1- Relação entre o coeficiente de resistência e o número de Reynolds através da forma da partícula discreta (Encyclopædia Britannica)

Coeficiente de resistência igual a:

$$Cd = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad (2.4)$$

em que o número Reynolds é igual a:

$$Re = \frac{V_p d_p}{\nu} \quad (2.5)$$

em que:

$\nu$  [ $\text{ms}^{-2}$ ] é a viscosidade cinemática do fluido.

No caso das partículas não esféricas, partículas que usualmente constituem a água residual, há o aparecimento da variável factor de forma,  $\Phi$ , que assume o valor de 1 para as esferas, 2 para grãos de areia e superior a 2 com um máximo de 20 para matéria floculada.

$$V_p = \sqrt{\frac{4g}{3C_p \Phi} \frac{(\rho_p - \rho_w) d_p}{\rho_w}} \quad (2.6)$$

Para o caso do escoamento ser laminar com Reynolds menor que 1, a velocidade de sedimentação obedece à lei de Stokes.

$$V_p = \frac{g \left( \rho_p / \rho_w - 1 \right) d_p^2}{(18\nu)} \quad (2.7)$$

Para o caso do escoamento ser turbulento com Reynolds maior que 2000, o coeficiente de resistência é igual a 0.4, e pode-se utilizar a expressão seguinte:

$$V_p = \sqrt{3,33g \frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} d_p} \quad (2.8)$$

#### 2.4.2 Sedimentação de partículas floculadas

Os elementos constituintes da água residual tendem a sedimentar de uma forma natural através de floculação (Metcalf & Eddy, 2002). À medida que a floculação ocorre a massa do floco aumenta e este sedimenta mais fácil e rapidamente. Contudo, existem partículas que necessitam de ser agregadas de uma forma artificial. Assim, é usada uma mistura preliminar do efluente, que irá para o sedimentador, com um coagulante químico de forma a criar flocos com maior massa, que depositam mais rapidamente. Este método artificial garante a sedimentação de partículas discretas que, ao transformarem-se em floculadas, conseguem sedimentar, conduzindo a uma eficiência de remoção superior, taxas de aplicação superficial superiores e maior controlo no processo. No entanto, existe maior custo ao nível do equipamento e operacional, são originadas lamas primárias com maior dificuldade de espessar e desidratar, e ao ser um sistema complexo a exigência de vigilância é também superior.

Os coagulantes podem ser compostos por sais de ferro, sais de alumínio, cal ou polímeros orgânicos (figura 2.2), sendo que a mistura ocorre num espaço, de mistura lenta, que é denominado de floculador (figura 2.3).

Segundo Steel & McGhee (1979) é proposta uma equação (2.9) que relaciona a variação da densidade do floco com o tamanho do mesmo.

$$\rho_s - \rho = kd^{-0,7} \quad (2.9)$$

em que:

$\rho_s$  [ $\text{kgm}^{-2}$ ] é a massa volúmica do floco;

$\rho$  [ $\text{kgm}^{-2}$ ] é a massa volúmica da água;

$d$  [mm] é o diâmetro da partícula ou floco;

$K$  é o coeficiente em função das características da água e dos químicos envolvidos.

Para estudar o fenômeno de sedimentação floculada usa-se uma coluna de sedimentação (Metcalf & Eddy, 2002). Sendo analisada a velocidade de sedimentação como está presente na equação (2.10)

$$V_c = \frac{H}{t_c} \quad (2.10)$$

em que:

$V_c$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] é a velocidade de sedimentação;

$H$  [mm] é a profundidade da coluna de sedimentação;

$T_C$  é o tempo necessário para uma de determinada percentagem de remoção.

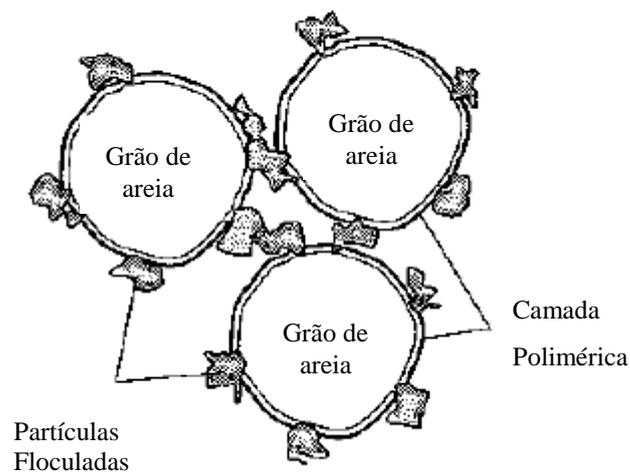


Figura 2.2- Floculo agregado artificialmente através de coagulante de polímero orgânico (Metcalf & Eddy, 2002)

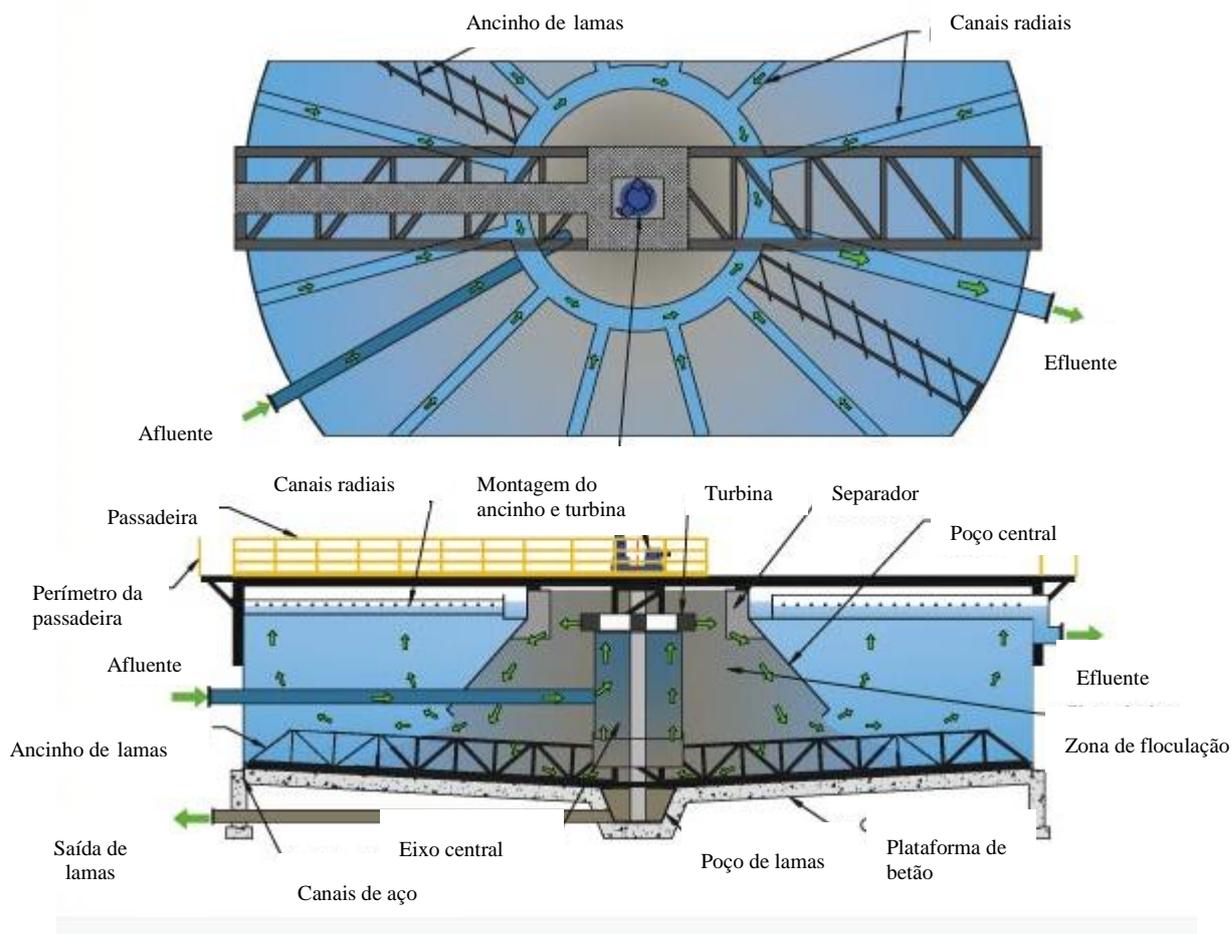


Figura 2.3- Sedimentador circular com poço central flocculante (Monroe Environmental)

### 2.4.3 Sedimentação em manto

A sedimentação em manto ocorre quando existe uma elevada concentração de sólidos suspensos no líquido que ao sedimentarem provocam na coluna do líquido uma nítida separação entre água e lamas (Metcalf & Eddy, 2002).

A área necessária e concentração crítica para a sedimentação em manto pode ser calculada através do teste de colunas de sedimentação (Steel & McGhee, 1979), figura 2.4 e figura 2.5, em que a área é calculada segundo a mesma bibliografia como se demonstra na equação 2.11.

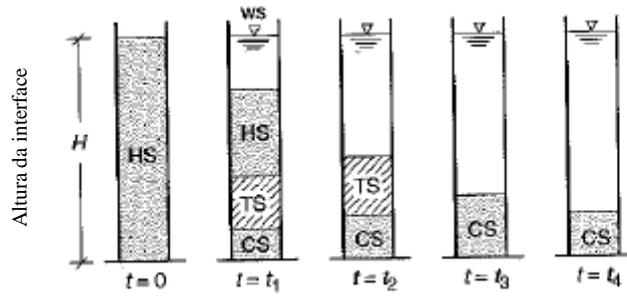


Figura 2.4- Teste de colunas de sedimentação (Metcalf & Eddy, 2002)

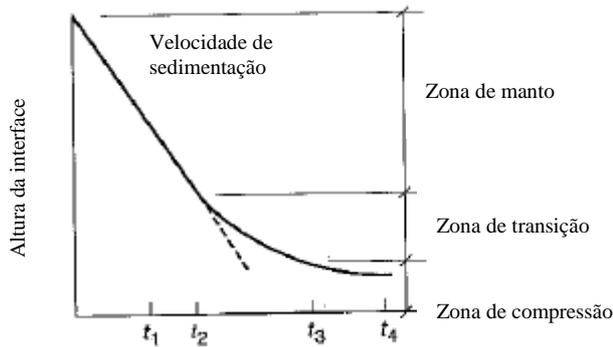


Figura 2.5- Gráfico que identifica as zonas de manto/compressão segundo a altura no tempo (Metcalf & Eddy, 2002)

$$A = \frac{Qt_u}{h_0} \quad (2.11)$$

em que:

$A [m^2]$  é a área da secção;

$Q [m^3s^{-1}]$  é o caudal;

$h_0[m]$  é a altura da coluna;

$t_u [s]$  é o tempo necessário para alcançar a concentração de sólidos preconizada.

#### 2.4.4 Sedimentação por compressão

A sedimentação por compressão ocorre no fundo do sedimentador e em partículas com consolidação muito lenta, e o volume necessário pode ser determinado por teste de sedimentação (Metcalf & Eddy, 2002).

$$H_t - H_\infty = (H_2 - H_\infty)e^{-i(t-t_2)} \quad (2.12)$$

em que:

$H_t$  [m] é a altura da lama no tempo  $t$ ;

$H_\infty$  [m] é a altura da lama após um longo período, por exemplo. 24 h;

$H_2$  [m] é a altura da lama no tempo  $t_2$ ;

$i$  é constante para uma determinada suspensão.

#### 2.5 Tipos de sedimentadores

Existem sedimentadores de vários tipos sendo os mais usuais de forma circular, retangular, quadrada ou de lamelas.

##### 2.5.1 Sedimentador circular

O sedimentador circular, equipamento característico e facilmente identificado na ETAR, tem diâmetros que podem variar entre 3 a 60 metros, sendo usuais valores entre 10 a 40 metros. A entrada de caudal afluyente ao sedimentador é processada de duas maneiras: através de fornecimento na parte central onde poderá ter acoplado um poço de floculação ou por fornecimento periférico (menos usual). O sistema de remoção das lamas do sedimentador circular é efetuado através de estruturas circulares, de raspagem mecânica ou de sucção através orifícios colados no fundo de sedimentador (figura 2.6).

