

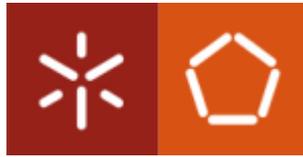
**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

José Pedro Torrinha Ferreira Lima

**Estudo Experimental da Influência da  
Configuração de Entrada na Eficiência  
de Remoção de um Sedimentador Primário**

Outubro de 2014



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

José Pedro Torrinha Ferreira Lima

**Estudo Experimental da Influência da  
Configuração de Entrada na Eficiência  
de Remoção de um Sedimentador Primário**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho Efetuado sob a orientação:

Professora Doutora Maria Manuela Carvalho de  
Lemos Lima

Outubro de 2014

## **AGRADECIMENTOS**

Um sincero agradecimento à Professora Doutora Manuela Lima, pela orientação, dedicação, disponibilidade, incentivo, paciência e, mais importante de tudo, por não desistir de mim e acreditar sempre.

Agradeço ao Técnico do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos, Sr. Rui Oliveira pelo apoio disponibilizado durante a fase experimental da dissertação. Sempre presente e sempre prestável quando era necessário.

Agradeço ao Professor Doutor Júlio Ferreira Silva pela disponibilidade demonstrada na cedência do turbidímetro, para a realização do trabalho experimental, durante o tempo necessário.

Agradeço aos meus pais, Carlindo José e Maria do Carmo, pela paciência e pelo apoio que sempre demonstraram durante esta fase da minha vida.

Agradeço à minha irmã, Joana, pelos conselhos, que foram fundamentais para algumas decisões da minha vida durante esta etapa.

Agradeço à minha namorada, Carolina, pela paciência demonstrada e por me ter ajudado nas alturas mais difíceis, sempre com palavras de apoio e incentivo.

Aos meus amigos, Tiago, João, Vítor, Paulo, um agradecimento muito especial, por tudo que me proporcionaram durante esta etapa.



## RESUMO

A sedimentação é um processo simples e muito utilizado em estações de tratamento de águas residuais, para remoção de sólidos suspensos (SS), utilizando para o efeito sedimentadores primários. A eficiência de remoção de sólidos suspensos através dos sedimentadores primários é condicionada por diversos fatores, sendo um dos mais importantes o seu correto dimensionamento onde a configuração de entrada desempenha um papel essencial.

A presente dissertação refere-se a um estudo experimental da influência que a zona de entrada tem na eficiência de remoção do sedimentador, bem como no escoamento superficial do mesmo. Foi estudado um modelo reduzido de um sedimentador primário e foram utilizadas duas configurações de entrada. A primeira configuração consistiu numa única entrada pontual e em duas chicanas (uma móvel e uma fixa). A chicana móvel foi posicionada a 1, 2 e 3 cm do fundo do sedimentador. A segunda configuração consistiu num tubo perfurado de acrílico em forma de “T”, colocado diretamente no orifício de entrada do modelo. Foram efetuados quatro orifícios com 5 mm de diâmetro cada um de forma a terem uma área total equivalente à do tubo de entrada. Neste caso utilizou-se ainda uma chicana móvel, posicionada a 1, 2 e 3 cm do fundo do sedimentador.

Para cada uma das configurações foi estudado o fenómeno de sedimentação através de soluções aquosas de caulino para simular a água residual. Os ensaios foram efetuados em cada uma das configurações para caudais de 0.23, 0.35 e 0.5 L/min e concentração de caulino igual a 50 e 100 mg/L.

Em relação à primeira configuração de entrada a maior eficiência de remoção, igual a 25 %, foi observada com a chicana posicionada a 2 cm da base para um caudal de 0.23 L/min e concentração de 50 mg/L

Em relação à segunda configuração de entrada a maior eficiência de remoção, igual a cerca de 40 %, foi observada para um caudal de 0.35 L/min, uma concentração de caulino de 50 mg/L e chicana posicionada a 1 cm da base.

A visualização do escoamento foi realizada com a segunda configuração de entrada, com a chicana posicionada a 1 cm e sem chicana, e com o auxílio do traçador azul-de-metileno. Foi possível verificar que o modelo experimental se encontrava nivelado não se identificando zonas mortas no interior do sedimentador.

## ABSTRACT

Sedimentation is a simple and very widely used process in wastewater treatment stations to remove suspended solids (SS) by gravitational force in wastewaters. The efficiency of the removal of suspended solids through primary sedimentation tanks is mainly affected by the correct design of the primary tanks, where the inlet design is fundamental.

This dissertation refers to the experimental study of the inlet zone influence on the removal efficiency and on the superficial flow in a laboratory model of a primary sedimentation tank. A reduced model of a primary sedimentation tank was investigated and it was used two different design configurations of the inlet of the tank. The first design configuration consisted in a single water entrance and two baffles, one movable and the other fixed. The movable baffle was positioned 1, 2 and 3 cm from the bottom of the tank. The second configuration consisted in the insertion of an acrylic tube with a T shape, placed directly in the water supply of the tank model. Four holes with 5 mm diameter each, were made and the total area equivalent to the section area of the water tube. In this case only a mobile baffle was used, positioned at 1, 2 and 3 cm from the bottom of the tank.

For each one of the configurations was studied the sedimentation phenomenon through kaolin aqueous solutions for the simulation of the wastewater. The trials were done for each configuration with flow rates of 0.23, 0.35 and 0.5 L/min and kaolin concentrations of 50 and 100 mg/L.

The best removal efficiency of 25% in the first configuration was observed with a baffle position of 2 cm from the bottom of the tank, a flow rate of 0.23 L/min and kaolin concentration of 50 mg/L.

The best removal efficiency of 40% the second configuration was observed with a baffle position of 1 cm from the bottom of the tank, a flow rate of 0.35 L/min and a kaolin concentration of 50 mg/L.

The superficial flow visualization was performed with the second configuration, with the baffle positioned at 1 cm and without baffle, using methylene blue as a tracer. It was possible to verify that the model was correctly leveled and without circulation zones inside it.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABELAS .....	xiii
ÍNDICE DE EQUAÇÕES .....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Interesse e enquadramento do tema.....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Estrutura da dissertação .....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Sistema de tratamento de águas residuais .....	5
2.2 Sedimentação em águas residuais .....	7
2.2.1 Definição.....	7
2.2.2 Vantagens e desvantagens da utilização de sedimentadores primários	9
2.2.3 Fatores que influenciam a sedimentação .....	10
2.2.4 Tipos de sedimentadores.....	10
2.2.4.1 Sedimentadores retangulares.....	11
2.2.4.2 Sedimentadores Circulares.....	12
2.2.4.3 Sedimentadores de lamelas .....	13
2.2.4.4 Sedimentadores quadrados.....	15
2.3 Estudos sobre a sedimentação .....	17
2.3.1 Influência do posicionamento de uma chicana na eficiência de remoção	17
2.3.2 Efeitos da configuração de entrada no padrão do escoamento em sedimentadores primários.....	18
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	19
3.1 Instalação experimental .....	19
3.2 Equipamentos de medição e visualização .....	23
3.2.1 Equipamento de visualização.....	23
3.2.2 Medição da turvação .....	24
3.3 Condições experimentais.....	25
3.4 Metodologia experimental.....	29

3.4.1	Incerteza experimental da turvação .....	31
3.4.2	Incerteza experimental do rendimento.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
4.1	Resultados experimentais .....	35
4.1.1	Visualização do escoamento.....	35
4.1.1.1	Visualização do escoamento sem chicana.....	35
4.1.1.2	Visualização do escoamento com a chicana posicionada a 1 cm da base	37
4.2	Eficiência de remoção – Fase 1 .....	39
4.2.1	Eficiência de remoção para um caudal de 0,23 L/min.....	39
4.2.2	Eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min.....	42
4.2.3	Eficiência de remoção para um caudal de 0,50 L/min.....	44
4.3	Eficiência de remoção – Fase 2 .....	47
4.3.1	Eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min.....	47
4.3.2	Eficiência de remoção para um caudal de 0,5 L/min.....	50
4.4	Eficiência de remoção média – Fase 1 .....	52
4.5	Eficiência de remoção média – Fase 2 .....	55
4.6	Eficiência de remoção 1ª configuração Vs Eficiência de remoção 2ª configuração .....	58
4.6.1	Caudal de 0,35 L/min.....	58
4.6.2	Caudal de 0,5 L/min.....	60
4.7	Evolução da remoção média em função da taxa superficial.....	63
4.7	Conclusões.....	66
5	CONCLUSÕES .....	67
5.1	Conclusões.....	67
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	69
	BIBLIOGRAFIA .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de tratamento de águas residuais ETAR (disponível em <a href="http://www.agda.pt">http://www.agda.pt</a> ).....	6
Figura 2 - Sedimentador retangular (disponível em Metcalf & Eddy) .....	11
Figura 3 - Esquema de entrada do afluente, central e periférica, em sedimentadores circulares (Metcalf & Eddy, 2003).....	12
Figura 4 - Sedimentador Circular (disponível em, <a href="http://encyclopedia.che.engin.umich.edu">http://encyclopedia.che.engin.umich.edu</a> ).....	13
Figura 5 - Esquema de sedimentação com lamelas (disponível em: <a href="http://monroeenvironmental.com">http://monroeenvironmental.com</a> ).....	13
Figura 6 - Sedimentador de lamelas horizontais (disponível em, <a href="http://www.monroeenvironmental.com">http://www.monroeenvironmental.com</a> ).....	14
Figura 7 - Sedimentador de lamelas inclinadas (disponível em, <a href="http://www.monroeenvironmental.com">http://www.monroeenvironmental.com</a> ).....	15
Figura 8 - Modelo do sedimentador primário (Pereira, 2013) .....	19
Figura 9 - Dimensões do modelo de sedimentador primário (Pereira, 2013) .....	20
Figura 10 - Modelo de sedimentador primário - Fase 1, dimensões em mm.....	20
Figura 11 - Modelo do sedimentador primário, fase 2, dimensões em mm.....	21
Figura 12 - Corte do modelo do sedimentador primário, pormenor zona de entrada de água (dimensões em mm).....	21
Figura 13 - Pormenor da peça utilizada na entrada do sedimentador, vista de frente .....	22
Figura 14 - Pormenor da peça utilizada na entrada do sedimentador, vista lateral.....	22
Figura 15 - Zona de entrada do modelo do sedimentador, fase 2.....	23
Figura 16 - Câmara Sony Handycam, HDR-XR105E .....	24
Figura 17 - Turbidímetro HATCH 2100 Qis .....	25
Figura 18 - Instalação experimental.....	27
Figura 19 - Reservatório a montante da instalação experimental .....	28
Figura 20 - Reservatório de nível constante.....	28
Figura 21 - Reservatório a jusante da instalação experimental.....	29
Figura 22 - Visualização do escoamento, sem chicana, t=0 .....	36
Figura 23 - Visualização do escoamento, t=20s .....	36
Figura 24 - Visualização do escoamento, t=120s .....	36
Figura 25 - Visualização do escoamento, t=150s .....	36
Figura 26 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm, t=0 .....	37
Figura 27 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm, t=20s.....	38
Figura 28 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm, t=60s.....	38
Figura 29 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm, t=120s.....	38
Figura 30 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm, t=180s.....	39
Figura 31 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.23 L/min, chicana posicionada a 1cm, ensaios nº 1 e 4 .....	40
Figura 32 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.23 L/min, com chicana posicionada a 2 cm, ensaios nº 2 e 5 .....	40

Figura 33 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.23 L/min, com chicana posicionada a 3 cm, ensaios 3 e 6 .....	41
Figura 34 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.35 L/min, com chicana posicionada a 1 cm, ensaios nº 7 e 10 .....	42
Figura 35 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.35 L/min, com chicana posicionada a 2 cm, ensaios nº 8 e 11 .....	43
Figura 36 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.35 L/min, com chicana posicionada a 3 cm, ensaios nº 9 e 12 .....	43
Figura 37 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.50 L/min, chicana posicionada a 1 cm, ensaios nº 13 e 16 .....	45
Figura 38 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.50 L/min, chicana posicionada a 2 cm, ensaios nº 14 e 17 .....	46
Figura 39 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.50 L/min, chicana posicionada a 3 cm, ensaios nº 15 e 1 .....	46
Figura 40 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.35 L/min, chicana posicionada a 1 cm, ensaios nº 19 e 22 .....	48
Figura 41 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.35 L/min, chicana posicionada a 2 cm, ensaios nº 20 e 23 .....	49
Figura 42 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.35 L/min, chicana posicionada a 3 cm, ensaios nº 21 e 24 .....	49
Figura 43 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.5 L/min, chicana posicionada a 1 cm, ensaios nº 25 e 28 .....	50
Figura 44 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.5 L/min, chicana posicionada a 2 cm, ensaios nº 26 e 29 .....	51
Figura 45 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.5 L/min, chicana posicionada a 3 cm, ensaios nº 27 e 30 .....	52
Figura 46 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 1 cm .....	53
Figura 47 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 2 cm .....	54
Figura 48 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 3 cm .....	55
Figura 49 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 1 cm .....	56
Figura 50 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 2 cm .....	57
Figura 51 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 3 cm .....	57
Figura 52 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0.35 L/min, chicana posicionada a 1 cm .....	58
Figura 53 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0.35 L/min, chicana posicionada a 2 cm .....	59
Figura 54 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0.35 L/min, chicana posicionada a 3 cm .....	60

Figura 55 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0.5 L/min, chicana posicionada a 1 cm .....	61
Figura 56 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0.5 L/min, chicana posicionada a 2 cm .....	61
Figura 57 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0.5 L/min, chicana posicionada a 3 cm .....	62
Figura 58 - Eficiência de remoção média em função da taxa de aplicação superficial para uma concentração de 50 mg/L - Fase 1 .....	63
Figura 59 - Eficiência de remoção média em função da taxa de aplicação superficial para uma concentração de 100 mg/L - Fase 1 .....	64
Figura 60 - Eficiência de remoção média em função da taxa de aplicação superficial para uma concentração de 50 mg/L - Fase 2.....	64
Figura 61 - Eficiência de remoção média em função da taxa de aplicação superficial para uma concentração de 100 mg/L - Fase 2.....	65



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens em função do tipo de sedimentador (Thomas, 2005) .....	16
Tabela 2 - Condições Experimentais .....	30
Tabela 3 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.23 L/min - Fase 1 .....	32
Tabela 4 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.35 L/min - Fase 1 .....	32
Tabela 5 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.5 L/min - Fase 1 .....	32
Tabela 6 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.35 L/min - Fase 2 .....	33
Tabela 7 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.5 L/min - Fase 2 .....	33



## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

(1).....	30
(2).....	31
(3).....	52



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Interesse e enquadramento do tema

A água é um elemento indispensável ao ser humano pois desempenha um papel central em todos os aspetos da vida. A sua utilização associada ao facto de a água não ser um recurso inesgotável acarreta uma consciencialização ética por parte do ser humano de forma a economizar, tratar e reutilizar a água sempre que possível. Esta é dada como imprópria, poluída, quando nela contém impurezas suficientes que a tornam inutilizável para uma operação em particular, tal como, beber, nadar ou pescar (Nathanson, 2012).

Apesar da qualidade da água ser afetada por condições naturais, o termo poluição está associado ao ser humano e à sua atividade. Posto isto, a poluição da água é causada em primeira instância pelo contacto da água residual contaminada com a água à superfície ou subterrânea, pelo que o seu tratamento é absolutamente fundamental (Nathanson, 2012).

Atualmente o tratamento e reutilização de águas residuais provenientes de esgotos domésticos e/ou industriais, recorre a estações de tratamento onde irão ser sujeitas a diferentes processos de forma a poderem ser descarregadas em rios, albufeiras ou mares, sem que isso afete as características e qualidade da água do meio recetor. Do ponto de vista da saúde pública e ambiental o tratamento de águas residuais é crucial no desenvolvimento de um país, quer para a sua população, quer para ao meio ambiente envolvente.

O tratamento de águas residuais é, por definição, um processo de remoção de impurezas antes de atingirem aquíferos ou outras fontes de água naturais, tais como, rios, lagos, estuários ou oceanos. Visto que água pura, no sentido literal, não pode ser encontrada na natureza, qualquer distinção entre água limpa e poluída depende do tipo e concentração de impurezas, bem como, no uso que a água terá (Nathanson, 2012).

## 1. Introdução

---

O processo de tratamento engloba várias fases: tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário. Cada nível de tratamento tem órgãos especializados de modo a desempenhar uma função específica para que após todas as fases de tratamento a água cumpra requisitos estabelecidos de forma a ser descarregada no meio receptor. Um dos órgãos mais comuns utilizados em estações de tratamento de águas residuais é o sedimentador primário devido à elevada eficiência associado ao baixo custo de construção e manutenção. Esta unidade de tratamento recorre ao processo físico de sedimentação para remover partículas mais densas que a água, produzindo assim um efluente clarificado.

Apesar de teoricamente o processo de sedimentação ser um processo simples e sem grande complexidade, a sua utilização no tratamento de águas residuais agrega alguns fatores que amplificam o grau de complexidade tais como a variedade de granulometrias dos resíduos sólidos e a interação de partículas que por vezes se comportam como partículas floculadas e não discretas. Isto associado a um dimensionamento empírico de sedimentadores primários, que tem vindo a ser realizado ao longo do tempo mostra a importância da investigação e do estudo do comportamento hidráulico de sedimentadores primários com o objetivo de melhorar a eficiência de remoção.

O presente estudo debruça-se na premissa de que a sedimentação primária em sedimentadores primários não está inteiramente estudada no que toca à sua capacidade de remoção em função da configuração da zona de entrada. Assim, por via de trabalho experimental, foi avaliada a sedimentação num modelo de sedimentador primário de forma a aferir possíveis melhorias na capacidade de sedimentação, o que se traduz numa melhor eficiência de remoção de sólidos suspensos e num melhor desempenho dos processos unitários de tratamento a jusante de uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR).

## 1.2 Objetivos

Na presente dissertação estuda-se experimentalmente a sedimentação em sedimentadores primários utilizando um modelo reduzido existente no Laboratório de hidráulica e recursos hídricos da Universidade do Minho. O principal objetivo será aferir se com as alterações realizadas na zona de entrada do sedimentador tem implicações ao nível da eficiência de remoção.

Pretendeu-se então concretizar os seguintes objetivos:

- Estudar que alterações ao nível da configuração de entrada são possíveis de executar no modelo de sedimentador existente;
- Executar as alterações propostas, e avaliar a eficiência de remoção removendo uma das chicanas presentes no modelo de sedimentador – Fase 1. Alterar a configuração de entrada do sedimentador através de um tubo de acrílico com quatro orifícios com área total da secção equivalente à área da secção de entrada do sedimentador – Fase 2;
- Comparar os resultados obtidos de eficiência de remoção obtidos com as alterações mencionadas, percebendo de que forma a alteração afetou a eficiência de remoção do sedimentador.

De forma a alcançar os objetivos propostos a presente dissertação foi dividida em várias fases.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica para perceber de que forma alterações na configuração de entrada de um sedimentador influenciavam a eficiência de remoção do mesmo. A partir das configurações de entrada estudadas foi necessário perceber quais seriam possíveis de ser utilizadas no modelo de sedimentador primário disponível.

Na segunda fase foi executada uma alteração ao nível da remoção da primeira chicana do referido modelo de sedimentador, mantendo uma chicana móvel e uma fixa, alterando assim a configuração de entrada do sedimentador. Foram realizados vários ensaios experimentais para verificar a eficiência de remoção do sedimentador ao variar a posição da chicana móvel (1, 2 e 3 cm) bem como a concentração de caulino (50 e 100 mg/L) e o caudal a tratar pelo modelo (0.23, 0.35 e 0.5 L/min).

Na terceira fase, foi realizada uma nova alteração na zona de entrada do sedimentador, colocando um tubo de acrílico na horizontal, com quatro orifícios na zona frontal, com uma secção total equivalente à secção do tubo de entrada de água. Após a implementação desta alteração, foi estudado a eficiência de remoção em função da posição da chicana, concentração de caulino e caudal de entrada.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos, sendo que o presente capítulo é o primeiro e tem uma função de capítulo introdutório. No capítulo seguinte é apresentado uma síntese dos conhecimentos obtidos abordando o fenómeno da sedimentação e o tratamento de águas residuais. No terceiro capítulo realiza-se a descrição da instalação experimental e dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios laboratoriais. No quarto capítulo apresentam-se as condições experimentais e analisam-se os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. Por fim, no quinto e último capítulo, trata das conclusões finais.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

No presente capítulo apresenta-se de uma forma detalhada o fenómeno da sedimentação bem como a sua relação com as estações de tratamento de águas residuais.

### **2.1 Sistema de tratamento de águas residuais**

A água proveniente de esgotos domésticos e industriais tem de ser tratada para depois ser lançada no meio recetor (rios, albufeiras, mares). Para tal, são utilizadas estações de tratamento.

O objetivo principal de uma estação de tratamento de águas residuais são a remoção de partículas presentes na água para que esta tenha as condições necessárias para ser introduzida no meio recetor com o mínimo impacto ambiental possível. As partículas fundamentais a serem removidas são: substâncias redutoras; sólidos suspensos; nutrientes (fósforo e azoto); compostos tóxicos, cheiros, cor, turvação; controlo de pH e temperatura; eliminação de microrganismos patogénicos.

O processo de tratamento de águas residuais é realizado em Estações de tratamento de águas residuais e tem como mecanismo de funcionamento, quatro fases fundamentais de tratamento:

- Tratamento preliminar
- Tratamento primário
- Tratamento secundário
- Tratamento terciário

## 2. Revisão Bibliográfica

---

As fases de tratamento enunciadas seguem um esquema de tratamento similar ao da figura 1.

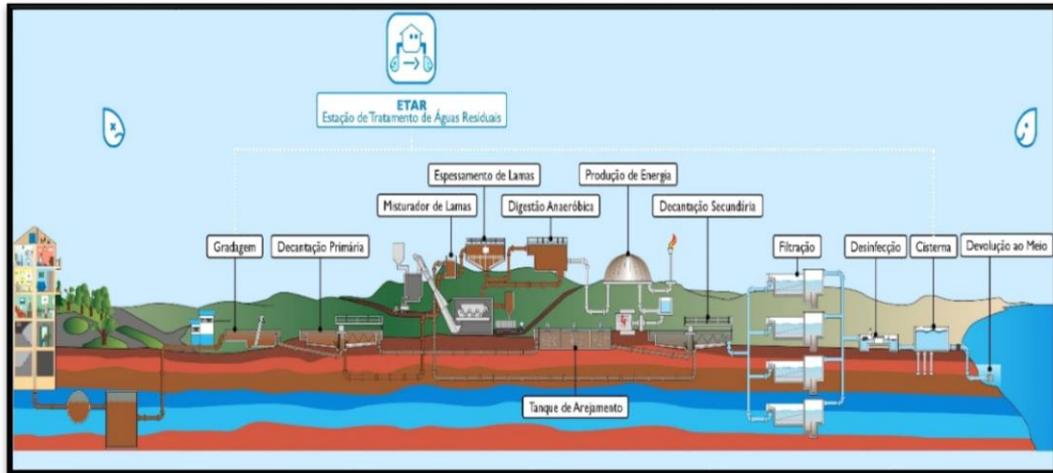


Figura 1 - Esquema de tratamento de águas residuais ETAR (disponível em <http://www.agda.pt>)

A fase de tratamento preliminar, que corresponde à gradagem na figura 1, visa a filtragem de resíduos mais grosseiros, flutuantes e sedimentáveis. A sua importância revela-se no impedimento de entupimentos e bloqueios dos equipamentos situados a jusante do processo.

O tratamento primário, usualmente executado por sedimentadores primários, tem como objetivo a remoção de sólidos suspensos, de matéria orgânica e inorgânica, presentes no efluente a tratar. É extremamente importante para que o tratamento secundário funcione dentro dos parâmetros esperados, em termos de concentrações de matéria orgânica e inorgânica presente na água residual a tratar.

O tratamento secundário consiste em processos biológicos seguidos de processos físico-químicos fundamentais para a remoção de matéria orgânica biodegradável. Relativamente aos processos biológicos podem ser utilizados dois processos diferentes de tratamento, aeróbio (tanques de lamas ativadas, lagoas de estabilização) e anaeróbios (lagoas de estabilização e digestores anaeróbios, figura 1). O processo físico-químico é desempenhado por sedimentadores secundários com o objetivo de clarificar o efluente através da sedimentação.

O tratamento terciário nem sempre é utilizado, é um tratamento de afinação usado de acordo com a carga do efluente a tratar e destino final. No entanto, é um tratamento de extrema importância quando necessário. A sua utilização é destinada à remoção de nutrientes, azoto, fósforo e microrganismos patogênicos, recorrendo à desinfecção do efluente.

## **2.2 Sedimentação em águas residuais**

### **2.2.1 Definição**

A remoção de partículas suspensas e coloidais de água residual por separação gravítica é uma das operações mais usadas mundialmente. A sedimentação é o termo aplicado à separação de partículas suspensas mais densas que a água mediante a gravidade (Tchobanoglous et al., 2003).

Existem quatro tipos de sedimentação, que se passarão a definir sucintamente no texto que se segue:

**Sedimentação de partículas discretas (tipo I)** - As Partículas sedimentam individualmente não ocorrendo interligações com partículas vizinhas passivas de floclarem. As características físicas são mantidas ao longo da sedimentação bem como a velocidade de sedimentação que é constante ao longo da profundidade do sedimentador. As partículas discretas experienciam fenómenos explicados através das leis de Newton (descrição do comportamento de corpos em movimento) e Stokes (comportamento de partículas esféricas contidas em regime laminar (Número de Reynolds menor que 1) onde a viscosidade é a força de maior relevância na sedimentação de partículas).

**Sedimentação de partículas flocladas (tipo II)** - Segundo Tchobanoglous et al (2003) partículas em soluções relativamente diluídas não atuarão como partículas discretas mas sim como partículas flocladas. À medida que a floclação ocorre a massa das partículas aumenta o que provoca uma velocidade de sedimentação

maior. A floculação depende de vários fatores que a irão promover caso se verifiquem, tais como, gradientes de velocidade no sistema, concentração de partículas e gama de diâmetros das partículas.

**Sedimentação em manto (tipo III)** - Em sistemas que contenham grandes concentrações de sólidos suspensos a sedimentação em manto tal como a sedimentação em compressão ocorrem, normalmente, em adição à sedimentação de partículas discretas e floculadas. Devido ao facto de haver uma grande quantidade de partículas o líquido tende a vir à superfície através dos interstícios das partículas em contacto. Devido a este contacto, as partículas tendem a sedimentar como uma zona ou manto em que, à medida que a sedimentação ocorre forma-se uma camada de água relativamente clarificada (Tchobanoglous et al.,2003).

**Sedimentação por compressão (tipo IV)** - À medida que o processo de sedimentação prossegue, uma camada de partículas começa a ser formada no fundo do sedimentador, por compressão sucessiva devido à acumulação de partículas que através do seu peso vão arrastando as que as seguem a sedimentar no fundo do sedimentador. São originadas então lamas espessas que depois serão removidas pelos sistemas de remoção inerentes ao sedimentador. Este tipo de sedimentação é influenciado pelo tempo de retenção e pela altura das lamas (Tchobanoglous et al.,2003).

A sedimentação primária é inserida no tratamento primário de águas residuais e tem como objetivo a remoção de Sólidos suspensos (SS), Carência bioquímica de oxigénio (CBO) e Carência química de oxigénio (CQO). Os materiais separáveis por sedimentação primária são:

**Partículas granulares** – Partículas que sedimentam independentemente das que as rodeiam, com velocidade relativamente constante.

**Partículas floculadas** – Partículas que resultam da aglomeração natural ou provocada por matéria coloidal em suspensão.

São utilizados sedimentadores como unidade operacional, onde a água residual é mantida durante dados períodos (períodos de retenção) em tanques com grande área de implantação. É fundamental que os sedimentadores sejam munidos de mecanismos de remoção de gorduras e espuma remanescentes do tratamento preliminar.

Os sedimentadores primários podem ser classificados de várias formas e de acordo com várias características, tanto físicas, como implícitas:

- Tipo de remoção de lamas – Manual, mecânico ou descarga hidrostática;
- Fluxo – Horizontal ou vertical;
- Configuração – Quadrado, retangular, circular;
- Finalidade – Clarificadores ou espessadores;
- Regime de operação – Contínuos ou descontínuos.

Em termos de eficiência de remoção, a sedimentação no tratamento primário apresenta taxas bastante elevadas sendo que em termos de sólidos suspensos pode variar entre 60% e 75% e de CBO pode variar entre 25% e 35%.

### **2.2.2 Vantagens e desvantagens da utilização de sedimentadores primários**

De acordo com Wahlberg (2003), os sedimentadores primários conseguem potencialmente maior remoção de SST, CBO e CQO por um menor custo que qualquer outro processo de tratamento em uso nos dias que correm.

Uma outra vantagem é que a sedimentação primária, dependendo das características da água residual, pode ter um efeito profundo no tamanho, capacidade e desempenho dos sistemas a utilizar no tratamento secundário, biológico (Wahlberg, 2003).

Posto isto, o uso de tratamento primário, designadamente sedimentação primária diminui o possível custo e aumenta a eficiência de uma Estação de tratamento de águas residuais.

### **2.2.3 Fatores que influenciam a sedimentação**

Segundo Kawamura (2000) os principais fatores que influenciam o processo de sedimentação são as características do líquido e sólidos do afluente relacionado com o processo de sedimentação e as condições hidráulicas do caudal do efluente inserido no sedimentador.