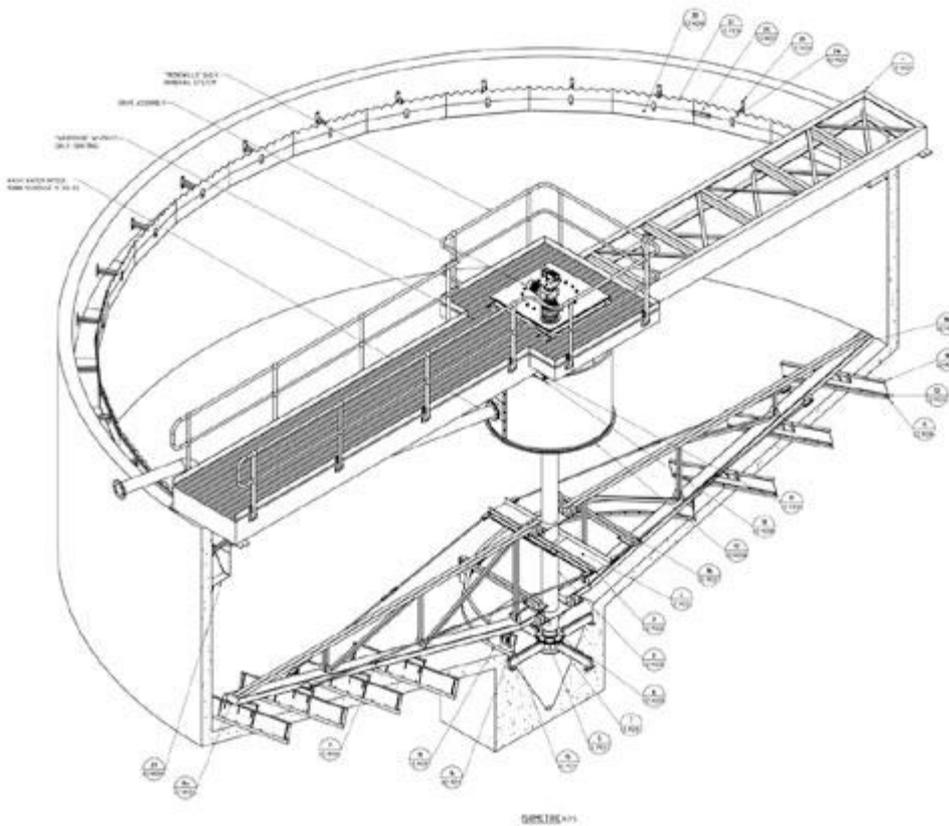


Figura 2.6- Interior sedimentador circular em perspectiva (Design Base)

### 2.5.2 Sedimentador retangular

O sedimentador retangular (figura 2.7) deve obedecer a padrões de dimensionamento pré-definidos em relação largura/comprimento (1:3 a 1:5) e o comprimento não deverá exceder 10 a 15 vezes a profundidade, de forma a salvaguardar a ocorrência de curto-circuito hidráulico criado pela exposição ao vento, diferença de densidade, temperatura e distribuição irregular do caudal que provoque velocidade horizontal excessiva. O sistema de remoção de lamas do sedimentador retangular é efetuado através de um sistema de raspagem mecânica ou por sifão.

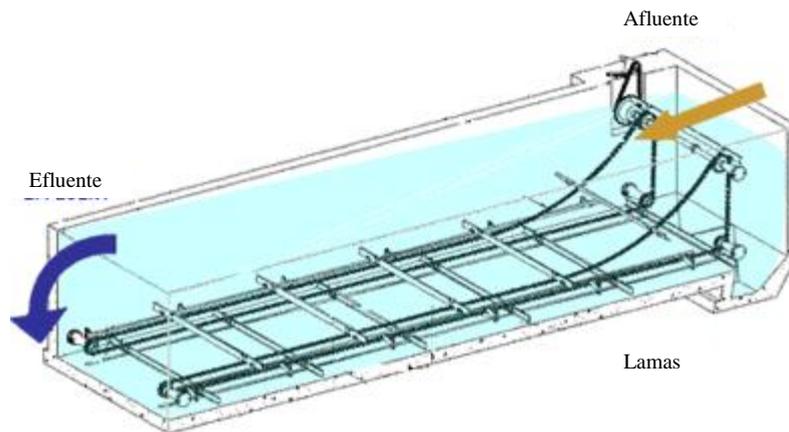


Figura 2.7- Sedimentador retangular (Environmental Expert)

### 2.5.3 Sedimentador quadrado

O sedimentador quadrado (figura 2.8) cada vez mais em desuso por ser menos eficaz visto as lamelas se acumularem nos cantos, é usado quando a falta de espaço se impõe no dimensionamento. O sistema de remoção de lamelas do sedimentador quadrado é através de um sistema de raspagem mecânica.



Figura 2.8-Sedimentador quadrado (Valley water)

### 2.5.4 Sedimentador tipo de lamelas

O sedimentador de lamelas (figura 2.9), que contém lamelas de metal ou em polímero, inclinadas no seu interior geralmente a  $60^\circ$ , permite uma otimização da sedimentação dado as lamelas criarem maior percurso das partículas num espaço fechado (figura 2.10), a salvo de fatores externos que possam influenciar um menor rendimento. O fator de escolha principal

para este tipo de sedimentador pelo projetista é o espaço, pois este ocupa um espaço significativamente menor do que os convencionais.

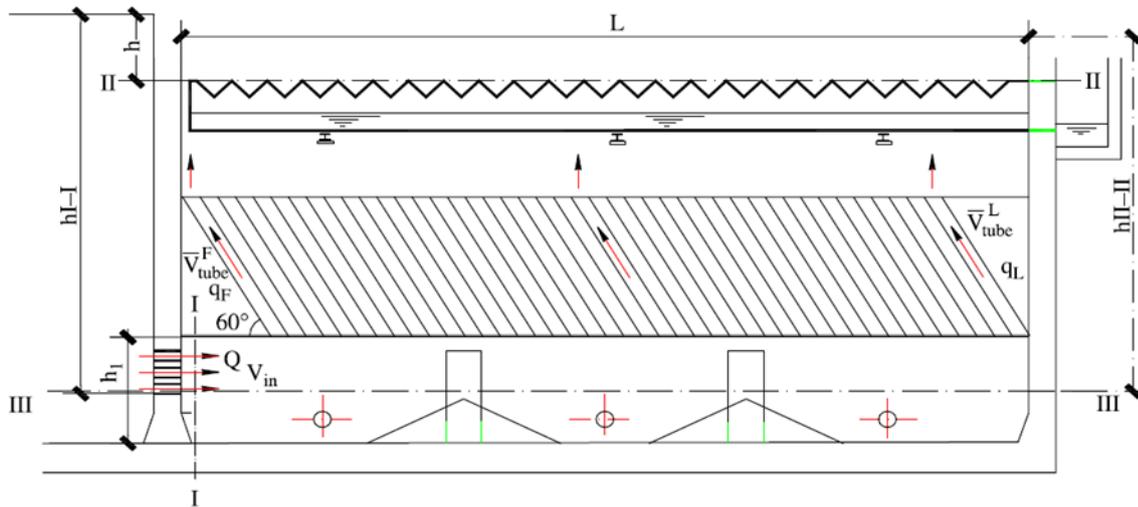


Figura 2.9- Corte de um sedimentador de lamelas (Huang, et al., 2008)



Figura 2.10- Fases do desempenho de um sedimentador de lamelas (Leiblein)

## **2.6 Critérios de dimensionamento de sedimentadores**

Historicamente o dimensionamento de sedimentadores tem sido efetuado através de critérios empíricos como a profundidade, carga de sólidos, geometria da superfície e tempo de retenção. Estes critérios são úteis para o dimensionamento, mas não são suficientemente precisos para o estado atual do conhecimento relativo à eficiência dos sedimentadores (WEF, 1992).

Existem diversas recomendações e guias na bibliografia especializada, das quais se destacam:

- O efeito da profundidade, no caso da criação de uma profundidade extra, acrescenta um maior armazenamento das lamas que garante um benefício para a operação do espessamento (Esler, 2010), no entanto a taxa de remoção é independente da profundidade e há o risco de esta se tornar excessiva e poderem-se criar condições anaeróbias no fundo.
- O tempo de retenção caracteriza-se pelo tempo necessário que leva uma partícula a sedimentar. No caso de haver floculação o tempo de retenção deve ser o suficiente para permitir a floculação. O tempo de retenção deve ser bem estudado de forma que tempos de retenção mais elevados provoquem condições de septicidade. Caso não haja remoção contínua de lamas, tempos de retenção superiores a 1,5 horas podem provocar a re-suspensão da matéria orgânica.
- Carga de sólidos, que se caracteriza pela quantidade de sólidos por dia por área de superfície do sedimentador.
- A geometria da superfície que assenta na forma do sedimentador (circular, rectangular e quadrada), diâmetro do sedimentador (no caso de ser circular) e relação comprimento/largura (no caso de ser retangular).

## **2.7 Desempenho de sedimentadores primários**

Um correto desempenho de sedimentadores é função de diversos parâmetros, escolhas de projeto e previsão de fenómenos que possam influenciar o rendimento do sedimentador.

## **2.7.1 Fenómenos que influenciam o rendimento de um sedimentador**

No interior de um sedimentador podem ocorrer fenómenos que podem diminuir o rendimento do sedimentador:

- Curto-circuito hidráulico
- Re-suspensão

Apresentam-se na presente subsecção estes fenómenos.

### **2.7.1.1 Curto-circuito hidráulico**

Num sedimentador ideal, uma determinada água residual que entra deverá permanecer no interior do sedimentador durante a totalidade do tempo de retenção. No entanto, na prática os sedimentadores raramente podem ser classificados como ideais e a água residual acaba por permanecer menos tempo no sedimentador, originando assim um fenómeno designado por curto-circuito hidráulico. O curto-circuito hidráulico ocorre devido a deficiências do dimensionamento e operação, que criam as chamadas zonas mortas (figura 2.11), onde a sedimentação das partículas não se processa, o que provoca uma maior concentração de efluente, mantendo-se as partículas dentro do sedimentador em circuito fechado ou sendo expelidas com o efluente conforme a figura (2.11) onde se apresenta uma simulação numérica deste fenómeno onde é perceptível através das setas da figura a não sedimentação das partículas para a zona de lamas, sendo estas expelidas com o efluente na corrente ascendente do líquido.

Depois do sedimentador estar construído, a operar e de se constatar que o efluente não garante o rendimento de remoção de sólidos suspensos totais, turvação ou produção de lamas preconizados em projeto, é possível fazer uma análise se o fenómeno do curto-circuito hidráulico está a ocorrer. Esta análise pode ser efetuada através do teste “Flow Curve Test” (figura 2.12), que é uma representação gráfica do tempo que demora uma massa de tinta a passar num sedimentador. Pode igualmente utilizar-se o “Dye Tracer Test” (figura 2.13) que é a visualização do circuito da tinta de forma a encontrar possíveis problemas no sedimentador e o “Droque Current Test” (figura 2.14) que é um ensaio medidor e quantificador de correntes presentes no sedimentador pois estas variam conforme a distância e a profundidade do mesmo, ou através de equipamentos portáteis e expeditos que analisam os sólidos suspensos totais em tempo real (WEF, 2005). A solução para este problema reside na maioria dos casos na incorporação posterior de separadores (ver subsecção 2.7.2.2).

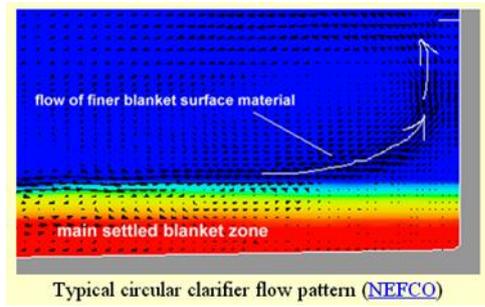


Figura 2.11- Simulação do curto-circuito hidráulico (NEFCO)

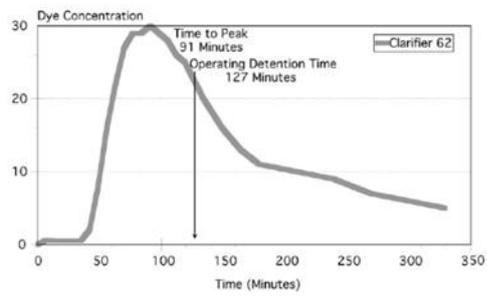


Figura 2.12- Gráfico do Flow Curve Test (WEF, 2005)

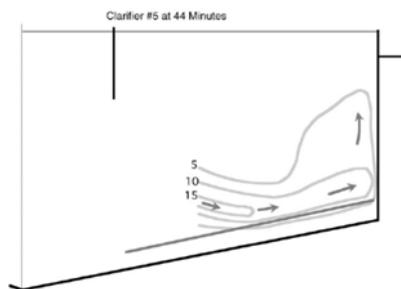


Figura 2.13- Resultado de Dye Tracer Test (WEF, 2005)

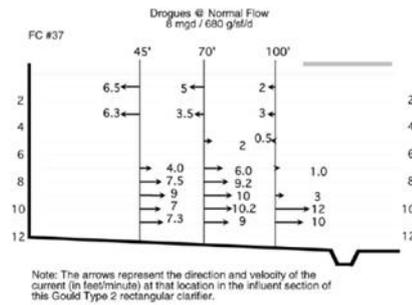


Figura 2.14- Resultado de Drogue Current Test (WEF, 2005)

### 2.7.1.2 Re-suspensão

A velocidade de re-suspensão ( $V_H$ ) é a componente horizontal da velocidade de escoamento capaz de suspender a partícula sedimentada. Sabendo que a eficiência de um sedimentador depende da trajetória da partícula deve o projetista ter especial atenção a este parâmetro pois no caso de um sedimentador retangular é função do caudal ( $Q$ ), da largura ( $B$ ) e da profundidade ( $H$ ).

$$V_H = \frac{Q}{BH}$$

(2.13)

em que:

$V_H$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] é a velocidade de re-suspensão;

$Q$  [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ] é o caudal;

$B$  [ $\text{m}^2$ ] é a largura do sedimentador retangular;

$H$  [ $\text{m}$ ] é a profundidade do sedimentador rectangular.

Se esta velocidade for superior à velocidade horizontal crítica, ocorre a re-suspensão

$$V_{Hc} = \left( \frac{8k(s-1)gd}{f} \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

em que:

K é uma constante função do tipo de material (0,04 para areia e 0,06 para material mais coeso);

s é a densidade das partículas;

d [m] é o diâmetro das partículas;

f é o coeficiente de resistência (0,02-0,03).

### **2.7.2 Parâmetros que influenciam o rendimento de um sedimentador**

Apresentam-se na presente subsecção os diversos parâmetros que influenciam o rendimento do sedimentador.

#### **2.7.2.1 Descarregadores**

O descarregador tem a função de criar um regime de escoamento em que o efluente deve ser retirado uniformemente para impedir gradientes de velocidade elevados e localizados, e curto circuitos hidráulicos. O descarregador pode ter um contributo significativo para o processo de arejamento (Bagatur, 2009) e podem apresentar soleiras delgadas ou triangulares (Bagatur, 2009).

#### **2.7.2.2 Separadores**

Os separadores servem essencialmente para reduzir o refluxo do líquido, que ao bater nas paredes do sedimentador cria com isso turbulência na sedimentação. Servem também para reduzir correntes ascensionais junto às paredes que possam incorporar partículas, que não sedimentaram, que desta forma encontram um obstáculo. Têm igualmente o propósito de criar um caminho mais sinuoso na trajetória do líquido, de forma a aumentar o rendimento do sedimentador. Os separadores nos sedimentadores tendem a ter um papel mais relevante nos sedimentadores secundários (WEF, 2005), contudo a mesma bibliografia também refere a sua utilização no caso dos sedimentadores primários, dando enfoque nos separadores interiores para sedimentadores circulares (fig 2.15), e para sedimentadores retangulares, um separador

na entrada de forma a diminuir a velocidade das correntes do afluente e prevenir que que jatos ultrapassem a superfície do sedimentador (WEF, 2005).

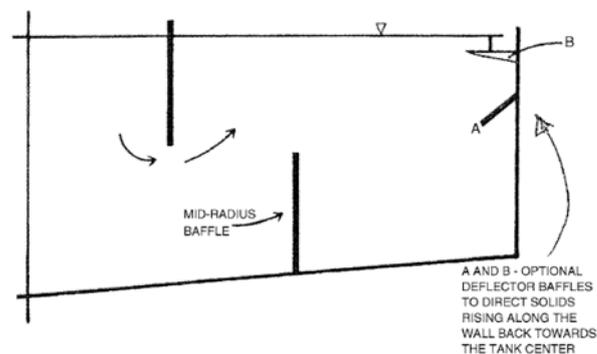


Figura 2.15- Separador interior para sedimentadores circulares (WEF, 2005)

### 2.7.2.3 Temperatura

A temperatura do afluente, quando comparada com a temperatura do fluido no interior do sedimentador é um parâmetro que necessita atenção devido a poder ocorrer curto-circuito hidráulico. Segundo S. Clesceri, et al. (1999) um afluente com menores concentrações tem melhores rendimentos a baixas temperaturas.

### 2.7.2.4 Massa específica

Sendo a massa específica ou massa volúmica definida como massa por unidade de volume (Metcalf & Eddy, 2002), esta é um fator a ter em conta na concentração do afluente.

### 2.7.2.5 Concentração do efluente

A concentração do efluente é da maior importância na sedimentação pois como se pode constatar em WEF (2005), uma maior concentração de efluente leva a um maior rendimento (figura 2.16)

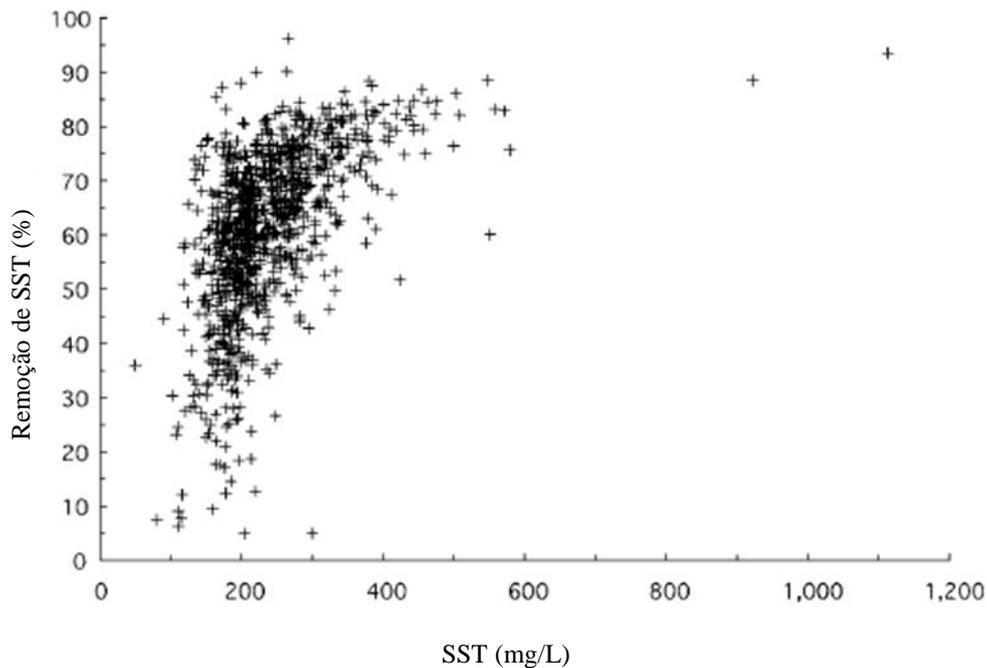


Figura 2.16- Gráfico que relaciona a concentração do efluente com a porcentagem de remoção (WEF, 2005)

#### 2.7.2.6 pH

O pH é um importante parâmetro qualitativo numa água residual (Metcalf & Eddy, 2002), sendo o pH o simétrico do logaritmo de base 10 da concentração dos iões de  $H^+$ . Uma concentração adversa do ião  $H^+$  tem como consequência um handicap no seu tratamento biológico e um pH ácido levará a que as gorduras e óleos presentes no sedimentador fiquem em suspensão, logo não sendo removidos (Tillman, 1992).

#### 2.7.2.7 Taxa superficial

A taxa superficial ( $q_0$ ), calculada através da equação (2.15) (WEF, 2005) é uma velocidade, teoricamente a necessária para que a mais pequena partícula seja removida (Fornshell, 2001). A taxa superficial está inversamente relacionada, com o tempo de retenção, pois a maior taxa superficial corresponde menor tempo de retenção e vice-versa.

A taxa superficial é um parâmetro relacionável com o rendimento do sedimentador como se pode observar na figura 2.17, onde é possível observar que a porcentagem de remoção dos sólidos suspensos totais (SST) aumenta com a diminuição da taxa superficial.

Menor taxa superficial está associada a um menor caudal e portanto mais tempo de retenção para as partículas e flocos do líquido sedimentarem.

$$q_0 = Q/A \quad (2.15)$$

Em que:

$q_0$  [ $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ] é a taxa superficial;

$Q$  [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ] é o caudal;

$A$  [ $\text{m}^2$ ] é a área superficial.

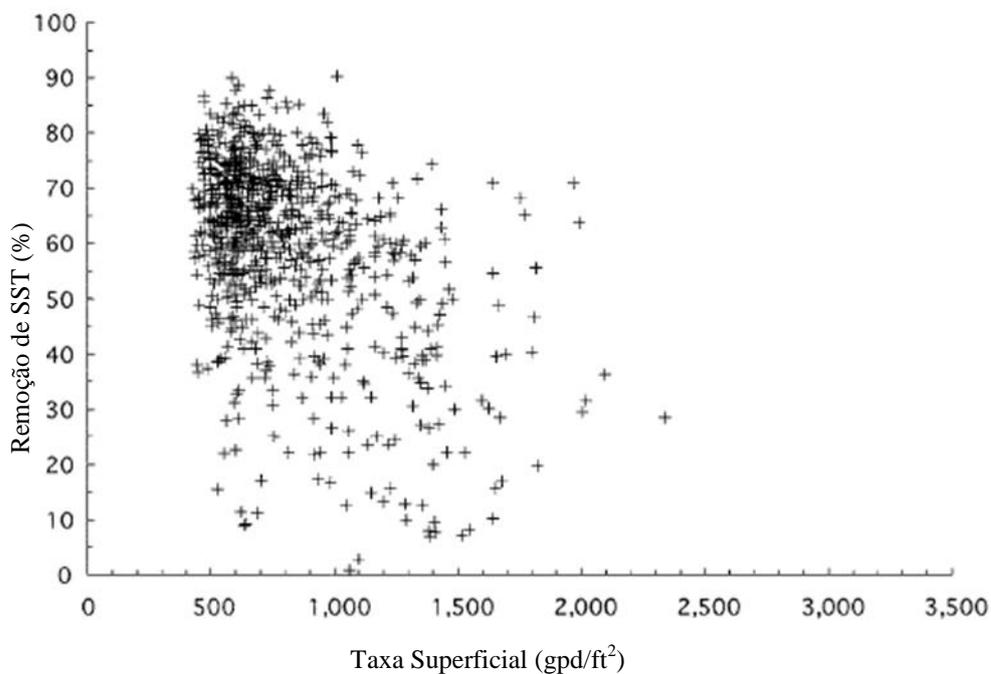


Figura 2.17- Gráfico que relaciona a taxa superficial com o rendimento (WEF, 2005)

### 2.7.3 Análise do desempenho de um sedimentador

A análise do desempenho de um sedimentador segue por norma a análise quantitativa e qualitativa dos diversos componentes da água residual e a sua conformidade, dentro do esperado pelo operador e das normas legais do efluente. Esta análise é de forma geral feita em laboratório e segundo o método de S. Clesceri et al. (1999).

## **2.8 Estudo do desempenho de um sedimentador**

### **2.8.1 Estudo em modelo real**

O estudo em modelo real tem como objetivo fazer uma análise dos fenômenos numa perspectiva científica e analisar o caso concreto abrangido nesse estudo (WEF, 2005).

Em Deininger, et al. (1998) foi estudada a velocidade e distribuição dos sólidos num sedimentador circular real e em De Clercq, et al. (2003) estudou-se a produção de lamas através de um modelo matemático num sedimentador circular na localidade de Essen na Alemanha.

### **2.8.2 Estudo em modelo de simulação numérica**

O estudo em modelo de simulação numérica (Rostami, et al., 2010) serve para, segundo WEF. (2005), a representação virtual dos processos físicos, biológicos e químicos dos sistemas reais.

Este tipo de estudo tende a ser o mais usado dado ter uma vertente comercial no domínio da mecânica dos fluidos computacional (CFD), tendo por base as equações de Navier–Stokes, as equações de continuidade e de transferência de massa havendo a possibilidade de trabalhar em 1-D, 2-D e 3-D , conforme a complexidade exigida (WEF, 2005).