Temos então que os fatores que influenciam a sedimentação são:

- Densidade das partículas sólidas;
- Tamanho e forma das partículas;
- Tempo de retenção, ou seja, tempo que as partículas terão para sedimentar;
- Velocidade de circulação da água no sedimentador;
- Temperatura
- Concentração de SST, CBO e CQO;
- Profundidade do sedimentador;
- Características do sedimentador, tais como, zona de entrada do afluente, posicionamento das chicanas e operações de limpeza;
- Regiões de circulação que podem causar curto-circuito hidráulico e turbulência, que são situações a evitar;

### **2.2.4 Tipos de sedimentadores**

Conforme Wahlberg (2003) qualquer que seja a configuração de um sedimentador, deverá ser da responsabilidade do engenheiro encarregue do dimensionamento avaliar a melhor solução, de forma a maximizar a floculação, fornecer condições hidráulicas ideais e minimizar a atividade biológica.

Qualquer que seja a configuração do sedimentador escolhido esta terá de ter em conta em primeira fase a água residual a tratar e em função disso o dimensionamento será adequado à melhor solução possível que, no limite, cumpra os parâmetros estabelecidos.

Nas subsecções seguintes será abordado cada tipo de sedimentador existente focando o seu método de funcionamento, utilização, qualidades e benefícios que a sua utilização poderá proporcionar.

#### 2.2.4.1 Sedimentadores retangulares

A par com os sedimentadores circulares os sedimentadores retangulares são os mais utilizados no tratamento primário de águas residuais. No dimensionamento do sedimentador retangular, o projetista terá de ter em conta vários fatores em função da água residual a tratar, bem como da quantidade de lamas a tratar pelo sedimentador. Wahlberg (2003) refere que, em sedimentadores retangulares o projetista terá de ter em consideração a largura, o comprimento, a profundidade, o posicionamento de entrada da água residual no sedimentador, coletor de lamas (posicionamento, tamanho e dispositivos de remoção das mesmas), localização de chicanas, raspadores e materiais de construção.

A utilização deste tipo de sedimentadores traz vantagens no que toca aos custos associados à construção, à área ocupada e à facilidade de arrasto de lamas, que serão menores.

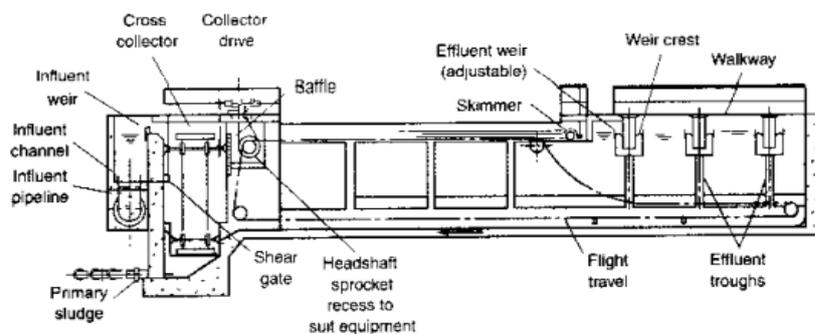


Figura 2 - Sedimentador retangular (disponível em Metcalf & Eddy)

### 2.2.4.2 Sedimentadores Circulares

Ao contrário dos sedimentadores retangulares e quadrados a circulação do caudal em sedimentadores circulares é radial. Para tal, a configuração de entrada de afluente pode seguir dois métodos, introdução central ou periférica do afluente no tanque, como mostra a figura 3.

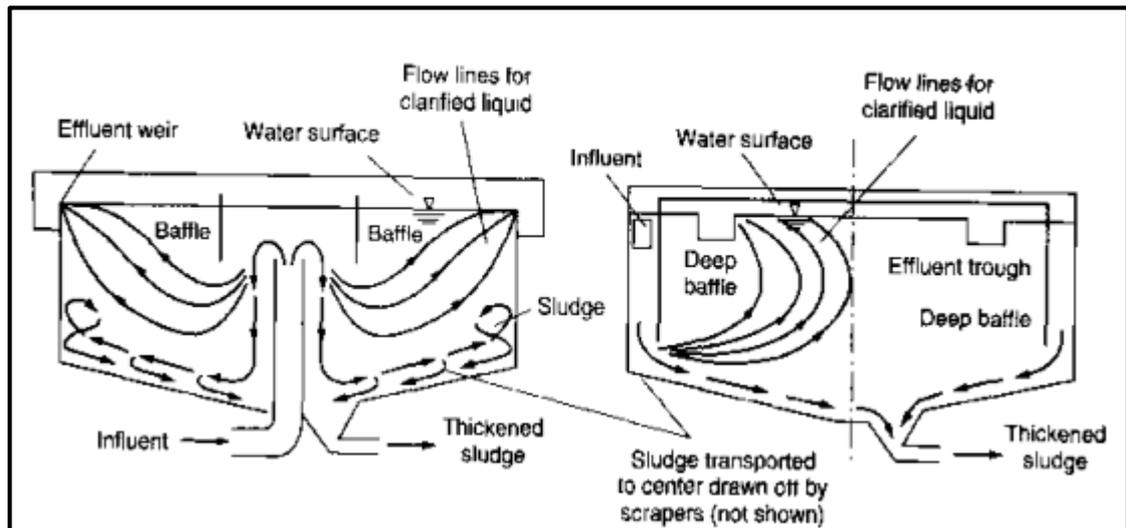


Figura 3 - Esquema de entrada do afluente, central e periférica, em sedimentadores circulares (Metcalf & Eddy, 2003)

Ambas as configurações tem provas dadas e são consideradas satisfatórias, porém, a configuração mais usada é a da entrada do afluente no centro do sedimentador. Segundo Tchobanoglou et al (2003) é usual a utilização de um diâmetro de canal central de entrada entre 15 a 20% do diâmetro total do tanque e uma gama de profundidades entre 1 a 2.5 m e deverá ser colocado um dissipador de energia tangencial ao longo do dispositivo de alimentação de afluente.

Na zona de saída é normal a utilização de um descarregador periférico com uma configuração em V ou com orifícios submersos que possibilitam uma menor quebra dos flocos e minoram a passagem de partículas sólidas para os demais processos de tratamento (Pereira, 2013).

Conforme Wahlberg (2003) deverão ser tomadas algumas decisões de dimensionamento com o intuito de melhorar o desempenho dos sedimentadores primários circulares (figura 4) para um uso adequado consoante o efluente a tratar.



Figura 4 - Sedimentador Circular (disponível em, <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu>)

#### 2.2.4.3 Sedimentadores de lamelas

Yao (1970) explica que o sedimentador lamelar é um clarificador gravitacional constituído por um série de superfícies inclinadas ou horizontais, paralelas entre si, de forma a possibilitar a formação de canais de fluxo laminar entre elas (figura 5).

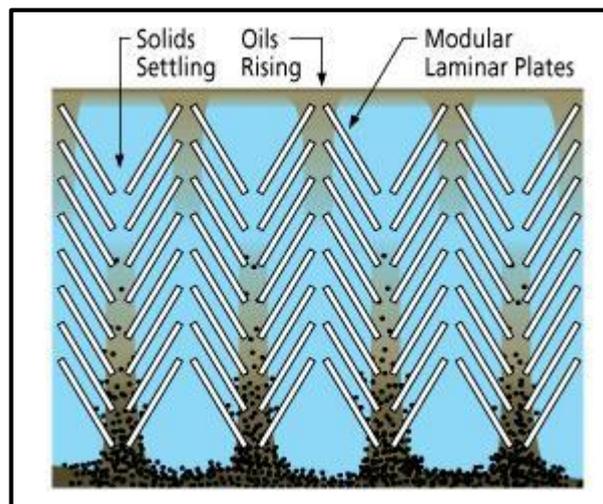


Figura 5 - Esquema de sedimentação com lamelas (disponível em: <http://monroenvironmental.com>)

## 2. Revisão Bibliográfica

---

A estrutura deste tipo de lamelas pode ser dimensionada tanto na vertical, inclinadas (figura 7) como na horizontal (figura 6) em que no caso da utilização de lamelas horizontais é recomendado um sedimentador com uma estrutura de base em cone para uma maior facilidade de remoção de lama.

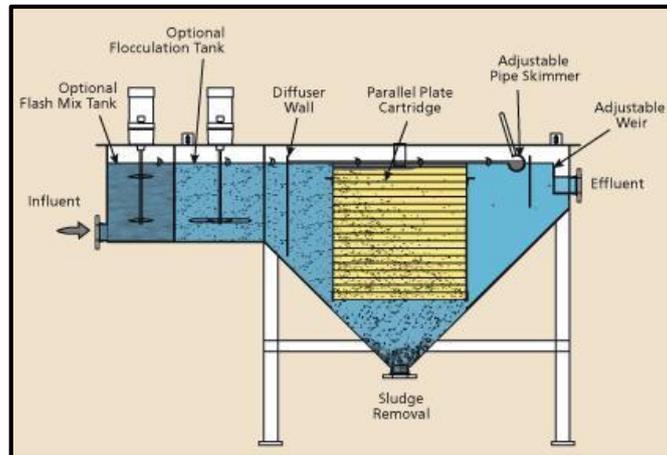


Figura 6 - Sedimentador de lamelas horizontais (disponível em, <http://www.monroeenvironmental.com>)

A grande vantagem desta configuração de sedimentação é a redução da área de projeto devido ao equipamento possuir uma área efetiva de sedimentação igual à área projetada na horizontal, de cada lamela, multiplicada pelo número de lamelas do sistema, possibilitando a construção de unidades de sedimentação de flocos compactas.

Este tipo de sedimentadores permite que haja maior área de disposição de partículas melhorando a eficiência de sedimentação.

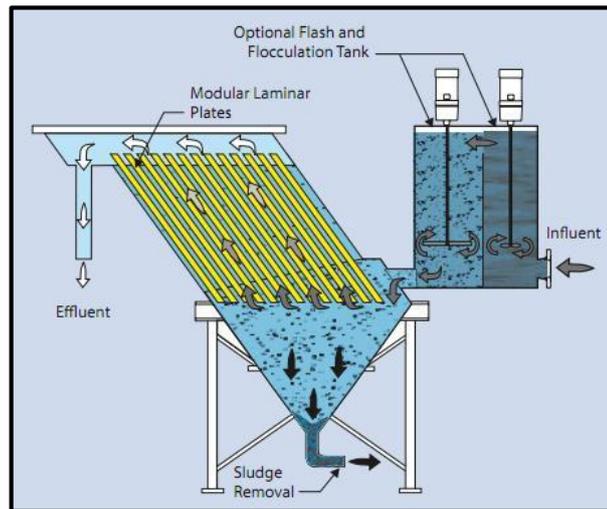


Figura 7 - Sedimentador de lamelas inclinadas (disponível em, <http://www.monroenvironmental.com>)

#### 2.2.4.4 Sedimentadores quadrados

Segundo Wahlberg (2003) sedimentadores circulares e retangulares são os mais utilizados no tratamento primário de águas residuais, porém, sedimentadores quadrados com uma remoção circular de lamas já foram usados em estações de tratamento de águas residuais.

Este tipo de configuração de sedimentadores caiu em desuso devido ao facto de ocorrerem acumulações indesejadas de lamas nos cantos do sedimentador a que advém condições hidráulicas e atividade biológica prejudicial ao objetivo de clarificação do efluente. Posto isto, este tipo de configuração de sedimentadores deverá ser evitado (Wahlberg, 2003).

Em seguida é apresentada a tabela 1 que sistematiza a informação relativa a todos os sedimentadores atrás referidos bem como as vantagens e desvantagens da sua utilização.

## 2. Revisão Bibliográfica

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens em função do tipo de sedimentador (Thomas, 2005)

	<b>Sedimentador</b>			
	<b>Circular</b>	<b>Retangular</b>	<b>Quadrado</b>	<b>Lamelas</b>
<b>Vantagens</b>	<p>Tempos de retenção menores para as lamelas</p> <p>Melhor efeito de filtragem</p> <p>Baixos requisitos de manutenção</p> <p>Mais simples e mais confiável</p>	<p>Menores custos na construção</p> <p>Maior fluxo e menor probabilidade de curto-circuito do que os sedimentadores circulares</p> <p>Perda de carga baixa para a distribuição de fluxo</p>	<p>Menor área de implementação</p>	<p>Rápida sedimentação de partículas</p> <p>Aumento da eficiência de tratamento</p> <p>Diminuição dos efeitos de gradiente de temperatura e vento</p>
<b>Desvantagens</b>	<p>Maior probabilidade de curto-circuito nas zonas periféricas</p> <p>Mais suscetíveis à acção do vento</p> <p>Perda de carga elevada</p>	<p>Maior tempo aprisionamento de espuma e maior remoção</p> <p>Maior tempo de retenção para as lamelas</p> <p>Menos eficaz para sólidos de alta carga</p> <p>Aumento na manutenção dos colectores</p>	<p>Acumulação de sólidos nos cantos</p> <p>Necessário instalar equipamento de limpeza</p> <p>Estagnação nos cantos</p>	<p>Operação instável</p>

### **2.3 Estudos sobre a sedimentação**

Como referido anteriormente, cabe ao projetista definir a melhor estratégia consoante a água residual a tratar, bem como os objetivos do tratamento em questão. Para tal, há vários fatores que afetam o desempenho de um sedimentador primário e que terão de ser analisados e devidamente escolhidos.

Um dos fatores mais importantes a considerar é a formação de regiões de circulação que por vezes se formam em tanques de sedimentação. Estas zonas provocam uma redução do volume efetivo do tanque e podem causar curto-circuito entre a zona de entrada da água residual e a zona de saída do tanque. Consequentemente o escoamento da água pode deixar o tanque sem que tenha ocorrido qualquer tipo de sedimentação. As zonas de circulação podem, também, induzir zonas de alta turbulência em certas regiões do sedimentador (Tamayol et al., 2008)

A dissipação de energia bem como a redução das zonas de circulação são o principal objetivo do dimensionamento de sedimentadores primários.

#### **2.3.1 Influência do posicionamento de uma chicana na eficiência de remoção**

Através de uma experiência realizada por Sharoki et al. (2013) foram estudados 6 casos relacionando o posicionamento das chicanas no campo de escoamento. Comparando um tanque sem chicana com um tanque com chicana, este último reduz a energia cinética e a velocidade ascendente do campo de escoamento.

Relativamente aos resultados obtidos em termos de eficiência de remoção do sedimentador verificou-se que, para a posição da chicana a uma distância de 25 cm do início do tanque sedimentação, a eficiência de remoção foi mais satisfatória. Foi verificado que para o caso da não utilização de chicana, o valor da eficiência de remoção foi o menos eficiente e o volume de circulação no interior do sedimentador apresentou valores muito mais elevados.

Ao longo da experiência verificou-se que as zonas de circulação são zonas mortas pois há uma maior dificuldade de as partículas sedimentarem nessas zonas pelo que são de evitar ao máximo. Estas zonas podem ser reduzidas através de uma localização apropriada da chicana.