Em Rostami, et al. (2010) encontramos um estudo feito em simulação numérica para configurações do canal de entrada de um sedimentador primário rectangular de forma a dissipar a energia cinética e prevenir curto-circuito hidráulico, este estudo concluí que é preferível ter mais do que uma abertura, duas ou três, para uniformizar a corrente de entrada e assim prevenir o curto-circuito hidráulico. Em Zhang, et al.(2010) um especial enfoque para a simulação numérica da recirculação das lamas para estudar o papel do aspirador de lamas na distribuição da concentração dos sedimentos e concluí que é comparável com outros ensaios experimentais . He et al. (2008) apresentam uma modelação de um sedimentador de lamelas (figura 2.18), e concluem que este tipo de modelo é uma ferramenta flexível e poderosa, sendo mais eficiente e apresentando menores custos em relação aos outros modelos. Desta forma através de CFD concluí-se em He et al. (2008) ser possível adaptar o tradicional sedimentador de lamelas de água residual para água pluvial, sem que existam grandes custos de manutenção.

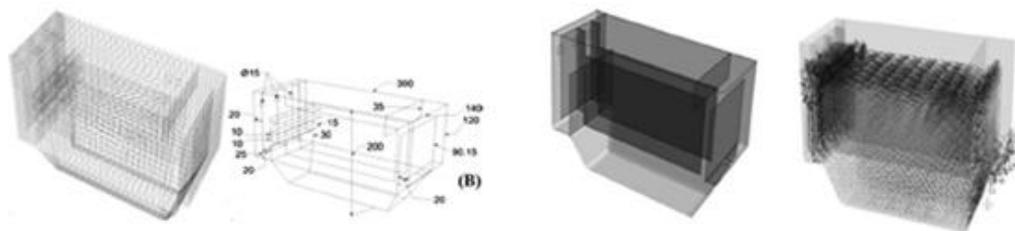


Figura 2.18- Imagem da modelação de um sedimentador de lamelas (He, et al., 2008)

### 2.8.3 Estudo em modelo reduzido de processos de sedimentação

O estudo em modelo reduzido tem como objetivo reproduzir as condições reais (Wilkinson, et al., 2000) devidamente calibradas através dos parâmetros seleccionados (Tranckner, et al., 2007) em laboratório, de forma a ser válido e a ter representação real.

Em Wilkinson et al (2000) criou-se um modelo à escala de um sedimentador rectangular em acrílico com 0.875 metros de comprimento por 0,23 metros de largura e 0,28 metros de altura para estudar a velocidade no interior do sedimentador usando um Phase Doppler Analyser, um instrumento que emite um feixe de laser que mede a velocidade das partículas através da dispersão de luz destas ao passar pelo feixe de laser, de forma a estudar a introdução de separadores e o efeito destes na uniformização das correntes de entrada.

Em Tranckner, et al. (2007) os parâmetros seleccionados foram o CQO, a carga de nutrientes e caudal do efluente de forma a estudar um sistema de controlo em tempo real numa escala reduzida e conclui que a quantidade de água pluvial presente no circuito afeta de forma diferente a sedimentação, havendo melhores resultados do rendimento do sedimentador com quantidades pequenas e médias de água pluvial.

Em Yoon & Lee (2000) usou-se para simular a água residual uma mistura de pó de argila com água para estudar a eficiência da remoção de sólidos suspensos totais através do flow curve test concluindo que a água com pó de argila mostrou-se uma ferramenta útil e que o zona de inserção de separadores, no sedimentador, fica conhecida através do flow curve test e assim melhorar a remoção de sólidos suspensos totais.

### 3 MÉTODO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Introdução

Apresenta-se no presente capítulo o método experimental utilizado para estudar o fenómeno da sedimentação em laboratório.

#### 3.2 Instalação Experimental

A instalação experimental, localizada no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, é composta por modelos reduzidos de um arejador, um sedimentador primário circular, um reator biológico circular e um sedimentador secundário de igual dimensão ao primário (figura 3.1).

No caso de estudo apenas foram usados o arejador e sedimentador primário (figura 3.2), abastecidos por uma bomba peristáltica de marca “Aqua Lytic”, sendo o percurso interrompido a jusante do sedimentador primário por bypass para esgoto.



Figura 3.1 – Instalação experimental

O arejador é constituído por uma peça única de acrílico transparente, de geometria variável na base, com 10 cm de diâmetro, 37,7 cm de altura, tendo acoplado um sistema de injeção de ar que possibilita a realização de ensaios com e sem arejamento.

O sedimentador primário, vertical de fluxo ascendente, é composto por uma peça única de acrílico transparente, de geometria variável na base, com 14,6 cm de diâmetro exterior, 8 cm de diâmetro útil e 62,5 cm de altura, e por um descarregador periférico constituído por elementos triangulares.



Figura 3.2- Sedimentador Primário

### 3.3 Metodologia Experimental

O efluente escolhido para simular a água residual foi uma solução de água com argila (Yoon & Lee, 2000). A argila escolhida foi o caulino, devido ao facto de este apresentar propriedades de sedimentação semelhantes à água residual (Alan, et al., 1962) e por ter uma quase inexistente dissolução na água. Desta forma excluiu-se a necessidade de determinar laboratorialmente os sólidos dissolvidos totais.

Como o objetivo era comparar a concentração da água residual antes e depois da sedimentação, determinaram-se os sólidos suspensos totais.

Esta dissertação baseou-se em dois métodos, um método simplificado utilizado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade do Minho e um método, segundo S. Clesceri et al. (1999) realizado no laboratório da empresa Águas do Noroeste, para corroborar o método simplificado.

### **3.3.1 Método Simplificado**

O método simplificado consistiu na produção de uma solução de caulino com uma quantidade variável (de acordo com a concentração pretendida) de pó de caulino misturado com 20 L de água num bidão para o efeito, do qual a solução é bombeada para o arejador através de uma bomba peristáltica, sendo arejada ou não, seguindo para o sedimentador do qual é recolhida a jusante a amostra de 150 mL em copo de vidro, previamente pesado e numerado. Seguiu-se a secagem das amostras na estufa (figura 3.4), finalizando o método com a pesagem final, do copo de vidro com a amostra seca na balança de precisão (figura 3.3). A massa de caulino assim determinada, juntamente com o volume de líquido no interior do copo, permite obter a concentração de caulino. Este processo obrigava a grande cuidado na manipulação das amostras, especialmente na limpeza do copo de vidro.

Comparando com a concentração inicial obtém-se a concentração retida dentro do sedimentador e portanto o seu rendimento.

### **3.3.2 Método segundo S. Clesceri et al (1999)**

O método de S. Clesceri et al. (1999) foi aplicado como método de validação do método simplificado, tendo sido utilizado nas instalações do laboratório das Águas do Noroeste (AdW). Este método consistiu na produção de uma solução de caulino com uma quantidade variável (de acordo com a concentração pretendida) de pó de caulino misturado com 20 L de água num bidão para o efeito, do qual a solução é bombeada para o arejador através de uma bomba peristáltica, sendo arejada ou não, seguindo para o sedimentador do qual foi recolhida a jusante para uma garrafa de 1,5 L que seguiu para o laboratório das Águas do Noroeste onde foram efetuadas duas amostras de 250 mL. Estas amostras foram sujeitas a uma operação de filtração (figura 3.7), recorrendo a um filtro de fibra de vidro de 47 mm, que permitiu a filtração dos sólidos suspensos totais no filtro (figura 3.7). O resíduo retido no filtro foi sujeito a evaporação em estufa (figura 3.6), permitindo determinar a massa de caulino presente na amostra (figura 3.5), e assim obter a concentração à saída do sedimentador, logo o rendimento do mesmo. A comparação dos resultados, presente no capítulo 5, obtidos pelo método simplificado permitiu a validação deste mesmo.

### 3.4 Equipamento de Medida

O equipamento de medida usado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho foi:

- Balança de precisão "*Precisa*" (figura 3.3);
- Estufa de "*Heraeus*" (figura 3.4).

O equipamento de medida usado no laboratório das Águas do Noroeste (AdW).

- Balança de precisão "*Precisa*" (figura 3.5);
- Equipamento de filtragem (figura 3.7);
- Bomba de vácuo (figura 3.8)
- Estufa "*Bimder*" (figura 3.6)



Figura 3.3- Balança DEC



Figura 3.4- Estufa DEC



Figura 3.5- Balança AdW



Figura 3.6- Estufa AdW



Figura 3.7- Equipamento de Filtragem AdW

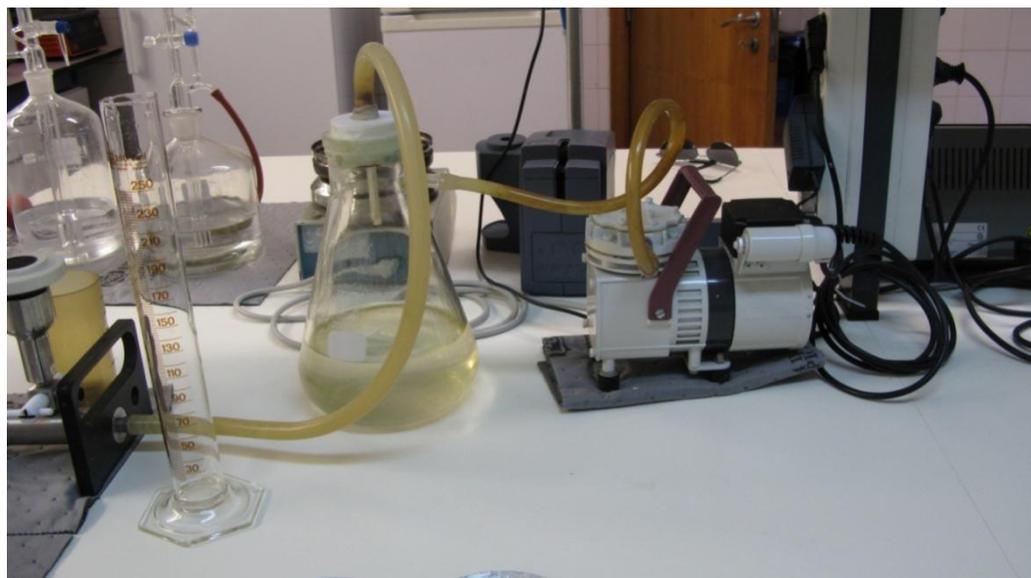


Figura 3.8- Bomba de vácuo AdW



## **4 CONTRIBUTO PARA UM MODELO À ESCALA REDUZIDA**

### **4.1 Introdução**

Este capítulo aborda uma metodologia de cálculo, a adotar caso se pretenda simular o fenómeno da sedimentação em modelos à escala reduzida.

Esta metodologia é baseada na semelhança hidráulica de Froude, sendo teoricamente comprovável dado haver na análise laboratorial desenvolvida uma “preponderância das forças de gravidade relativamente às de viscosidade... como é o caso dos escoamentos determinados pela ação do peso, como os de superfície livre...” segundo Novais-Barbosa (1985).

O fenómeno da sedimentação também se rege por forças de natureza viscosa, correspondentes à semelhança hidráulica de Reynolds, o que também deve ser tido em conta pelo investigador. Contudo, segundo Novais-Barbosa (1985) “ As semelhanças de Froude e de Reynolds são, portanto, em termos práticos, incompatíveis, havendo que adoptar a primeira quando as ações predominantes forem de natureza gravítica e a segunda quando as acções predominantes forem de natureza viscosa” , entende-se nesta dissertação que as acções predominantes no fenómeno da sedimentação são gravíticas , caso contrário tal fenómeno não existiria, portanto na criação de um modelo à escala reduzida optou-se pela semelhança hidráulica de Froude.

### **4.2 Semelhança Hidráulica**

Apresenta-se na presente secção uma pequena síntese sobre o que é semelhança de Froude, de forma a perceber melhor a interligação com a aplicabilidade da teoria em situações práticas.

A semelhança hidráulica tem por base os princípios da análise dimensional que é um “método que permite obter relações entre grandezas físicas a partir exclusivamente das respetivas dimensões” de acordo com Novais-Barbosa (1985), para isto ter efeito a Análise Dimensional recorre às três unidades designadas por GAUSS em 1832: comprimento, massa e tempo, como absolutas, sendo as restantes designadas unidades derivadas.