### **2.3.2 Efeitos da configuração de entrada no padrão do escoamento em sedimentadores primários**

A entrada de um sedimentador deve ser dimensionada de modo a dissipar a energia cinética, prevenir o curto-circuito, mitigar os efeitos de correntes de densidade e minimizar perturbações em manto. Para que tal não aconteça é necessário que a configuração de entrada do sedimentador permita que o caudal seja distribuído uniformemente por toda a secção do tanque. (Rostami et al., 2010)

Segundo uma experiência através de modelação numérica realizada por Rostami et al. (2010) foi possível determinar os efeitos da configuração de entrada nos sedimentadores primários. De maneira a que a energia seja dissipada logo na entrada do sedimentador é necessário determinar a melhor posição e configuração de entrada ou recorrer à utilização de chicanas. Foram testados 5 casos com diferentes posicionamentos da configuração de entrada e diferentes configurações, e determinou-se que a dissipação de energia é o principal objetivo no dimensionamento da entrada do sedimentador. Para perceber o efeito dos casos estudados sobre o escoamento foi utilizado um modelo de modelação numérica.

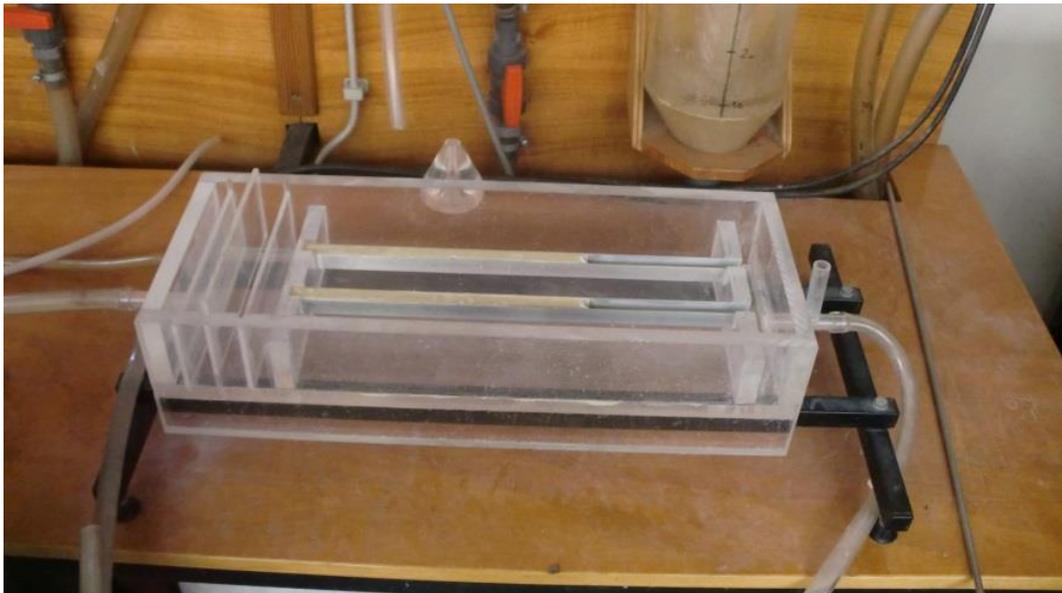
Concluiu-se que configurações de entrada posicionadas no topo ou na base do sedimentador criavam várias zonas de circulação e velocidades elevadas ao longo do sedimentador. Nos casos estudados, mais que uma abertura na configuração de entrada influência a uniformização do escoamento, diminui a energia cinética e tamanho da zona de circulação, pelo que se revelaram mais vantajosas no estudo realizado.

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Instalação experimental

Utilizou-se a instalação experimental (figura 8) existente no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídrico do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em Azurém. (Pereira, 2013)

Partindo do pressuposto que a distribuição do escoamento e a configuração geométrica da entrada são essenciais para uma correta sedimentação e uma melhor eficiência, foram promovidas alterações no modelo existente com o objetivo de perceber e estudar a variação da eficiência de remoção.



*Figura 8 - Modelo do sedimentador primário (Pereira, 2013)*

O modelo inicialmente existente no laboratório apresentava as dimensões e configurações da figura 9. A zona de entrada do modelo foi alterada, dando origem a duas configurações de entrada diferentes, que passarão a designar-se por fase 1 e fase 2.

### 3. Metodologia Experimental

---

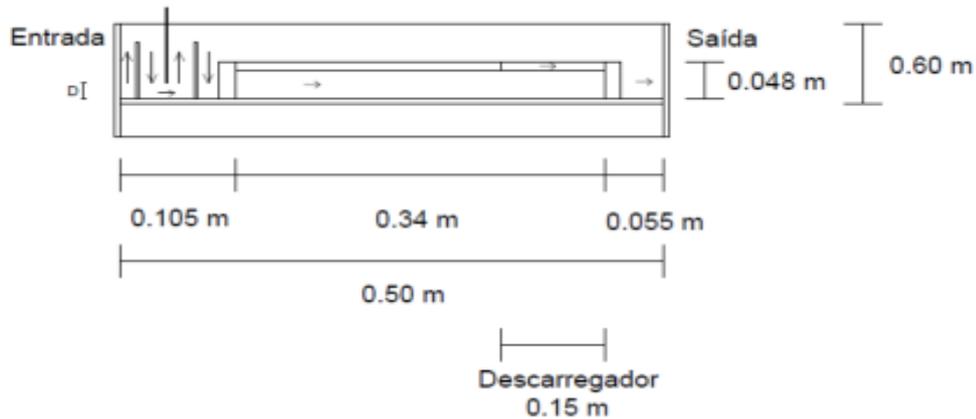


Figura 9 - Dimensões do modelo de sedimentador primário (Pereira, 2013)

A primeira fase de ensaios da instalação experimental foi realizada após promover uma alteração no modelo experimental do sedimentador primário. A alteração consistiu na remoção da primeira chicana do modelo (figura 10). Assim a primeira configuração estudada apresentava uma entrada pontual, uma chicana móvel (que podia ser colocada a  $D=1, 2$  ou  $3$  cm do fundo do sedimentador) e uma chicana fixa que era galgada pelo escoamento.

O sedimentador estudado apresenta as seguintes dimensões, 0,34m de comprimento, 0,17 m de largura, e 0,048 m de profundidade. O sedimentador encontra-se apoiado num suporte metálico que permite nivelamento, caso seja necessário. No interior existem dois descarregadores verticais e retangulares, posicionados paralelamente ao escoamento, com uma extensão de 0,15m.

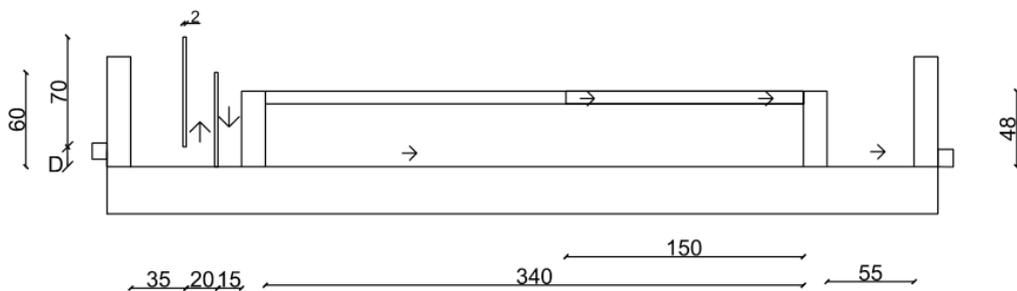


Figura 10 - Modelo de sedimentador primário - Fase 1, dimensões em mm

De modo a perceber de que modo uma alteração na configuração de entrada influencia a eficiência de remoção foi idealizado um novo modelo de entrada para o sedimentador. Através dos trabalhos realizados por Krauth, 1993, foi possível conceber a alteração possível de ser efetuada no sedimentador com o intuito de utilizar a energia gerada na zona da entrada do sedimentador para promover a floculação. Através da introdução de uma estrutura em forma de “T” (figuras 13 e 14), posicionada diretamente na zona de entrada de água do modelo do sedimentador (figura 15) foi possível estudar as alterações em termos de eficiência de remoção do modelo de sedimentador. O modelo do sedimentador apresenta as mesmas dimensões que na fase anterior sendo que a alteração ao nível da entrada foi a única realizada (figura 11).

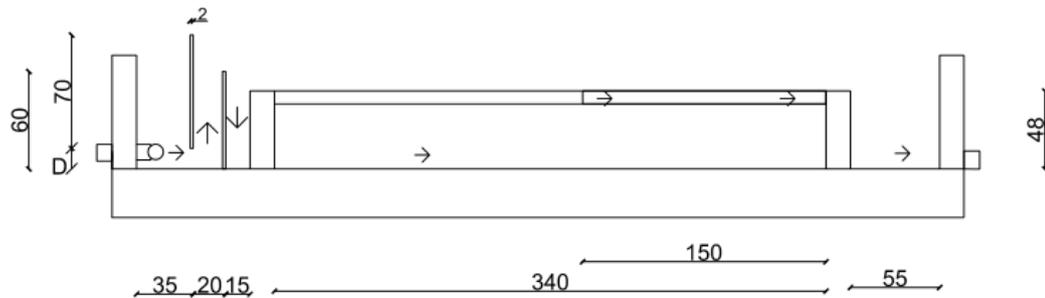


Figura 11 - Modelo do sedimentador primário, fase 2, dimensões em mm

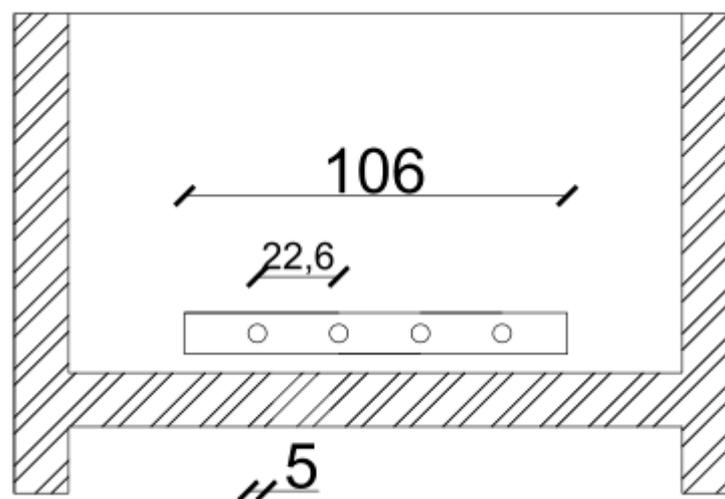
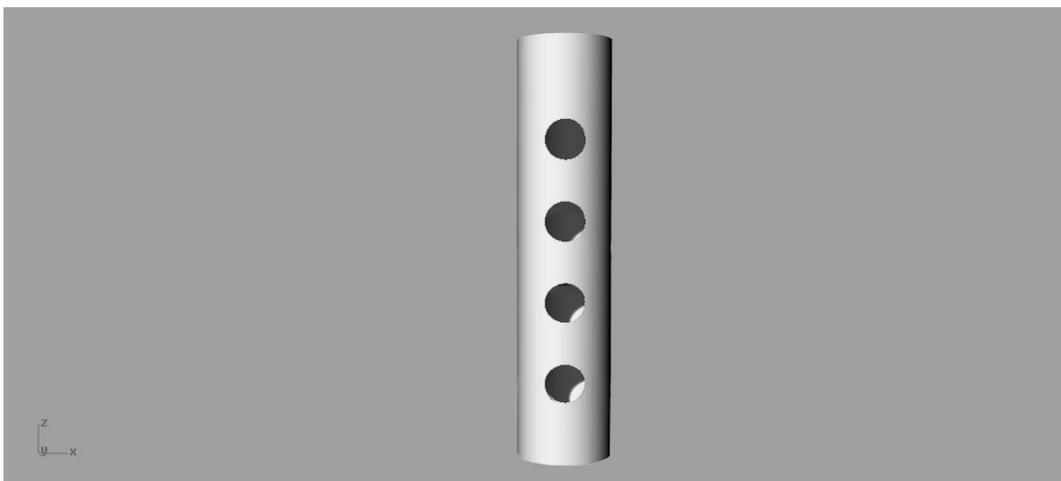


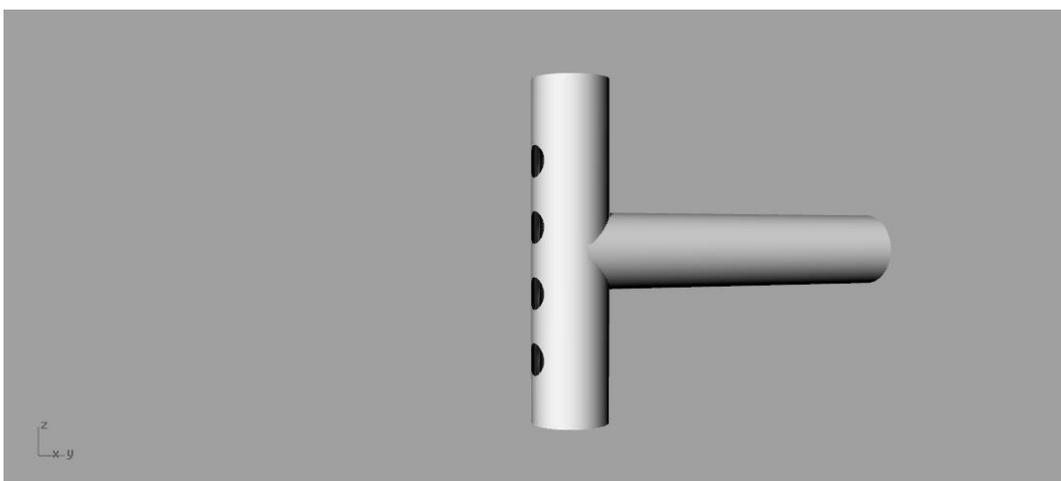
Figura 12 - Corte do modelo do sedimentador primário, pormenor zona de entrada de água (dimensões em mm)

### 3. Metodologia Experimental

---



*Figura 13 - Pormenor da peça utilizada na entrada do sedimentador, vista de frente*



*Figura 14 - Pormenor da peça utilizada na entrada do sedimentador, vista lateral*



*Figura 15 – Zona de entrada do modelo do sedimentador, fase 2*

### **3.2 Equipamentos de medição e visualização**

#### **3.2.1 Equipamento de visualização**

Foi utilizada, para o processo de visualização do escoamento no interior do modelo reduzido do sedimentador, uma câmara de filmar Sony, Handycam, HDR-XR-105E (figura 16).



*Figura 16 - Câmara Sony Handycam, HDR-XR105E*

#### **3.2.2 Medição da turvação**

De forma a determinar a concentração de caulino presente na água utilizada nos ensaios laboratoriais, foi necessário recorrer a um turbidímetro, utilizado para medir a turvação da água, HATCH 2100 Qis, cuja resolução é de 0,01 UNT (Unidade Nefelométrica de Turvação).

A turvação pode ser definida como a presença de partículas coloidais ou em suspensão, tais como argilas, areias, matérias orgânicas e inorgânicas, plâncton e outros organismos microscópicos, que obstruem a transmissão da luz através da água (apda.pt). A turvação é a expressão desta propriedade ótica e é indicada em termos de unidades de turvação 0,01 UNT (Unidade Nefelométrica de Turvação). A opção utilizada, relacionando a turvação com a concentração de caulino presente na água estudada, foi equacionada e realizada devido ao facto de ser um processo adequado e bastante utilizado nos processos de controlo em ETAR (Tchobanoglous et al., 2003), que permitiu obter resultados adequados em estudos anteriores (Fonseca, 2011 e Pereira, 2013).

As medições de turvação foram efetuadas de forma a relacionar os valores medidos à entrada do modelo reduzido de sedimentador e à saída do mesmo. Comparando os valores medidos à entrada e saída do modelo reduzido é possível perceber se o processo de sedimentação está ser executado corretamente através da diferença entre o valor de turvação medido à entrada e o valor de turvação medido à saída do sedimentador. As amostras de caulino e água após serem retiradas eram imediatamente lidas no turbidímetro, processo que era realizado três vezes por amostra, devido ao facto de haver alguma variabilidade nas leituras, pelo que o valor adotado foi o valor médio das leituras.



*Figura 17 - Turbidímetro HATCH 2100 Qis*

### 3.3 Condições experimentais

Em relação às condições experimentais, foi utilizado um processo de inter - relação entre caudal, concentração e altura da chicana para proceder aos ensaios laboratoriais. A distância da chicana do fundo do sedimentador podia ser igual a 1, 2 ou 3 cm, e o caudal variava entre 0,23 L/min, 0,35 L/min, 0.5 L/min. O estudo de Pereira (2013) permitiu constatar que nesta instalação experimental não era possível utilizar soluções aquosas de caulino com concentrações superiores a 100 mg/L, pois

### 3. Metodologia Experimental

---

não se alcançava uma mistura de concentração constante ao longo das medições. No presente estudo constatou-se que as medições efetuadas para a concentração igual a 25 mg/L eram afetadas de elevada variabilidade, provavelmente associada ao facto de estarem a ler valores de turvação na gama de 10 a 14 UNT com um equipamento com uma gama de medição até 800 UNT, o que corresponde a uma elevada incerteza nestas medições. Por estas razões restringiu-se o presente estudo à adoção de duas concentrações: 50 e 100 mg/L.

Com estes dados de entrada foi possível relacioná-los e obter uma série de ensaios de forma a estudar o fenómeno da sedimentação. Na tabela 2, apresentam-se as condições experimentais dos 30 ensaios realizados.

Na 1ª fase foram efetuados 18 ensaios com as condições iniciais descritas. Com a configuração da fase 2 foram realizados 12 ensaios para poder aferir se a alteração no modelo reduzido trouxe algum benefício em termos de eficiência de remoção.

Os ensaios foram realizados para uma duração máxima igual a cinco vezes o tempo de retenção calculado para cada uma das gamas de caudais, para ser possível verificar quando o regime do escoamento podia ser considerado permanente.



*Figura 18 - Instalação experimental*

### 3. Metodologia Experimental

---



*Figura 19 - Reservatório a montante da instalação experimental*



*Figura 20 - Reservatório de nível constante*



*Figura 21 - Reservatório a jusante da instalação experimental*

#### **3.4 Metodologia experimental**

Antes de iniciar o ensaio era necessário estabelecer as condições de partida, tais como, calibrar o caudal, através de uma válvula contida na estação, posicionar a chicana na posição pretendida e adicionar a quantidade de caulino necessária, para o ensaio em questão, no depósito a montante do sedimentador.

Durante 10 minutos, o volume de água (40 L) era agitado no reservatório a montante (figura 19) através de um agitador de hélice, para que não existisse depósito de caulino. Após os 10 minutos a bomba instalada no reservatório a montante era ligada para que a água começa-se a circular para o reservatório de nível constante (figura 20) e daí para a instalação (figura 18). De notar que por várias vezes os 10 minutos de agitação da água com a solução de caulino não eram suficientes para uma correta mistura o que levava a valores mais elevados de turvação à medida que as amostras iam sendo analisadas nos devidos tempos de retenção. De forma a colmatar este entrave, antes de cada ensaio, realizou-se um pré-ensaio com os devidos 5 tempos de retenção necessários para que houvesse um regime de escoamento permanente, porém apenas para calibrar a instalação. Após este

### 3. Metodologia Experimental

---

intervalo de tempo, em que não se observava a sedimentação do caulino no interior do sedimentador, a água recolhida no reservatório de jusante (figura 21) era adicionada novamente no reservatório de montante.

Após calibrada a instalação, e iniciado o ensaio, era lido o valor de turvação à entrada do modelo reduzido do sedimentador, e os valores à saída, no reservatório a jusante, para cada tempo de retenção até completar os respetivos cinco tempos de retenção estipulados. Finalizados os 5 tempos de retenção, a bomba era desligada, a instalação era limpa para que se pudesse proceder a um novo ensaio.

Para cada ensaio os valores de turvação eram medidos à entrada ( $T_e$ ) e à saída ( $T_s$ ) do sedimentador, comparados e calculados os respetivos rendimentos para cada medição através da fórmula:

(1)

$$R = \frac{T_e - T_s}{T_e} \times 100$$

Tabela 2 - Condições Experimentais

Fase 1	Fase 2	Caudal (L/min)	Concentração (mg/L)	Tempo de retenção (min)	Taxa superficial (m/min)
1		0,23	50	13	0,004
2					
3					
4					
5					
6					
7	19	0,35	50	9	0,006
8	20				
9	21				
10	22				
11	23				
12	24				
13	25	0,5	50	6	0,009
14	26				
15	27				
16	28				
17	29				
18	30				

### 3.4.1 Incerteza experimental da turvação

A incerteza experimental da turvação está inteiramente relacionada com a resolução do turbidímetro Hatch 2100 Qis. Analisando o catálogo do aparelho em questão conclui-se que a incerteza experimental da turvação é de 0,01 UNT.

### 3.4.2 Incerteza experimental do rendimento

A incerteza experimental do rendimento é função da turvação obtida nos ensaios laboratoriais através do turbidímetro e é dada pela equação seguinte (pereira, 2013):

(2)

$$\frac{U_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{U_{Ts}}{T_s}\right)^2 + \left(\frac{U_{Te}}{T_s}\right)^2}$$

em que R é o rendimento, Ts corresponde à turvação à saída do sedimentador e Te corresponde à turvação à entrada.

Nas tabelas 3 a 7 apresentam-se as incertezas experimentais relativas aos ensaios realizados para os diferentes caudais, concentrações e posicionamentos da chicana. Os resultados apresentados correspondem a um intervalo de valores correspondendo à incerteza máxima e à mínima para cada ensaio.

A incerteza experimental relativa ao caudal de 0,23 L/min varia entre 0,0012 e 0,0067. Relativamente ao caudal de 0,35 L/min varia entre 0,001 e 0,0028. Para o caudal de 0,5 L/min, a incerteza experimental varia entre 0,0016 e 0,0055.

Os valores correspondentes à 2ª fase da configuração de entrada são, para o caudal de 0,35 L/min de, 0,0005 a 0,0014 e para o caudal de 0,5 L/min a incerteza experimental do rendimento varia entre 0,0006 e 0,0014.

### 3. Metodologia Experimental

---

Tabela 3 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.23 L/min - Fase 1

Posição da chicana (cm)	Concentração (mg/L)	Incerteza relativa Ur/R	Ensaio
1	50	0,0027 - 0,0036	1
2		0,002 - 0,0024	2
3		0,0021 - 0,0027	3
1	100	0,0029 - 0,0035	4
2		0,005 - 0,0067	5
3		0,0012 - 0,0026	6

Tabela 4 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.35 L/min - Fase 1

Posição da chicana (cm)	Concentração (mg/L)	Incerteza relativa Ur/R	Ensaio
1	50	0,0023 - 0,0025	7
2		0,0025 - 0,0026	8
3		0,0023 - 0,0028	9
1	100	0,0014 - 0,0015	10
2		0,0013 - 0,0014	11
3		0,001 - 0,0014	12

Tabela 5 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.5 L/min - Fase 1

Posição da chicana (cm)	Concentração (mg/L)	Incerteza relativa Ur/R	Ensaio
1	50	0,0034 - 0,0055	13
2		0,0025 - 0,0027	14
3		0,0022 - 0,0024	15
1	100	0,0027 - 0,0039	16
2		0,0017 - 0,0019	17
3		0,0016 - 0,0022	18

Tabela 6 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.35 L/min - Fase 2

<b>Posição da chicana (cm)</b>	<b>Concentração (mg/L)</b>	<b>Incerteza relativa Ur/R</b>	<b>Ensaio</b>
1	50	0,001 - 0,0012	19
2		0,0011 - 0,00113	20
3		0,0013 - 0,0014	21
1	100	0,0009 - 0,00095	22
2		0,0005 - 0,0006	23
3		0,0007 - 0,0008	24

Tabela 7 - Incerteza experimental do rendimento para um caudal de 0.5 L/min - Fase 2

<b>Posição da chicana (cm)</b>	<b>Concentração (mg/L)</b>	<b>Incerteza relativa Ur/R</b>	<b>Ensaio</b>
1	50	0,001 - 0,0014	25
2		0,001 - 0,0012	26
3		0,001 - 0,0012	27
1	100	0,0008 - 0,001	28
2		0,0007 - 0,0009	29
3		0,0006 - 0,0007	30

Os valores obtidos da incerteza experimental do rendimento apresentados nas tabelas 3 a 7 são considerados aceitáveis, visto que são valores relativamente baixos.



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Resultados experimentais**

Apresentam-se os resultados obtidos quanto à visualização do escoamento e à eficiência de remoção do sedimentador.

#### **4.1.1 Visualização do escoamento**

De maneira a perceber como funciona o escoamento no interior do modelo do sedimentador, foi adotado um sistema utilizando um traçador. O traçador utilizado para realizar a tarefa pretendida foi o azul-de-metileno que permite visualizar a existência de zona mortas no escoamento e visualizar de que forma o mesmo ocorria em profundidade. Esta visualização foi realizada unicamente para a fase 2. Foi adotado o caudal intermédio de 0,35 L/min e realizadas duas visualizações, uma com o equipamento sem chicana e uma outra com a chicana colocada a 1 cm da base do modelo reduzido de sedimentador.

Através de uma seringa, foi colocado, na zona de entrada do modelo de sedimentador, o azul-de-metileno, processo realizado em ambas as visualizações. As figuras seguintes demonstram o processo de escoamento da água no interior do sedimentador para um caudal de 0,35 L/min, sem chicana.

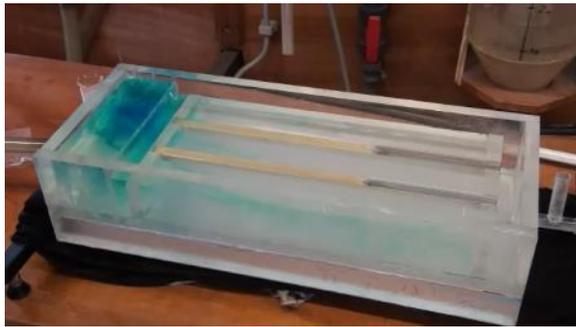
##### **4.1.1.1 Visualização do escoamento sem chicana**

#### 4. Resultados e Discussão

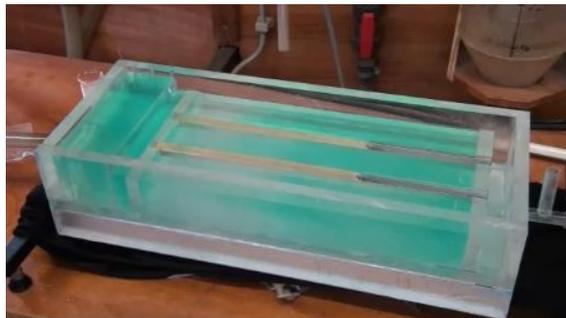
---



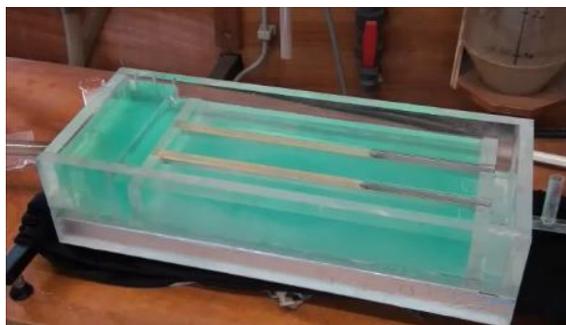
*Figura 22 - Visualização do escoamento, sem chicana,  $t=0$*



*Figura 23 - Visualização do escoamento,  $t=20s$*



*Figura 24 - Visualização do escoamento,  $t=120s$*



*Figura 25 - Visualização do escoamento,  $t=150s$*

A visualização do escoamento através da utilização de azul metileno foi bastante importante para perceber de que forma o escoamento do sedimentador funcionava. A importância em realizar este tipo de visualização prende-se no facto de perceber se o sedimentador tem zonas mortas, onde não se efetua sedimentação.

Sem a utilização da chicana foi possível perceber que o azul-de-metileno, colocado na zona de entrada do sedimentador, é dissolvido e em 150 segundos (figura 25) encontra-se totalmente espalhado ao longo de todo o sedimentador.

#### **4.1.1.2 Visualização do escoamento com a chicana posicionada a 1 cm da base**

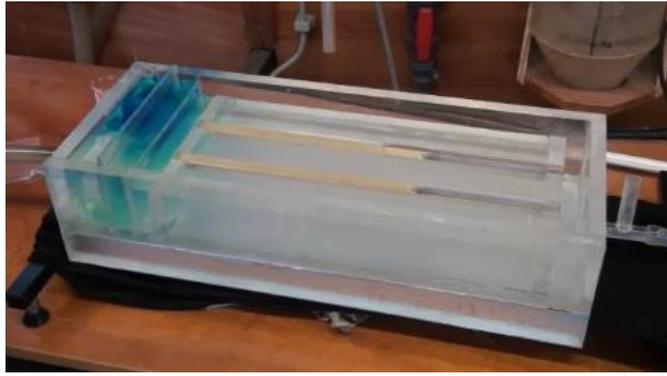
Foi possível perceber através das imagens seguintes que o escoamento do modelo de sedimentador se realiza aparentemente sem problema algum. Tal como foi verificado para a visualização do escoamento sem chicana, ao longo das visualizações realizadas através da utilização do traçador azul-de-metileno, verificou-se que após 120 segundos (figura 29) o traçador encontrava-se devidamente espalhado no sedimentador, confirmando que, mesmo com a utilização de chicana o escoamento ocorria da mesma forma sem a observação de zonas mortas.