Para haver ligação entre o fenómeno no protótipo e no modelo, é necessário haver uma escala ( $\lambda$ ) contudo esta só é viável se as forças intervenientes no fenómeno forem as mesmas no protótipo e no modelo, para além disto, para que o que se estuda no protótipo seja representativo do que se passa no modelo é necessário que o nº índice em causa seja igual no modelo e no protótipo. No caso do número índice de Froude (Fr) (equação 4.1) , que tem desta forma a sua escala associada (equação 4.2) com a assunção que no modelo a aceleração

da gravidade é igual à do protótipo (4.3), resulta analiticamente a equação (4.4) que se transforma na equação 4.5

$$Fr = \frac{U^2}{(g \times l)} \quad (4.1)$$

$$\lambda_l = \frac{l_m}{l_p} \quad (4.2)$$

$$(Fr)_m = (Fr)_p \quad (4.3)$$

$$\frac{U_m^2}{g \times l_m} = \frac{U_p^2}{g \times l_p} \Leftrightarrow \quad (4.4)$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_m}{U_p} = \left(\frac{l_m}{l_p}\right)^{1/2}$$

$$\lambda_U = \sqrt{\lambda_l} \quad (4.5)$$

em que:

Fr é o Número de Froude;

U [ms<sup>-1</sup>] é a velocidade média de um escoamento;

g [ms<sup>-2</sup>] é a aceleração da gravidade;

l [m] é o comprimento característico;

$\lambda_1$  é a escala geométrica;

$l_m$  [m] é a grandeza linear no modelo;

$l_p$  [m] é a grandeza linear correspondente no protótipo;

$(Fr)_m$  é o número de Froude do modelo;

$(Fr)_p$  é o número de Froude do protótipo;

$\lambda_U$  é a escala da grandeza velocidade média de um escoamento.

Desta forma apresenta-se em formato de tabela a relação entre as grandezas e as escalas segundo a Semelhança de Froude.

Tabela 4.1- Relação grandezas e escalas

| Grandezas   |  | Escalas              |
|-------------|--|----------------------|
| Designação  | Dimensões relativamente a comprimento e velocidade | Semelhança de Froude |
| Comprimento | L  | $\lambda_1$          |
| Tempo       | $L \times U^{-1}$                                  | $\lambda_1^{1/2}$    |
| Velocidade  | U  | $\lambda_1^{1/2}$    |
| Caudal      | $L^2 \times U$                                     | $\lambda_1^{5/2}$    |

### 4.3 Análise da aplicabilidade do estudo

Este estudo parte de uma análise laboratorial através de um caso real, sendo neste caso o sedimentador primário da ETAR da Várzea em Felgueiras com um diâmetro útil de 13 metros e um caudal 200 m<sup>3</sup>/h e o sedimentador primário ETAR de Vila-Meã em Amarante com um diâmetro útil de 7,9 metros e um caudal de 75 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.3.1 Análise através da instalação laboratorial usada nesta dissertação

A instalação laboratorial usada nesta dissertação tem um diâmetro útil de 0,08 metros no sedimentador primário e uma bomba peristáltica instalada com capacidade para debitar caudal até 8,7 L/h.

Tabela 4.2- Diâmetro de 0,08 metros

| ETAR         | Diâmetro Útil (m) | $\lambda_1$ (m/m) | Tempo Lab (minutos) | Tempo Real (h) | Caudal Lab. (L/h) | Caudal Real (L/h) |
|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| Várzea-Felg. | 13                | 0,0062            | 4,7                 | 1              | 0,60              | 200000            |
| V.Meã-Ama.   | 7,9               | 0,0101            | 6,0                 | 1              | 0,77              | 75000             |

Conclui-se que o modelo laboratorial existente no laboratório implicaria a utilização de caudais inferiores aos possíveis com a bomba existente e tempos de retenção excessivamente baixos para estudar convenientemente o fenómeno da sedimentação.

Os cálculos para uma instalação laboratorial com 0,1 metros de diâmetro útil para os casos reais da ETAR da Várzea e de Vila-Meã são apresentados na tabela (4.3).

Tabela 4.3- Diâmetro de 0,1 metros

| ETAR         | Diâmetro Útil (m) | $\lambda_1$ (m/m) | Tempo Lab (minutos) | Tempo Real (h) | Caudal Lab. (L/h) | Caudal Real (L/h) |
|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| Várzea-Felg. | 13                | 0,0077            | 5,3                 | 1              | 1,0               | 200000            |
| V.Meã-Ama.   | 7,9               | 0,0127            | 6,8                 | 1              | 1,35              | 75000             |

Os cálculos para uma instalação laboratorial com 0,25 metros de diâmetro útil para os casos reais da ETAR da Várzea e de Vila-Meã são apresentados na tabela (4.4).

Tabela 4.4- Diâmetro de 0,25 metros

| ETAR         | Diâmetro Útil (m) | $\lambda_1$ (m/m) | Tempo Lab (minutos) | Tempo Real (h) | Caudal Lab. (L/h) | Caudal Real (L/h) |
|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| Várzea-Felg. | 13                | 0,0192            | 8,3                 | 1              | 10,25             | 200000            |
| V.Meã-Ama.   | 7,9               | 0,0316            | 10,7                | 1              | 13,36             | 75000             |

Os cálculos para uma instalação laboratorial com 0,5 metros de diâmetro útil para os casos reais da ETAR da Várzea e de Vila-Meã são apresentados na tabela (4.5).

Tabela 4.5- Diâmetro de 0,5 metros

| ETAR         | Diâmetro Útil (m) | $\lambda_1$ (m/m) | Tempo Lab (minutos) | Tempo Real (h) | Caudal Lab. (L/h) | Caudal Real (L/h) |
|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| Várzea-Felg. | 13                | 0,0384            | 11,8                | 1              | 58,02             | 200000            |
| V.Meã-Ama.   | 7,9               | 0,0632            | 15,0                | 1              | 75,58             | 75000             |

Os cálculos para uma instalação laboratorial com 1 metro de diâmetro útil para os casos reais da ETAR da Várzea e de Vila-Meã são apresentados na tabela (4.6).

Tabela 4.6- Diâmetro de 1 metro

| ETAR         | Diâmetro Útil (m) | $\lambda_1$ (m/m) | Tempo Lab (minutos) | Tempo Real (h) | Caudal Lab. (L/h) | Caudal Real (L/h) |
|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------|-------------------|-------------------|
| Várzea-Felg. | 13                | 0,0769            | 16,6                | 1              | 328,22            | 200000            |
| V.Meã-Ama.   | 7,9               | 0,1265            | 21,3                | 1              | 427,55            | 75000             |

#### 4.4 Conclusão

Como pode ser observável através das tabelas 4.2 a 4.6, a teoria da Semelhança de Froude é aplicável a um modelo laboratorial para estudar casos reais, sendo necessária especial atenção às dimensões do modelo pois estão associadas a tempos de ensaio e caudais difíceis de adotar em laboratório.

Dos casos estudados, conclui-se que idealmente a secção do modelo deverá ter entre 0,25 e 0,5 metros, pois comportam caudais usuais em bombas de laboratório e tempos que permitem ao investigador uma boa operação da atividade laboratorial



## 5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SEDIMENTADOR PRIMÁRIO

### 5.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a avaliação do rendimento de um sedimentador primário, concebida em experiência laboratorial. Chama-se a atenção para o facto da instalação experimental adotada, e descrita no capítulo 3, não permitir o estudo em modelo reduzido de um sedimentador real, conforme conclusão expressa no capítulo 4. Por esta razão, optou-se por realizar um estudo paramétrico do fenómeno da sedimentação em laboratório. Assim o rendimento de um sedimentador primário foi analisado em função dos seguintes parâmetros (Metcalf & Eddy, 2002):

- Concentração do afluente.
- Taxa superficial.
- Execução dos ensaios com arejamento e sem arejamento

### 5.2 Condições Experimentais

A concentração de sólidos suspensos totais do efluente variou entre 350, 500 e 1000 mg/L de acordo com Metcalf & Eddy (2002), a taxa superficial variou entre 1 e 2  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  segundo WEF (2005) e foi analisado o rendimento do sedimentador para ensaios com duração até quatro tempos de retenção posteriores ao início da atividade experimental.

A uma taxa superficial ( $q_0$ ) corresponde um tempo de retenção (WEF, 2005) para determinado volume. Tendo o sedimentador primário um volume ( $V$ ) de  $0,0028 \text{ m}^3$ , com uma área superficial útil ( $A$ ) de  $0,005 \text{ m}^2$ , seleccionaram-se os valores de 1, 1,25 e  $1,74 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  para a taxa superficial, em função da capacidade da bomba (tabela 5.1).

O cálculo do tempo de retenção (T.R.) obteve-se de acordo com a equação (5.1). O tempo de duração dos ensaios, que se passará a designar por T.E, foi adimensionalizado pelo tempo de retenção, obtendo-se assim a razão T.E./T.R. variável de 1 a 4, que possibilitou uma análise comparativa entre os diferentes ensaios.

$$T.R. = \frac{V}{Q} \quad (5.1)$$

Tabela 5.1- Cálculo do tempo de retenção

| $q_0$ (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h) | Q (m <sup>3</sup> /h) | T.R. (minutos) |
|---|-----------------------|----------------|
| 1   | 0,00500               | 34             |
| 1,25                                      | 0,00625               | 27             |
| 1,74                                      | 0,00870               | 20             |

A concentração de sólidos totais do efluente (TSe) foi calculada de acordo com a seguinte equação (WEF, 2005):

$$TSe = \frac{m}{V} \quad (5.2)$$

em que:

TSe [mg/L] é a concentração de sólidos totais do efluente;

M [mg] é a massa obtida da amostra;

V [L] é o volume da amostra.

O rendimento ( $\eta$ ) foi obtido através da fórmula (WEF, 2005) :

$$\eta = 100 \times \left(1 - \frac{TSe}{T Sa}\right) \quad (5.3)$$

em que:

$\eta$  [%] é o rendimento do sedimentador;

TSe [mg/L] é a concentração de sólidos totais do efluente;

T Sa [mg/L] é a concentração de sólidos totais do afluente.

Durante a realização dos ensaios o pH da água residual manteve-se entre 8,16 e 8,21 e a temperatura entre 19,3 e 20,1 C°, valores que foram considerados constantes devido à

pequena variação observada. Desta forma desprezou-se o efeito do pH e da temperatura nos resultados apresentados.

### 5.3 Resultados Experimentais

Enunciam-se nesta secção os resultados experimentais do método simplificado desenvolvido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade do Minho.

#### 5.3.1 Sem arejamento

Apresentam-se nesta subsecção os ensaios do rendimento segundo a taxa superficial, concentração e sem arejamento.

##### 5.3.1.1 Taxa de $1,74 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Os ensaios foram efetuados com taxa superficial constante e com variação na concentração.

A tabela (5.2) apresenta o rendimento da sedimentação expresso em percentagem.

Tabela 5.2- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem

| Ensaio n° | Concentração mg/L | T.R 1 | T.R.2 | T.R.3 | T.R.4 | % |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| 1         | 350               | 50,3  | 59,4  | 65,8  | 70,3  |   |
| 2         | 500               | 56,8  | 66,7  | 71,4  | 76,3  |   |
| 3         | 1000              | 64,7  | 75,2  | 79,5  | 83,7  |   |

#### Análise comparativa dos resultados

Os ensaios acima mencionados são apresentados na figura 5.1, para possibilitar a sua comparação.

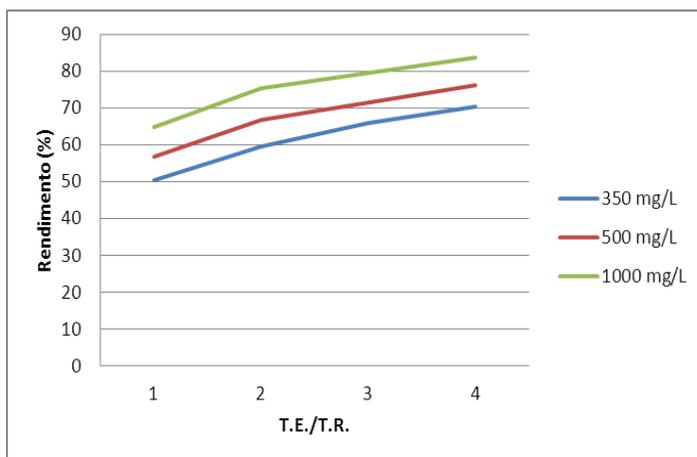


Figura 5.1- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 1, 2 e 3

Da observação da figura 5.1 é possível aferir que o rendimento aumenta substancialmente com o aumento da concentração, sendo que sob numa perspectiva global, nota-se que o rendimento varia no tempo de ensaio sendo o fenómeno muito similar entre os três ensaios. Esta variação é superior para durações de ensaio inferiores a duas vezes o respetivo tempo de retenção.

### 5.3.1.2 Taxa de $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Os ensaios foram efetuados com taxa superficial constante e com variação na concentração.