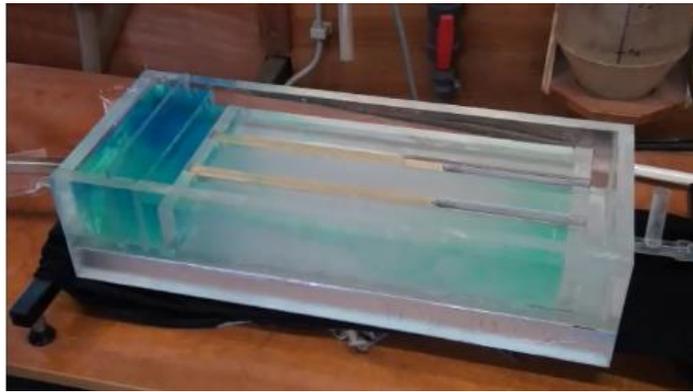
*Figura 26 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm, t=0*

#### 4. Resultados e Discussão

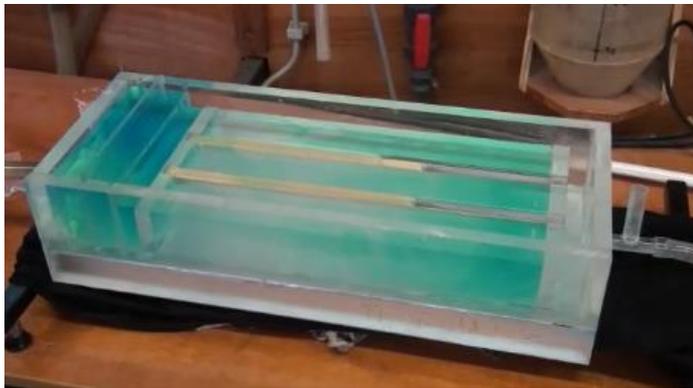
---



*Figura 27 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm,  $t=20s$*



*Figura 28 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm,  $t=60s$*



*Figura 29 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm,  $t=120s$*

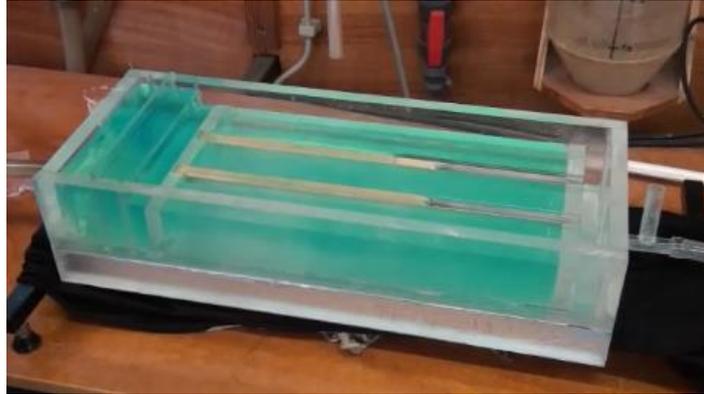


Figura 30 - Visualização do escoamento, chicana posicionada a 1cm,  $t=180s$

#### 4.2 Eficiência de remoção – Fase 1

Os ensaios realizados relativos à eficiência de remoção do modelo reduzido de um sedimentador primário foram realizados adotando um período de tempo de ensaio igual a cinco vezes o tempo de retenção associado ao caudal ensaiado. A justificação para tal prende-se com o facto de que o escoamento no interior do modelo reduzido atingir o regime permanente algures entre o segundo e o terceiro tempo de retenção, pelo que, por uma questão de margem de segurança foram adotados cinco tempos de retenção para a duração de cada ensaio.

##### 4.2.1 Eficiência de remoção para um caudal de 0,23 L/min

Apresentam-se em seguida os dados relativos à eficiência de remoção do modelo reduzido de um sedimentador primário, com um caudal de 0,23 L/min, e com um tempo de retenção de 13 minutos o que perfaz um tempo de ensaio de 65 minutos.

#### 4. Resultados e Discussão

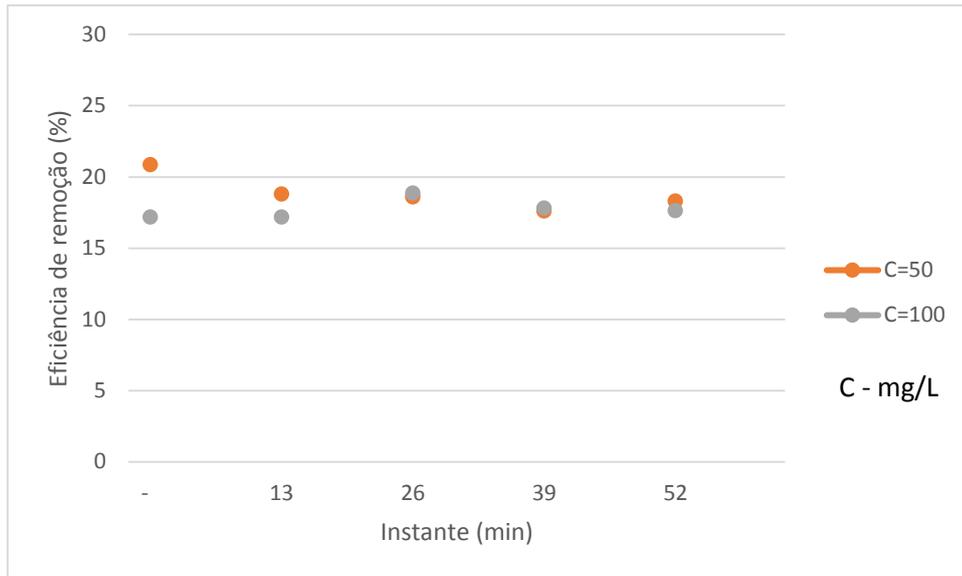


Figura 31 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,23 L/min, chicana posicionada a 1cm, ensaios n° 1 e 4

A remoção de caulino para um caudal de 0,23 L/min com a chicana posicionada a 1 cm da base (figura 31) é mais eficiente para uma concentração de 50 mg/L, com uma eficiência máxima de 20,87 %. Os valores de eficiência de remoção entre as duas concentrações são bastante semelhantes, sendo praticamente os mesmos quando se atinge o regime permanente do escoamento entre o segundo e o terceiro tempo de retenção.

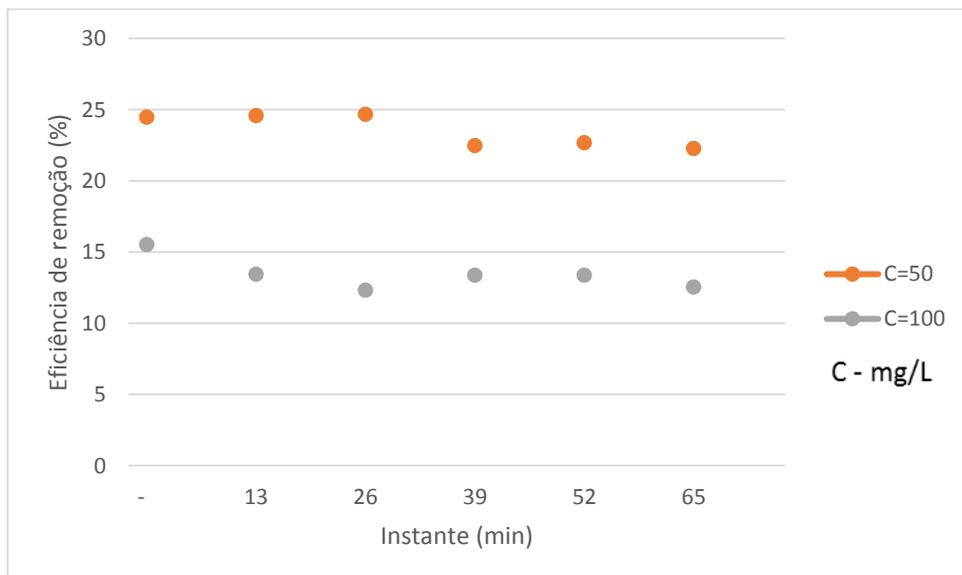


Figura 32 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.23 L/min, com chicana posicionada a 2 cm, ensaios n° 2 e 5

Para uma altura da chicana igual a 2 cm (figura 32) verifica-se uma grande disparidade entre os valores da eficiência de remoção para as concentrações de 50 mg/L e 100 mg/L. A maior eficiência verificada é, mais uma vez, relativa à concentração de 50 mg/L com o valor máximo, observado no segundo tempo de retenção do ensaio laboratorial, 24,70 %. A diferença de eficiência de remoção entre as duas concentrações estudadas para o caudal de 0,23 L/min com a chicana posicionada a 2 cm da base foi de cerca de 10 %, um valor bastante elevado tendo em conta as percentagens das eficiências de remoção obtidas. A apreciação da figura 32 mostra-nos que após o segundo tempo de retenção é atingido o regime permanente do escoamento, com os valores da eficiência de remoção a manterem-se sensivelmente constantes.

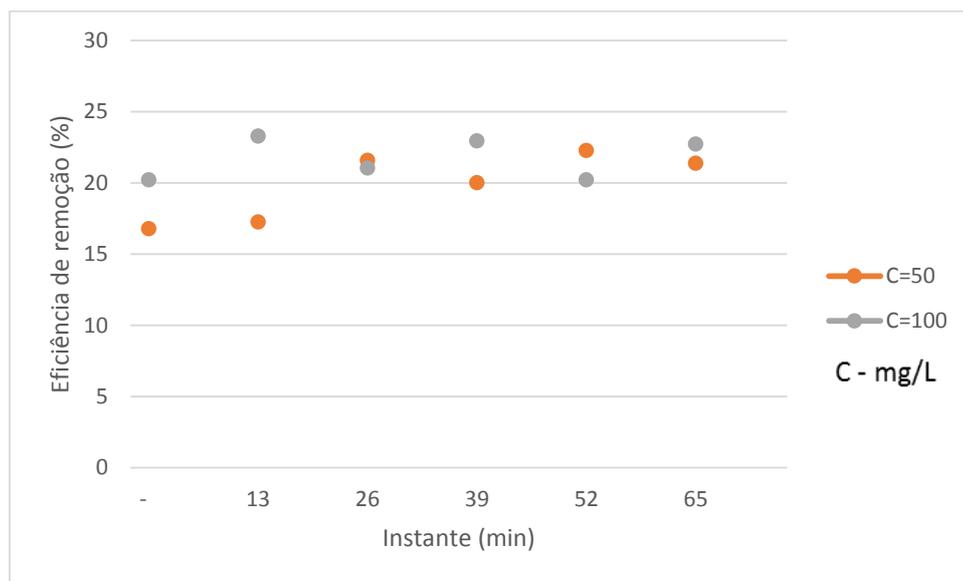


Figura 33 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,23 L/min, com chicana posicionada a 3 cm, ensaios 3 e 6

Em relação aos ensaios realizados com a chicana posicionada a 3 cm da base do modelo reduzido do sedimentador (figura 33) a maior eficiência de remoção obtida foi para a concentração de 100 mg/L, 23,28 %. Os valores obtidos com a chicana posicionada a 3 cm da base aproximam-se dos resultados obtidos com a chicana posicionada a 1 cm, em termos de variação entre os valores em relação às

#### 4. Resultados e Discussão

---

concentrações estudadas, sendo que, novamente, temos valores com pouca variação entre a concentração de 50 mg/L e 100 mg/L.

Verificou-se para os ensaios relativos a um caudal de 0,23 L/min que a maior eficiência de remoção ocorreu com a chicana posicionada a 2 cm da base para uma concentração de 50 mg/L, 24,70 %.

##### 4.2.2 Eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min

Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados obtidos para o caudal de 0,35 L/min com um tempo de retenção de 9 minutos, 45 minutos a totalidade do ensaio para todas as geometrias, relacionadas com o posicionamento da chicana, e concentrações utilizadas

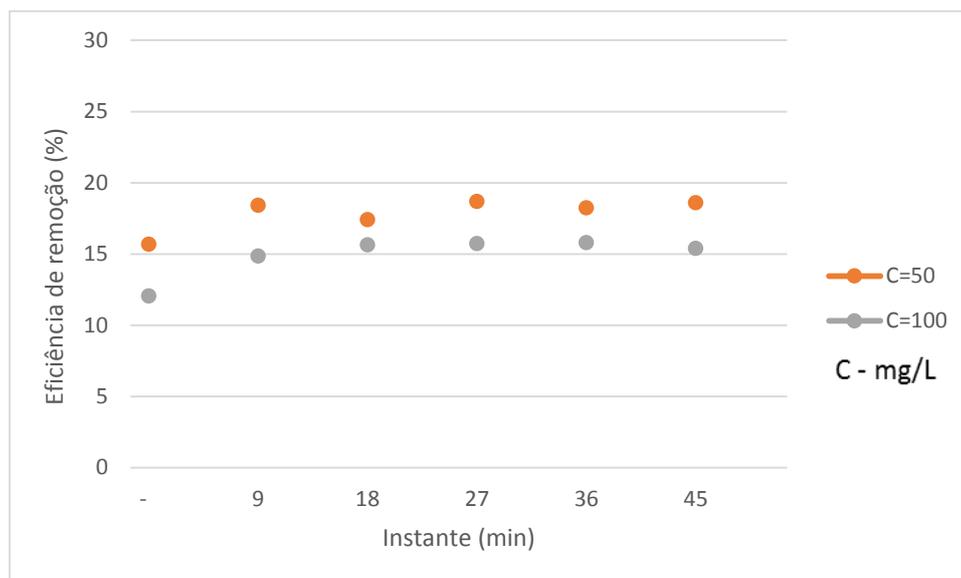


Figura 34 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.35 L/min, com chicana posicionada a 1 cm, ensaios nº 7 e 10

A eficiência do modelo reduzido com a chicana colocada a 1 cm da base é representado pela figura 34. O maior valor obtido foi obtido para uma concentração de 50 mg/L (18,69 %) aos 27 minutos de ensaio. Após os 27 minutos de ensaios, no terceiro tempo de retenção, os valores apresentam-se sensivelmente constantes

o que indica que o regime permanente foi atingido. Em relação à concentração de 100 mg/L a maior eficiência verificada foi de 15,79 %.

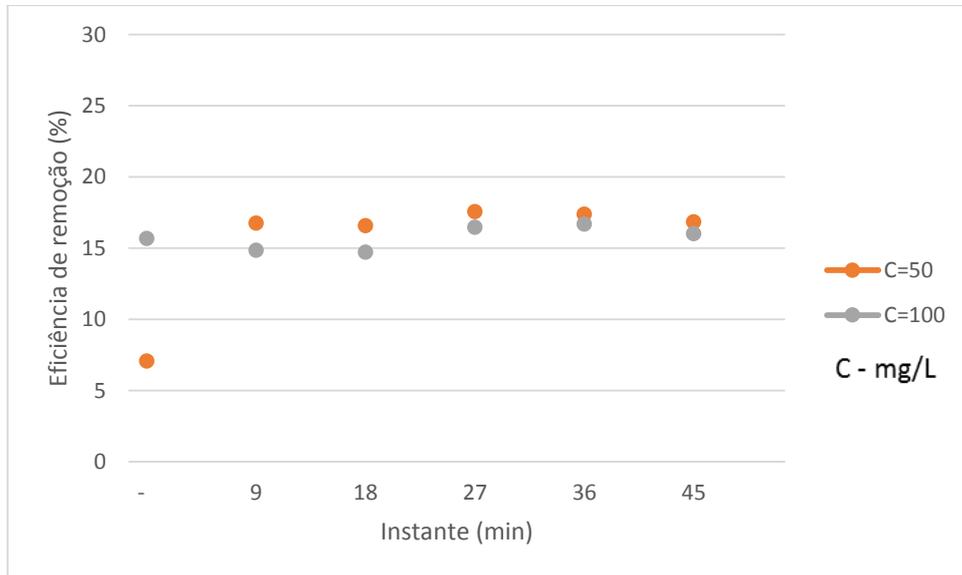


Figura 35 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min, com chicana posicionada a 2 cm, ensaios nº 8 e 11

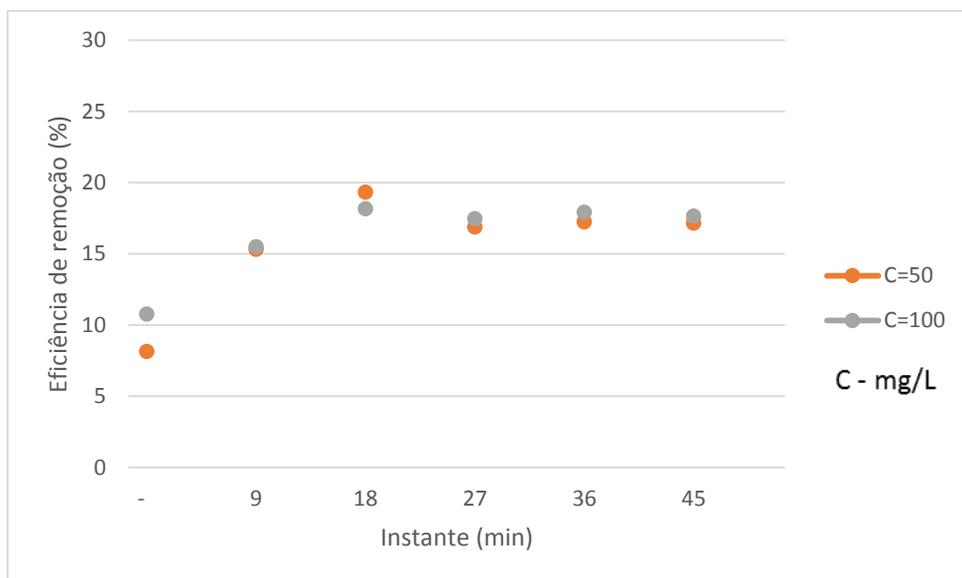


Figura 36 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min, com chicana posicionada a 3 cm, ensaios nº 9 e 12

Relativamente aos ensaios com a chicana posicionada a 2 cm da base do sedimentador (figura 35) é de referir que a concentração que apresenta maior

eficiência de remoção continua a ser a de 50 mg/L com um valor de 17,59 %, no entanto ligeiramente inferior ao valor obtido nos ensaios relativos ao posicionamento da chicana a 1 cm. Comparativamente, os valores de eficiência relativos à concentração de 100 mg/L tem o valor máximo de 16,72 % o que indica uma ligeira diferença, observada ao longo do ensaio entre as duas concentrações.

Para uma altura de chicana de 3 cm (figura 36) os valores obtidos sofrem um ligeiro aumento da eficiência de remoção, mantendo-se a concentração de 50 mg/L com o valor maior de eficiência, com 19,33 %. A concentração de 100 mg/L apresenta valores bastante similares de, 18,14 % tal como se verificou com os anteriores posicionamentos da chicana. Mais uma vez se remete para o facto que após os 18 minutos de ensaio os valores obtidos se manterem visivelmente constantes, o que coincide com o objetivo de atingir o regime permanente de escoamento.

Com o caudal estudado de 0,35 L/min, em termos de valores máximos de eficiência de remoção não houve uma grande diferença, com a alteração do posicionamento da chicana, de qualquer modo, o valor máximo de eficiência obtido foi para uma concentração de caulino de 50 mg/L com a chicana colocada a 3 cm da base do sedimentador com valor de 19,33 %.

#### **4.2.3 Eficiência de remoção para um caudal de 0,50 L/min**

Para terminar apresentam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com a primeira configuração utilizado do modelo reduzido do sedimentador, utilizamos o caudal de 0,50 L/min, com um tempo de retenção associado de 6 minutos, perfazendo uma duração total do ensaio de 30 minutos. Novamente foram aplicadas os três posicionamentos da chicana já mencionados bem como as concentrações de caulino de 50 e 100 mg /L.

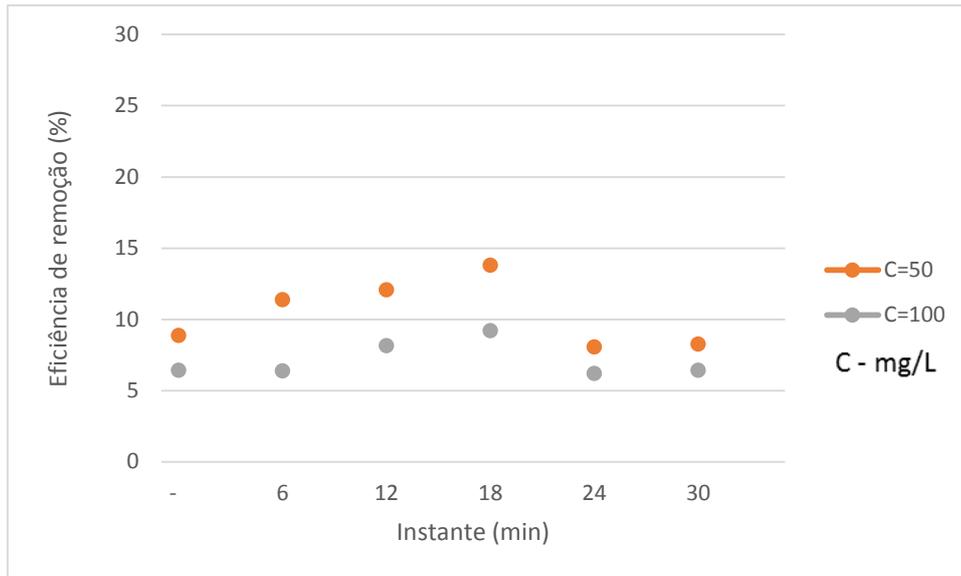


Figura 37 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.50 L/min, chicana posicionada a 1 cm, ensaios nº 13 e 16

Pela análise do gráfico (figura 37) é possível constatar uma grande redução na eficiência de remoção das concentrações de 50 e 100 mg/L após o terceiro tempo de retenção, ou seja, 18 minutos. O acontecimento apenas foi verificado para os ensaios em questão e, por esse facto, a justificação encontra-se meramente no campo da suposição, onde algum problema com as medições ou do próprio turbidímetro poderão ter influenciado os resultados obtidos. Em todo caso entre os últimos dois tempos de retenção os valores permanecem constantes pelo que se poderá assumir que o regime permanente foi atingido.

O valor máximo de eficiência de remoção compete à concentração de 50 mg/L que atinge o valor máximo no terceiro tempo de retenção, com 13,8 %. Em relação à concentração de 100 mg/L o valor máximo é atingido exatamente no mesmo tempo de retenção verificado para a concentração de 50 mg/L, ao minuto 18, com valor de 9,2 %.

#### 4. Resultados e Discussão

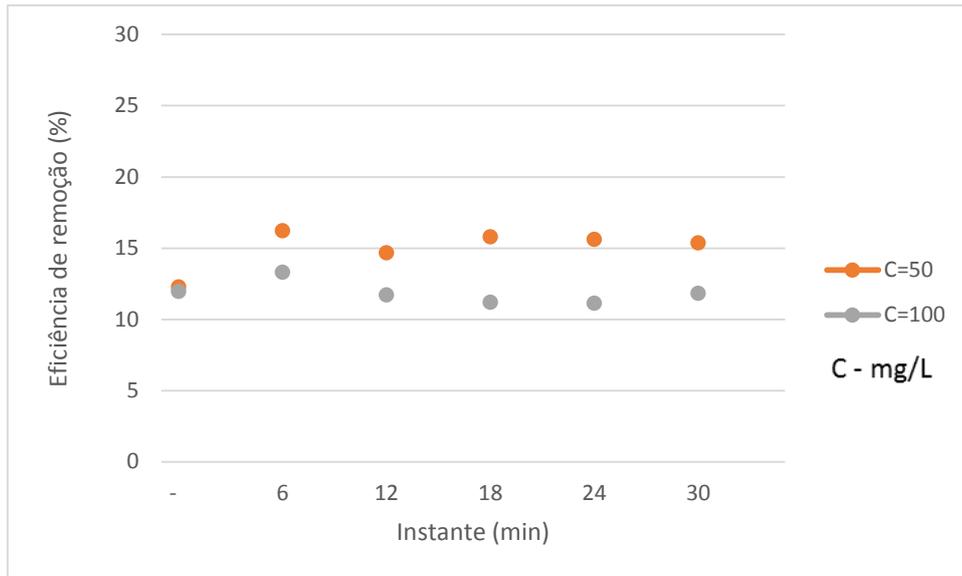


Figura 38 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,50 L/min, chicana posicionada a 2 cm, ensaios nº 14 e 17

A eficiência do sedimentador com a chicana posicionada a 2 cm (figura 38) revela que, novamente a concentração de 50 mg/L obteve os melhores resultados de eficiência com um valor máximo de 16,22 %, verificado no 1º tempo de retenção. Os dois ensaios apresentaram valores constantes após o segundo tempo de retenção atingindo-se o regime permanente idealizado.

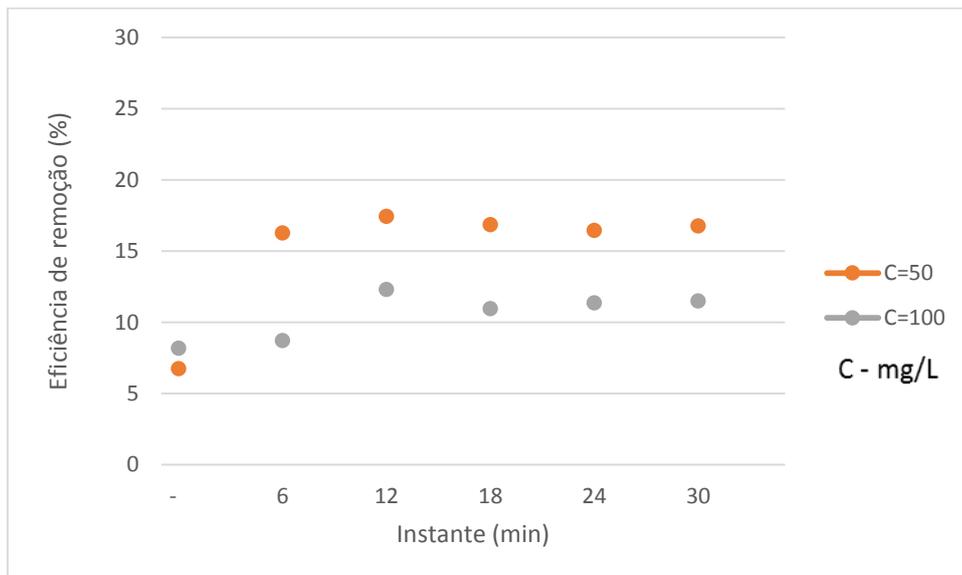


Figura 39 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,50 L/min, chicana posicionada a 3 cm, ensaios nº 15 e 1

Com a chicana posicionada a 3 cm da base (figura 39) continuamos a ter o ensaio com a concentração de caulino de 50 mg/L o mais eficiente, 17,43 %, observando-se uma ligeira subida de rendimento em relação ao posicionamento da chicana a 2 cm da base do sedimentador. Os valores obtidos para a concentração 100 mg/L foram substancialmente inferiores aos verificados com a concentração de 50 mg/L (12,30 %).

Os resultados relativos ao caudal de 0,5 L/min apresentaram valores mais elevados de eficiência para a concentração de 50 mg/L com a chicana posicionada a 3 cm da base do sedimentador, tal como foi obtido para o caudal de 0,35 L/min.

### **4.3 Eficiência de remoção – Fase 2**

Após realizar a alteração proposta ao nível da entrada do sedimentador, executada através de um tubo de acrílico tapado nas extremidades com quatro orifícios na zona frontal com secção somada igual à secção do tubo de entrada do sedimentador, foram realizados os ensaios experimentais com as mesmas condições de posicionamento da chicana e concentração de caulino ao verificado na configuração anterior. Os ensaios foram realizados para os caudais de 0,35 e 0,50 L/min e os resultados são apresentados em seguida.

#### **4.3.1 Eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min**

Apresentam-se os resultados para um caudal de 0,35 L/min com as três posições da chicana bem como as três concentrações de caulino presente na água a tratar pelo modelo reduzido de um sedimentador primário. O tempo de retenção associado a este caudal é de 9 minutos com um tempo total de ensaio de 45 minutos.

#### 4. Resultados e Discussão

---

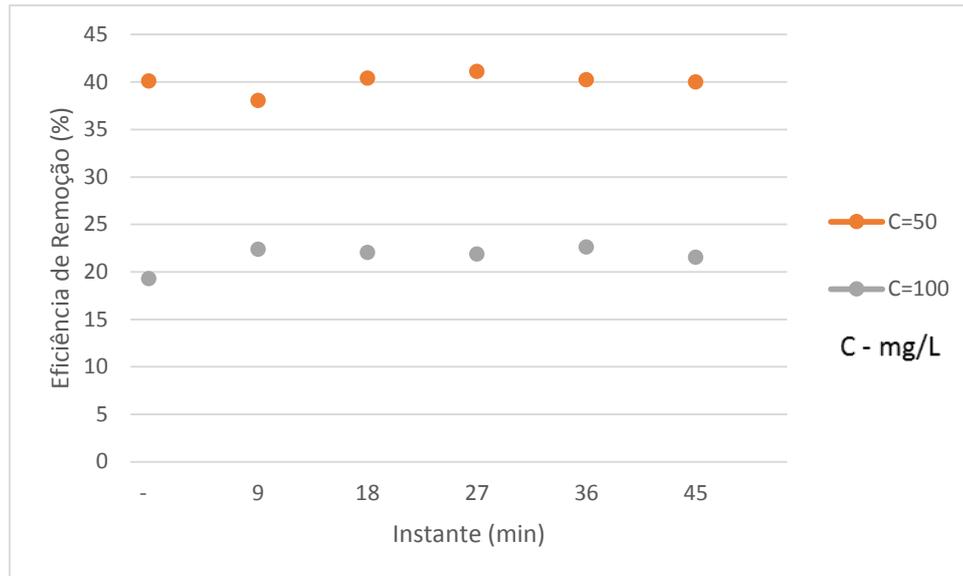


Figura 40 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min, chicana posicionada a 1 cm, ensaios nº 19 e 22

Verifica-se pela análise do gráfico (figura 40) uma disparidade entre os valores relativos à concentração de 100 mg/L e os valores da concentração de 50 mg/L, sendo que os valores de eficiência de remoção da concentração de 100 mg/L são substancialmente mais baixos. A concentração de 50 mg/L exibe os valores mais elevados de eficiência de remoção para o ensaio com a chicana posicionada a 1 cm da base do sedimentador, com o valor máximo a ser atingido no terceiro tempo de retenção, aos 27 minutos, com 41,12 %. A concentração de 100 mg/L apresenta um valor bastante mais reduzido, com 21,87 %.