A tabela (5.3) apresenta o rendimento da sedimentação expresso em percentagem

Tabela 5.3- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem

| Ensaio nº | Concentração mg/L | T.R 1 | T.R.2 | T.R.3 | T.R.4 | % |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| 4         | 350               | 62,8  | 75,7  | 78,3  | 79,6  |   |
| 5         | 500               | 69,6  | 79,8  | 81,3  | 83,1  |   |
| 6         | 1000              | 82,2  | 91,9  | 92,8  | 93,6  |   |

### Análise comparativa dos resultados

Os ensaios acima mencionados são apresentados na figura 5.2 para possibilitar a sua comparação.

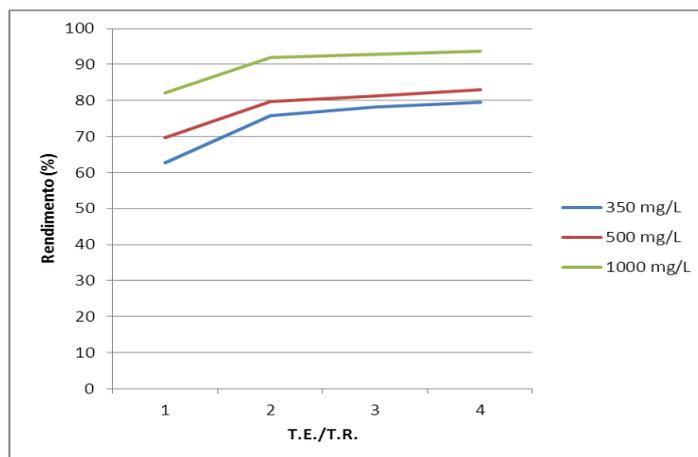


Figura 5.2- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 4, 5 e 6

Da observação da figura 5.2 é possível aferir que o rendimento aumenta substancialmente com o aumento da concentração, sendo que sob numa perspectiva global, nota-se que o rendimento varia segundo durante o tempo de ensaio sendo o fenómeno muito similar entre os três ensaios.

### 5.3.1.3 Taxa de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Os ensaios foram efetuados com taxa superficial constante e com variação na concentração.

A tabela (5.4) apresenta o rendimento da sedimentação expresso em percentagem

Tabela 5.4- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem

| Ensaio nº | Concentração mg/L | T.R 1 | T.R.2 | T.R.3 | T.R.4 | % |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| 7         | 350               | 66,3  | 77,4  | 80,7  | 83,5  |   |
| 8         | 500               | 73,6  | 82,41 | 84,7  | 87    |   |
| 9         | 1000              | 79,6  | 92,2  | 93,4  | 95,2  |   |

### Análise comparativa dos resultados

Os ensaios acima mencionados são apresentados na figura 5.3 para possibilitar a comparação.

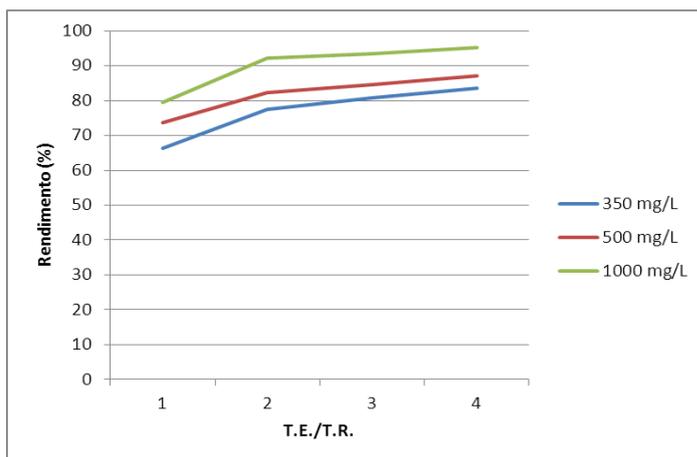


Figura 5.3- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 7, 8 e 9

Da análise da figura 5.3 é possível aferir que o rendimento aumenta substancialmente com o aumento da concentração, sendo que sob numa perspetiva global, nota-se que o rendimento varia segundo o tempo de ensaio sendo o fenómeno muito similar entre os três ensaios.

#### Gráficos rendimento segundo o tempo de retenção

A figura 5.4 representa a evolução do rendimento função dos tempos de retenção. Os valores do rendimento apresentados foram determinados para um ensaio com duração igual a dois tempos de retenção.

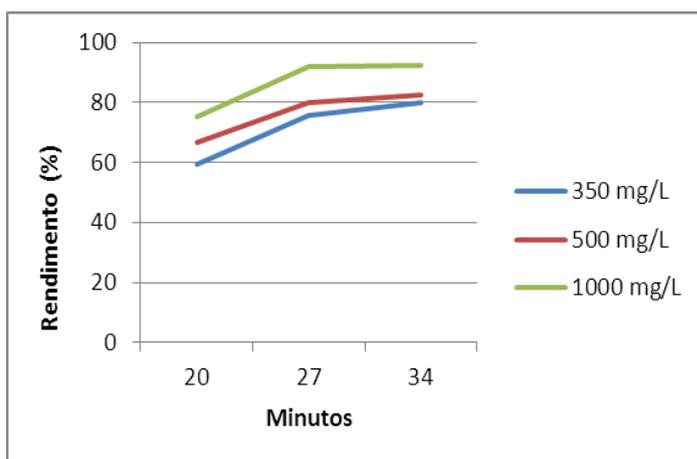


Figura 5.4- Variação dos rendimentos em função do tempo de retenção

Da análise do gráfico da figura 5.4 é possível verificar que o rendimento aumenta com o tempo de retenção, o que está de acordo com o relatado por Metcalf & Eddy (2002). Estes

resultados permitem validar o método experimental adotado, no que diz respeito à viabilidade de utilização de uma solução de água e caulino como efluente laboratorial. Verifica-se igualmente que a maiores concentrações de SST na água residual, correspondem maiores eficiências de remoção.

### 5.3.2 Com arejamento

Apresentam-se nesta subsecção os ensaios do rendimento segundo a taxa superficial, concentração e com arejamento.

#### 5.3.2.1 Taxa de $1,74 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Os ensaios foram efetuados com taxa superficial constante e com variação na concentração. A tabela (5.5) apresenta os rendimentos da sedimentação expressos em percentagem.

Tabela 5.5- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem

| Ensaio n° | Concentração mg/L | T.R. 1 | T.R.2 | T.R.3 | T.R.4 | % |
|-----------|-------------------|--------|-------|-------|-------|---|
| 10        | 350               | 47,1   | 47    | 47,7  | 47,3  |   |
| 11        | 500               | 49,6   | 49,2  | 48,8  | 49,2  |   |
| 12        | 1000              | 52,5   | 51,8  | 51,6  | 51,6  |   |

### Análise comparativa dos resultados

Os ensaios acima mencionados são apresentados na figura 5.5 para possibilitar a sua comparação

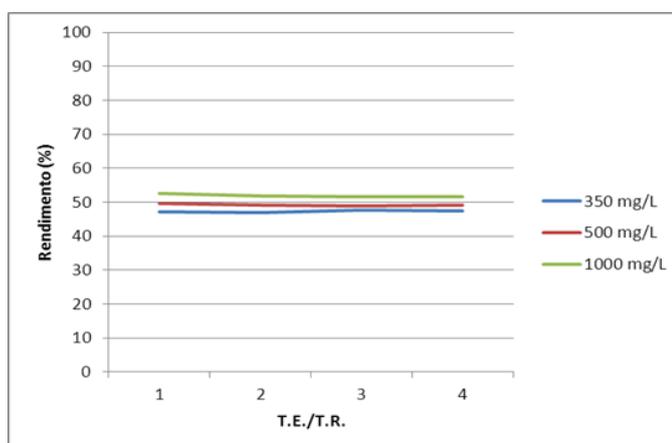


Figura 5.5- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios n° 10,11 e 12

Da análise do gráfico da figura 5.5 é possível aferir que o rendimento aumenta com o aumento da concentração, sendo que sob numa perspetiva global, nota-se que o rendimento varia pouco segundo o tempo de ensaio, sendo o fenómeno similar entre os três ensaios. Comparando com os resultados dos ensaios nº1, 2 e 3 (figura 5.1), observa-se uma diminuição do rendimento, que pode ser atribuída à turbulência local induzida pela introdução do ar, observada durante a duração dos ensaios.

### 5.3.2.2 Taxa de $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Os ensaios foram efetuados com taxa superficial constante e com variação na concentração

A tabela 5.6 apresenta o rendimento da sedimentação expresso em percentagem.

Tabela 5.6- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem

| Ensaio nº | Concentração mg/L | T.R 1 | T.R.2 | T.R.3 | T.R.4 | % |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| 13        | 350               | 52,4  | 52,4  | 52,4  | 52,4  |   |
| 14        | 500               | 58,4  | 58,1  | 58,1  | 58,1  |   |
| 15        | 1000              | 63,8  | 63    | 63,2  | 63,1  |   |

### Análise comparativa dos resultados

Os ensaios acima mencionados são apresentados na figura 5.6 para possibilitar a sua comparação.

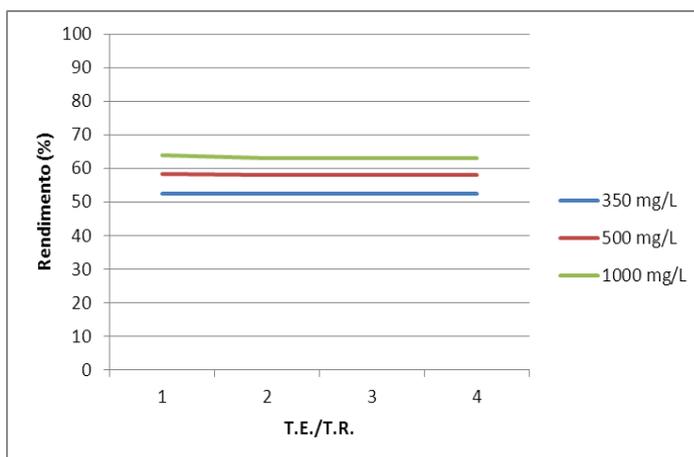


Figura 5.6- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 13,14 e 15

Da análise do gráfico da figura 5.6 é possível aferir que o rendimento aumenta com o aumento da concentração, sendo que sob numa perspetiva global, nota-se que o rendimento varia pouco segundo o tempo de ensaio sendo o fenómeno similar entre os três ensaios.

### 5.3.2.3 Taxa de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

Os ensaios foram efetuados com taxa superficial constante e com variação na concentração

A tabela (5.7) apresenta o rendimento da sedimentação expresso em percentagem.

Tabela 5.7- Rendimento da sedimentação expresso em percentagem

| Ensaio N° | Concentração mg/L | T.R 1 | T.R.2 | T.R.3 | T.R.4 |   |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|-------|---|
| 16        | 350               | 56,3  | 56,8  | 56,2  | 56,2  | % |
| 17        | 500               | 58,8  | 58,8  | 58,6  | 58,6  |   |
| 18        | 1000              | 64,7  | 64,7  | 64,3  | 63,6  |   |

### Análise comparativa dos resultados

Os ensaios acima mencionados são apresentados na figura 5.7 para possibilitar a sua comparação.

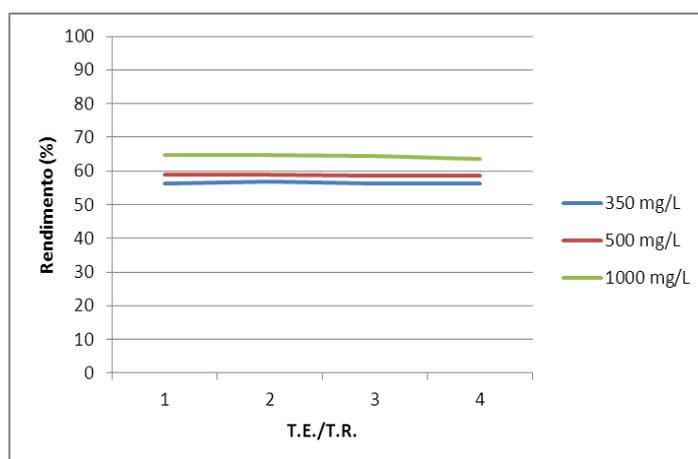


Figura 5.7- Rendimento função da razão T.E./T.R., para os ensaios nº 16, 17 e 18

Da análise do gráfico da figura 5.7 é possível aferir que o rendimento aumenta com o aumento da concentração, sendo que sob numa perspetiva global, nota-se que o rendimento varia pouco segundo o tempo de ensaio, sendo o fenómeno similar entre os três ensaios.

### Gráficos com concentração constante

O gráfico seguinte apresenta a evolução do rendimento função do tempo de retenção. Os valores do rendimento apresentados foram determinados para um ensaio com duração igual a dois tempos de retenção, dado ter sido identificado que neste caso a variação temporal do rendimento diminuiu.

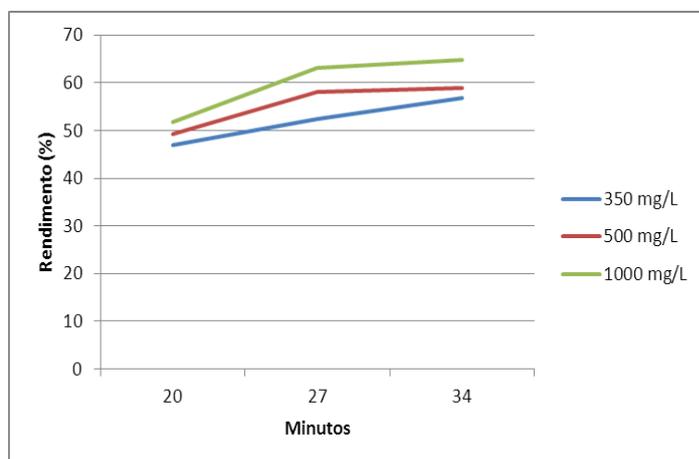


Figura 5.8- Gráfico que relaciona os rendimentos segundo o tempo de retenção

Da análise do gráfico da figura 5.8 é possível avaliar que o rendimento tende a aumentar com o tempo de retenção, apesar da turbulência local induzida pela introdução de ar. Verifica-se igualmente que a maiores concentrações de SST na água residual, correspondem maiores eficiências de remoção.

### 5.3.3 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos permitem concluir que o fenómeno da sedimentação obedece a um padrão mais regular sem arejamento, sendo mais irregular com arejamento. No caso de existir arejamento observaram-se menores rendimentos (WEF, 2005). Uma explicação possível reside na turbulência local gerada pelo arejamento e observada durante os ensaios. No caso das medições efetuadas sem recurso a arejamento observaram-se maiores rendimentos para maior duração dos ensaios, o que pode ser atribuído à dificuldade experimental em atingir um

regime permanente para as condições pretendidas. Como a maior variação foi observada quando comparados resultados obtidos para durações de ensaios iguais a 1 e 2 vezes o tempo de retenção, conclui-se que cada ensaio deverá ter uma duração superior a pelo menos duas vezes o respetivo tempo de retenção.

Para a mesma taxa superficial, observou-se que o rendimento é maior para maiores concentrações de SST do afluente. Para a mesma concentração de SST do efluente, o rendimento diminuiu para taxas superficiais superiores, e aumenta quando o tempo de retenção aumenta. Estes resultados estão de acordo com o relatado na bibliografia (e.g. Metcalf & Eddy (2002) e WEF (2005)), possibilitando assim a validação da metodologia experimental adoptada.

#### **5.3.4 Variação do rendimento para ensaios com uma duração igual a duas vezes o tempo de retenção**

Foi analisada a variação do rendimento obtido em ensaios com uma duração igual a 2 vezes o tempo de retenção, em função da taxa superficial e concentração de SST do afluente, de maneira a possibilitar uma melhor análise do fenómeno.

Tabela 5.8- Rendimento em percentagem para T.E./T.R.=2

| %    | Sem Arejamento (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h) |      |       | Com Arejamento(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h) |      |      |
|------|--|------|-------|---|------|------|
|      | 1,74   | 1,25 | 1     | 1,74  | 1,25 | 1    |
| mg/L | 1,74   | 1,25 | 1     | 1,74  | 1,25 | 1    |
| 350  | 59,4   | 75,7 | 77,4  | 47  | 52,4 | 56,8 |
| 500  | 66,7   | 79,8 | 82,41 | 49,2  | 58,1 | 58,8 |
| 1000 | 75,2   | 91,9 | 92,2  | 51,8  | 63   | 64,7 |

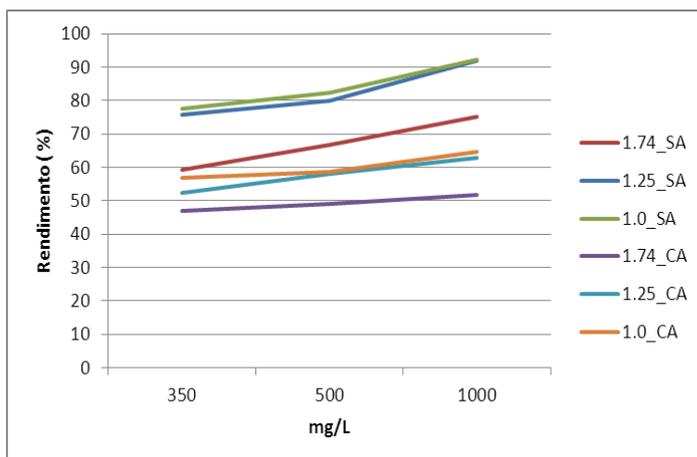


Figura 5.9- Gráfico que relaciona o rendimento com a concentração para T.E./T.R.=2, para diferentes taxas superficiais em ensaios sem ar (SA) e com ar (CA)

Da observação do gráfico da figura 5.9 verifica-se que o rendimento aumenta com a concentração, tendo os ensaios idênticas linhas de tendência.

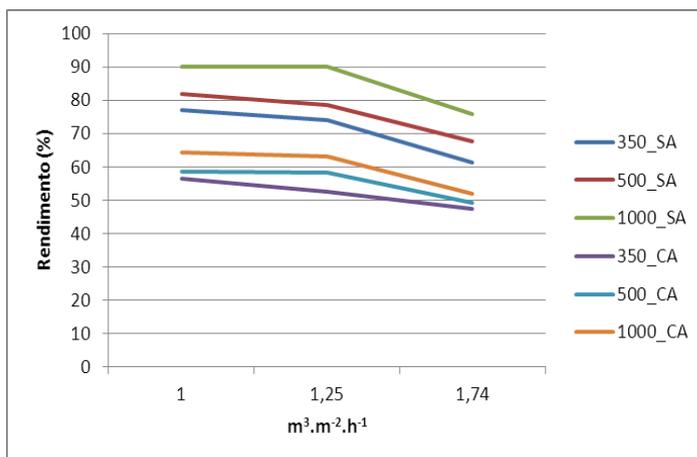


Figura 5.10- Gráfico que relaciona o rendimento com a taxa superficial para T.E./T.R.=2 para diferentes concentrações em ensaios sem ar (SA) e com ar (CA)

Da observação do gráfico da figura 5.10, que relaciona o rendimento para uma duração dos ensaios igual a 2 vezes o tempo de retenção com a taxa superficial, pode-se concluir que o rendimento aumenta com a diminuição da taxa superficial, o que está de acordo com Metcalf & Eddy (2002), tendo os ensaios idênticas linhas de tendência.

### 5.3.5 Método de acordo com S. Clesceri et al. (1999)

Apresenta-se neste estudo um método (S. Clesceri et al., 1999) desenvolvido no laboratório da empresa Águas do Noroeste, sendo este método aferidor do método desenvolvido para a determinação de SST no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade do Minho. Os ensaios foram efetuados na instalação laboratorial do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade do Minho, e foi retirada uma amostra para cada ensaio correspondente a uma duração dos ensaios igual a 2 vezes o tempo de retenção, de acordo com a análise da subsecção 5.3.3.

#### 5.3.5.1 Resultados dos valores das percentagens do rendimento dos ensaios

A tabela 5.9 apresenta os resultados dos rendimentos dos ensaios obtidos no laboratório da empresa Águas do Noroeste

Tabela 5.9- Rendimento em percentagem para T.E./T.R.=2

| %    | Sem Arejamento (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h) |      |      | Com Arejamento(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h) |      |      |
|------|--|------|------|---|------|------|
|      | 1,74   | 1,25 | 1    | 1,74  | 1,25 | 1    |
| mg/L |  |      |      |   |      |      |
| 350  | 62,8   | 77,5 | 78,4 | 46,4  | 51,7 | 55,8 |
| 500  | 69,4   | 81,7 | 84,1 | 50,5  | 57,8 | 58,3 |
| 1000 | 77,8   | 90,7 | 93,6 | 52,3  | 62   | 63,7 |

Quando se comparam os resultados da tabela (5.9) com os da tabela (5.8), observa-se que os valores determinados pelo método S. Clesceri et al. (1999) são em média superiores no caso sem arejamento, mas inferiores no caso com arejamento. Isto pode dever-se ao facto dos rendimentos terem sido obtidos em ensaios diferentes.

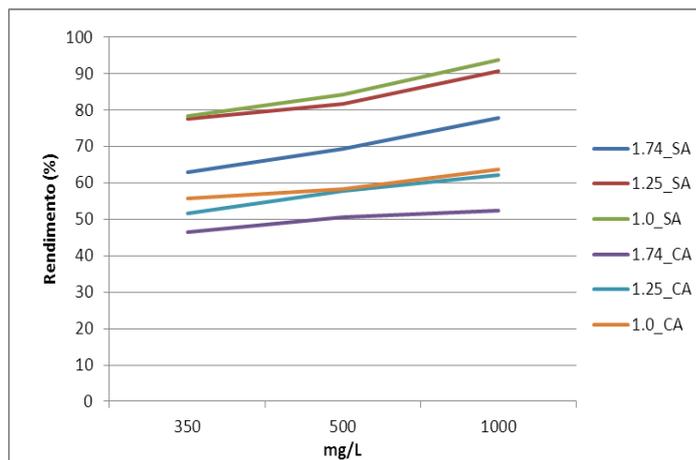


Figura 5.11- Gráfico que relaciona o rendimento com a concentração para T.E./T.R.=2, para diferentes taxas superficiais em ensaios sem ar (SA) e com ar (CA)

Da observação da figura 5.11, que relaciona o rendimento do sedimentador com a concentração, verifica-se que o rendimento aumenta com a concentração do efluente.

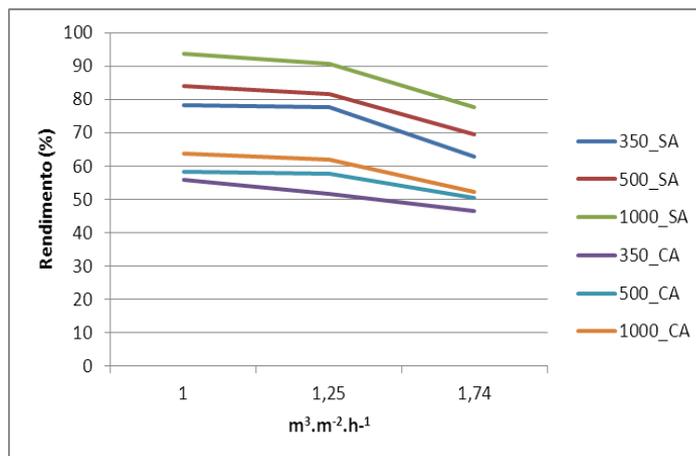


Figura 5.12- Gráfico que relaciona o rendimento com a taxa superficial para o segundo tempo de retenção, para diferentes concentrações em ensaios sem ar (SA) e com ar (CA)

Da observação da figura 5.12, que relaciona o rendimento do sedimentador com a taxa superficial, verifica-se que o rendimento aumenta com a diminuição da taxa superficial e que os ensaios com maiores concentrações e sem arejamento apresentam rendimentos superiores.

## 5.4 Conclusões

Da análise dos resultados apresentados neste capítulo pode-se concluir que o fenómeno da sedimentação pode ser estudado em laboratório, recorrendo a uma solução de água e caulino como efluente laboratorial. Obtiveram-se rendimentos de sedimentação superiores para concentrações de SST no efluente superiores, o que está de acordo com Svarovsky (2000) numa gama de valores superiores a bibliografias mais convencionais (Metcalf & Eddy, 2002). De acordo com um estudo mais exaustivo (WEF, 2005), é também conclusivo que o rendimento da sedimentação aumenta com a diminuição da taxa superficial, que corresponde a um maior tempo de retenção.

A possibilidade de efetuar o pré-arejamento do efluente não permitiu a diminuição dos SST no efluente após sedimentação, como seria de esperar, já que o arejamento possibilita uma distribuição mais homogénea dos SST e a sua floculação (Metcalf & Eddy, 2002). Isto foi atribuído aos facto do efluente ser uma simulação de água residual com um inerte e não água residual com toda a sua complexidade. Para além disso foi perceptível, durante a realização dos ensaios, a forma como a turbulência associada à injeção de ar observada na instalação laboratorial afetava a sedimentação (WEF, 2005), tendo-se concluído ser este o fator mais condicionante para o menor rendimento de sedimentação observado. Acresce ainda o facto da sedimentação ter obedecido a um padrão mais regular sem arejamento e mais irregular com arejamento, sendo contudo aleatório na sua forma por razões que não foi possível determinar. No entanto observou-se sempre que no caso de introdução de ar o rendimento era inferior ao observado sem introdução de ar.

Ao longo do tempo de duração dos ensaios a sedimentação apresentou um aumento do rendimento quando os ensaios foram realizados em introdução de ar. Isto foi atribuído à dificuldade em operar a instalação em regime permanente. Considerou-se que, na instalação experimental utilizada, os ensaios deveriam ter uma duração mínima de duas vezes o tempo de retenção.

O método de determinação de SST desenvolvido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade do Minho apresenta-se viável pois é corroborado através da similitude dos resultados com o método habitualmente usado para este efeito, e que foi aplicado no laboratório da empresa Águas do Noroeste de acordo com S. Clesceri et al. (1999).



## 6 CONCLUSÃO

### 6.1 Reflexões gerais e conclusões principais

O presente trabalho consistiu no estudo experimental do fenómeno da sedimentação num sedimentador primário de uma ETAR, tendo-se desenvolvido um método experimental simplificado que permite a avaliação da eficiência da sedimentação.

Para o efeito apresenta-se nesta dissertação um estudo das possibilidades de realizar um modelo à escala reduzida de um sedimentador, tendo-se concluído que idealmente o modelo deveria apresentar um diâmetro entre 0,25 e 0,5 m.

O estudo em instalação experimental do fenómeno da sedimentação foi realizado no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil em Azurém, utilizando para o efeito uma instalação já existente e que apesar de não permitir o estudo da sedimentação com base num modelo à escala reduzida, possibilitou o estudo paramétrico da sedimentação em função da taxa superficial, da concentração de SST do afluente e da utilização ou não de arejamento. Observaram-se rendimentos superiores para concentrações do afluente superiores e em regimes de escoamento laminares, sendo sendo o rendimento da sedimentação inferior quando o escoamento apresentava turbulência local, induzida pela injeção de ar. Salienta-se também o facto de nos regimes laminares existir um substancial aumento do rendimento durante o tempo de ensaio, o que não se verifica no caso de injeção de ar, visto neste caso o rendimento ser constante durante a mesma duração do ensaio. Foi igualmente observado que o rendimento tende a aumentar com a diminuição da taxa superficial.

O método desenvolvido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia da Universidade do Minho, com base na teoria da sedimentação, provou ser viável e apresenta-se como método ersatz em instalações laboratoriais com menos recursos. Assim, demonstrou-se a viabilidade de utilização de uma solução de água e caulino como um efluente laboratorial e a possibilidade de determinar concentrações através da determinação da massa de caulino após a evaporação das amostras. Contudo é importante referir que este método exige um cuidado superior no tratamento da amostra, em relação ao método encontrado em S. Clesceri et al. (1999), dada a possível contaminação do recipiente da amostra por agentes externos alheios à análise, obrigando a que o recipiente esteja limpo, sem impurezas e a um cuidado excecional no seu manuseamento.

## **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Tendo-se tratado de um estudo da sedimentação através de uma água residual simulada com pó de caulino que não permite a análise da CBO e CQO dado ser um inerte, e de não ter sido também possível a manipulação do espaço físico da instalação laboratorial, propõe-se para trabalho futuro:

- Um período substancialmente mais alargado dos ensaios de forma a ter um histórico mais lato do comportamento do sedimentador ao longo do tempo, normalizado em tempos de retenção.

- A criação de uma água residual sintética que permita também a análise da CBO e CQO, para além do rendimento do sedimentador analisado na presente dissertação.

- A criação de instalações laboratoriais em acrílico transparente com base na semelhança de Froude.

- A análise da trajetória das partículas.

- Fazer ligação do modelo reduzido com modelos reais e de simulação numérica.

## Bibliografía

- Alan, S., Michaels & Bolger, J. C., 1962. *SETTLING RATES AND SEDIMENT VOLUMES OF FLOCCULATED KAOLIN SUSPENSIONS*, Cambridge: MIT.
- Bagatur, T., 2009. *Evaluation of Preaeration with V-Notch Weir and Cascade*. s.l., JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING.
- De Clercq, J. et al., 2003. *A new one-dimensional clarifier model – verification using full-scale experimental data*, Gant: IWA.
- Deininger, A., Holthausen, E. & Wilderer, P. A., 1998. *VELOCITY AND SOLIDS DISTRIBUTION IN CIRCULAR SECONDARY CLARIFIERS: FULL SCALE MEASUREMENTS AND NUMERICAL MODELLING*, Munique: Pergamon.
- Esler, J., 2010. *Clarifier Performance Evaluations*, s.l.: October.
- Fornshell, G., 2001. *Settling Basin Design*. Moscovo, WRAC.
- HDR, 2006. *Human Development Report 2006*, Nova Iorque: Human Development Report.
- He, C., Wood, J., Marsalek, J. & Rochfort, Q., 2008. *Using CFD Modeling to Improve the Inlet Hydraulics and Performance of a Storm-Water Clarifier*, Toronto: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING.
- Huang, T.-L., Li, Y.-X. & Zhang, H., 2008. *Theoretical analysis on non-uniformity of water distribution and influence of construction parameters on settling efficiency*, Xian: IWA Publishing.
- Metcalf & Eddy, 2002. *Wastewater Engineering*. 4° ed. Singapura : B.J. Clark.
- Nopens, I., Capalozza, C. & Vanrolleghem, P. A., 2001. *Stability analysis of a synthetic municipal*. Gent, Universiteit Gent.
- Novais-Barbosa, J., 1985. *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral*. 1° ed. Porto: Porto Editora.
- Rostami, et al., 2010. *Numerical modeling on inlet aperture effects on flow pattern in primary settling*, Malásia : Appl. Math. Modelling.
- S. Clesceri, L., Rice, E. W., Baird, R. B. & D. Eaton, A., 1999. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 20° ed. s.l.:American Public Health Association.
- Steel, E. & McGhee, T. J., 1979. *Water Supply and Sewerage*. 5° ed. Nova Iorque: B.J. Clark.
- Svarovsky, L., 2000. *Solid-Liquid Separation*. 4° ed. Oxford: Butterworth Heinemann.
- Tillman, G. M., 1992. *Primary Treatment at Wastewater Treatment Plants*. 1° ed. Londres: Lewis Publishers.
- Torres Lozada, P., Foresti, E. & Vazoller, R., 1998. *COMPOSICIÓN Y USO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN REACTORES A ESCALA DE LABORATORIO*, Cali: Univalle.Fac.Ing.
- Tränckner, J., Franz, T., Seggelke, K. & Krebs, P., 2007. *Dynamic optimisation of WWTP inflow to reduce total emission*, Dresden: Technische Universita Dresden.
- WEF, 1992. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. 1° ed. Nova Iorque: Manual and Report on Engineering .
- WEF, 2005. *Clarifier Design*. 2 ed. Nova Iorque: McGraw-Hill.

Wilkinson, D., Waldie, B., Nor, M. & Lee, H. Y., 2000. *Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators*, Edimburgo: Chemical Engineering Journal.

Yoon, T. H. & Lee, S. O., 2000. *Hydraulic Behavior and Removal Efficiency of Settling Tanks*, Seoul: Journal of Civil Engineering.

Zhang, W., Zhihong, Z. & Sui, J., 2010. *Numerical simulation of a horizontal sedimentation tank considering sludge recirculation*, Cantão: Journal of Environmental Sciences.

# **ANEXO I**

## Anexo I

No presente anexo apresentam-se os valores dos dados medidos em grama e calculados em percentagem.

### 1 Tabelas de Resultados dos valores de massa lidos no ensaio.

Tabela 1.1- Resultados da massa com Taxa Superficial  $1,74 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  sem arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4  | g |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| 350               | 0,0261 | 0,0213 | 0,018  | 0,0156 |   |
| 500               | 0,0324 | 0,025  | 0,0214 | 0,0178 |   |
| 1000              | 0,0529 | 0,0372 | 0,0307 | 0,0244 |   |

Tabela 1.2- Resultados da massa com Taxa Superficial  $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  sem arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4  | g |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| 350               | 0,0195 | 0,0128 | 0,0114 | 0,0107 |   |
| 500               | 0,0228 | 0,0151 | 0,014  | 0,0127 |   |
| 1000              | 0,0267 | 0,0121 | 0,0108 | 0,0096 |   |

Tabela 1.3- Resultados da massa com Taxa Superficial  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  sem arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4  | g |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| 350               | 0,0177 | 0,0119 | 0,0101 | 0,0087 |   |
| 500               | 0,0198 | 0,0132 | 0,0115 | 0,0097 |   |
| 1000              | 0,0306 | 0,0117 | 0,0099 | 0,0072 |   |

Tabela 1.4-Resultados da massa com Taxa Superficial  $1,74 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  com arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4  | g |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| 350               | 0,0278 | 0,0278 | 0,0275 | 0,0277 |   |
| 500               | 0,0378 | 0,0381 | 0,0384 | 0,0381 |   |
| 1000              | 0,0712 | 0,0723 | 0,0726 | 0,0726 |   |

Tabela 1.5- Resultados da massa com Taxa Superficial  $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  com arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4  | g |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| 350               | 0,025  | 0,025  | 0,025  | 0,025  |   |
| 500               | 0,0312 | 0,0314 | 0,0314 | 0,0314 |   |
| 1000              | 0,0543 | 0,0555 | 0,0552 | 0,0553 |   |

Tabela 1.6- Tabela 1.3- Resultados da massa com Taxa Superficial  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  com arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4  | g |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|---|
| 350               | 0,0229 | 0,0227 | 0,023  | 0,023  |   |
| 500               | 0,0309 | 0,0309 | 0,031  | 0,031  |   |
| 1000              | 0,0529 | 0,0529 | 0,0535 | 0,0546 |   |

## 2 Tabelas de Resultados dos TSe em mg/L

Tabela 2.1- Resultados dos TSe para Taxa Superficial  $1,74 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  sem Arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4  | mg/L |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|------|
| 350               | 174    | 142    | 120    | 104    |      |
| 500               | 216    | 166,66 | 142,66 | 118,66 |      |
| 1000              | 352,66 | 248    | 204,66 | 162,66 |      |

Tabela 2.2- Resultados dos TSe para Taxa Superficial  $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  sem Arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1 | T.R.2  | T.R.3 | T.R.4 | mg/L |
|-------------------|-------|--------|-------|-------|------|
| 350               | 130   | 85,33  | 76    | 71,33 |      |
| 500               | 152   | 100,66 | 93,33 | 84,66 |      |
| 1000              | 178   | 80,66  | 72    | 64    |      |

Tabela 2.3- Resultados dos TSe para Taxa Superficial  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  sem Arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1 | T.R.2 | T.R.3 | T.R.4 | mg/L |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| 350               | 118   | 79,33 | 67,33 | 58    |      |
| 500               | 132   | 88    | 76,66 | 64,66 |      |
| 1000              | 204   | 78    | 66    | 48    |      |

Tabela 2.4- Resultados dos TSe para Taxa Superficial  $1,74 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  com Arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4  | mg/L |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|------|
| 350               | 185,33 | 185,33 | 183,33 | 184,66 |      |
| 500               | 252    | 254    | 256    | 254    |      |
| 1000              | 474,66 | 482    | 484    | 484    |      |

Tabela 2.5- Resultados dos TSe para Taxa Superficial  $1,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  com Arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4    | mg/L |
|-------------------|--------|--------|--------|----------|------|
| 350               | 166,66 | 166,66 | 166,66 | 166,66   |      |
| 500               | 208    | 209,33 | 209,33 | 209,33   |      |
| 1000              | 362    | 370    | 368    | 368,6667 |      |

Tabela 2.6- Resultados dos TSe para Taxa Superficial  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  com Arejamento

| Concentração mg/L | T.R 1  | T.R.2  | T.R.3  | T.R.4  | mg/L |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|------|
| 350               | 152,66 | 151,33 | 153,33 | 153,33 |      |
| 500               | 206    | 206    | 206,66 | 206,66 |      |
| 1000              | 352,66 | 352,66 | 356,66 | 364    |      |