Após o segundo tempo de retenção, os valores relativos ao ensaio realizado com a concentração de caulino de 50 mg/L e 100 mg/L, encontram-se constante verificando o regime permanente do escoamento.

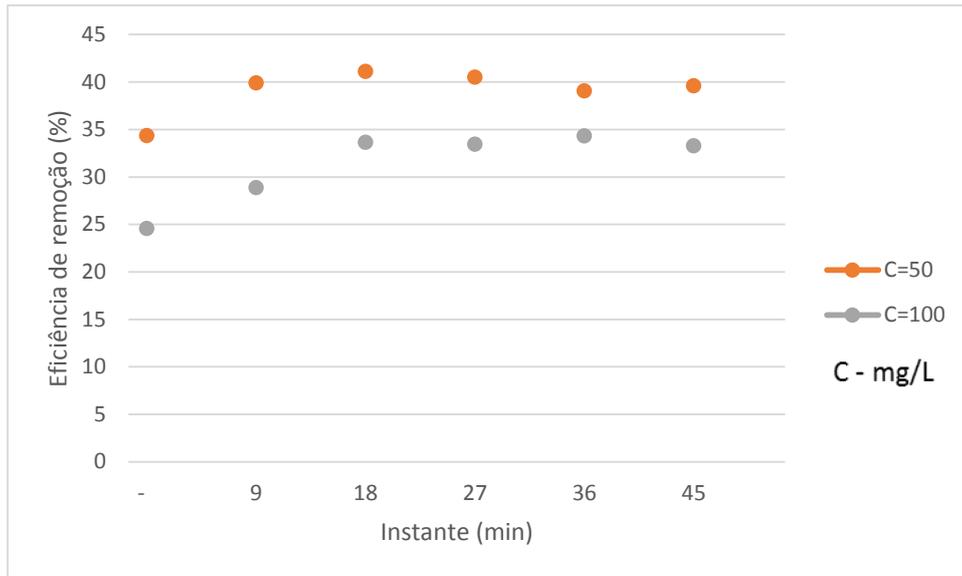


Figura 41 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min, chicana posicionada a 2 cm, ensaios nº 20 e 23

Com a chicana colocada a 2 cm da base do sedimentador (figura 41) a mesma tendência continua a ser verificada, com o ensaio relativo à concentração de 50 mg/L a produzir melhores valores de eficiência de remoção. A eficiência máxima foi verificada para a concentração de 50 mg/L, no 2º tempo de retenção, com 41,12 %. Após o segundo tempo de retenção do ensaio os valores apresentam-se visivelmente constantes, atingindo-se o regime permanente do escoamento.

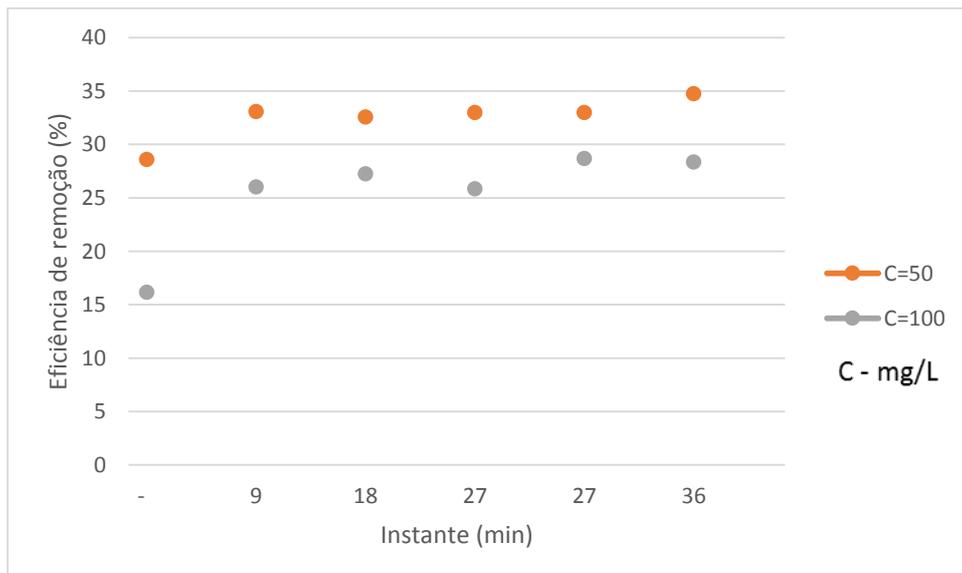


Figura 42 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min, chicana posicionada a 3 cm, ensaios nº 21 e 24

Relativamente aos ensaios realizados com a chicana posicionada a 3 cm da base do sedimentador (figura 42) é possível visualizar que, tal como aconteceu nos dois ensaios anteriores a concentração de 100 mg/L está associada ao ensaio com menor eficiência de remoção, 27,27 %. O ensaio relativo à concentração de 50 mg/L obteve o maior valor de eficiência de remoção com 33,08 % relativo ao primeiro tempo de retenção. Como pretendido os valores da eficiência de remoção mantêm-se relativamente constantes durante o ensaio como era de esperar.

A eficiência de remoção para um caudal de 0,35 L/min revelou o seu valor mais elevado no ensaio relativo à colocação da chicana a 2 cm de altura para uma concentração de 50 mg/L com valor de 41,12 %.

#### 4.3.2 Eficiência de remoção para um caudal de 0,5 L/min

Apresentam-se os resultados para o caudal de 0,5 L/min, em função do posicionamento da chicana bem como a utilização das concentrações de caulino já mencionadas. Para o caudal em questão, o tempo de retenção é de 6 minutos e a duração do ensaio é igual a 30 minutos.

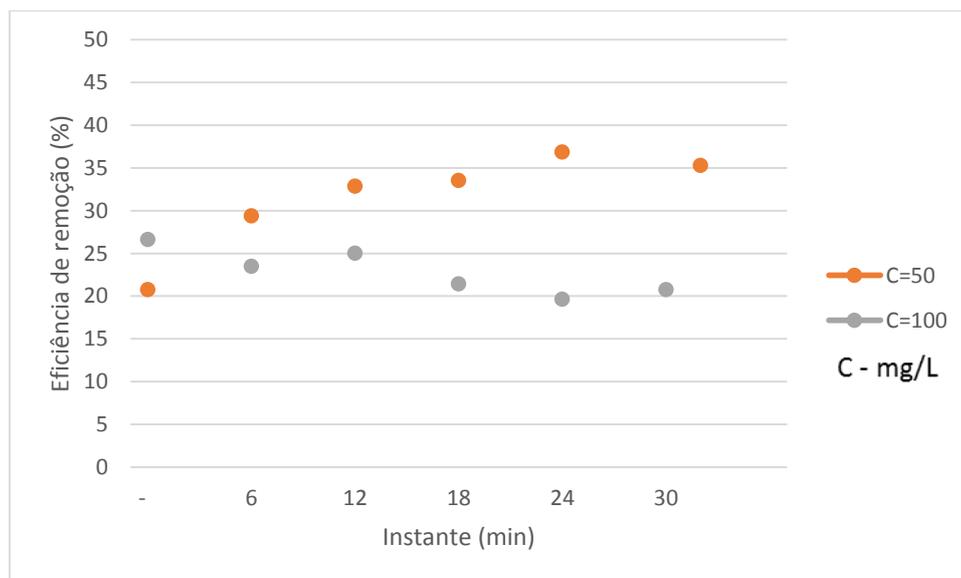


Figura 43 - Eficiência de remoção para um caudal de 0.5 L/min, chicana posicionada a 1 cm, ensaios nº 25 e 28

A eficiência de remoção do sedimentador com a chicana posicionada a 1 cm da base (figura 43) apresenta maiores valores para a concentração de 50 mg/L, com o valor máximo de remoção a atingir 36,86 %. Em relação à concentração de 50 mg/L, esta sofre um aumento da eficiência de remoção ao longo do tempo de ensaio, verificando-se com o valor mais baixo das duas concentrações no início do ensaio e com o valor mais alto no final. Mais uma vez a concentração de 100 mg/L produziu resultados menos satisfatórios, sendo a que obteve piores resultados com a chicana posicionada a 1 cm da base. É possível verificar através da análise do gráfico que após o segundo tempo de retenção os valores da eficiência de remoção do sedimentador permanecem sensivelmente constantes, atingindo-se o regime permanente do escoamento.

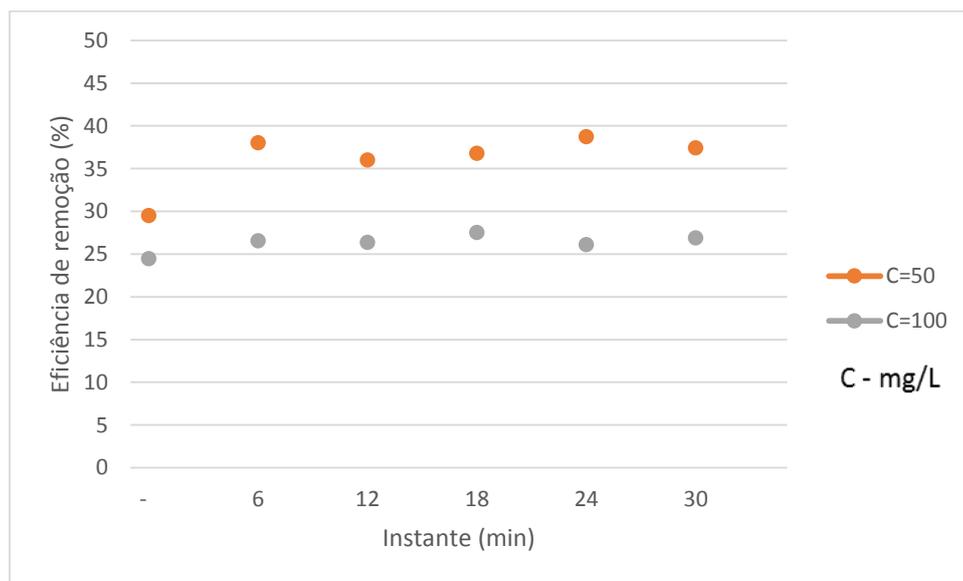


Figura 44 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,5 L/min, chicana posicionada a 2 cm, ensaios nº 26 e 29

O rendimento associado aos ensaios realizados com a chicana posicionada a 2 cm da base (figura 44) apresentou-se em concordância com o observado anteriormente. A concentração a produzir melhores resultados foi a concentração de 50 mg/L com valor máximo de 38,74 %. A concentração de 100 mg/L continua a obter resultados de eficiência mais reduzidos.

#### 4. Resultados e Discussão

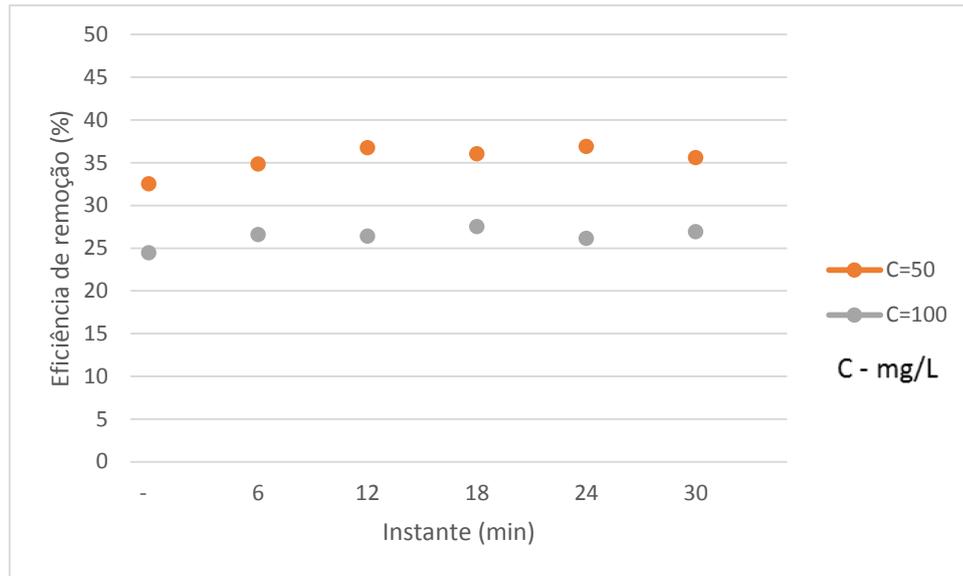


Figura 45 - Eficiência de remoção para um caudal de 0,5 L/min, chicana posicionada a 3 cm, ensaios nº 27 e 30

A eficiência de remoção associada à colocação da chicana a 3 cm de altura (figura 45) produziu resultados semelhantes à anterior configuração, com a concentração de 50 mg/L a revelar-se a mais eficiente, 36,75 %.

Relativamente aos ensaios realizados com o caudal 0,5 L/min a eficiência de remoção mais satisfatória foi verificada para o ensaio realizado com a concentração de 50 mg/L e com a chicana posicionada a 2 cm da base do sedimentador.

#### 4.4 Eficiência de remoção média – Fase 1

Apresentam-se agora os gráficos obtidos através de uma análise diferente dos dados obtidos. A análise foi feita tendo em conta as eficiências de remoção médias em função dos parâmetros utilizados na realização dos ensaios laboratoriais. A eficiência de remoção média é a média do rendimento, para os instantes entre o 2º e o 5º tempo de retenção.

(3)

$$\text{Eficiência de remoção média} = \frac{2^{\text{o}}TR + 3^{\text{o}}TR + 4^{\text{o}}TR + 5^{\text{o}}TR}{4}$$

Adotou-se esta abordagem por uma questão de uniformidade de análise dos resultados, mesmo que em alguns dos ensaios relatados não tenha sido óbvio o estabelecimento do regime permanente para uma duração do ensaio igual a duas vezes o respetivo tempo de retenção.

Nos gráficos apresentados em seguida exibe-se a evolução da concentração de caulino em função de remoção média do sedimentador para os diferentes caudais utilizados e com os respetivos posicionamentos da chicana em relação à base

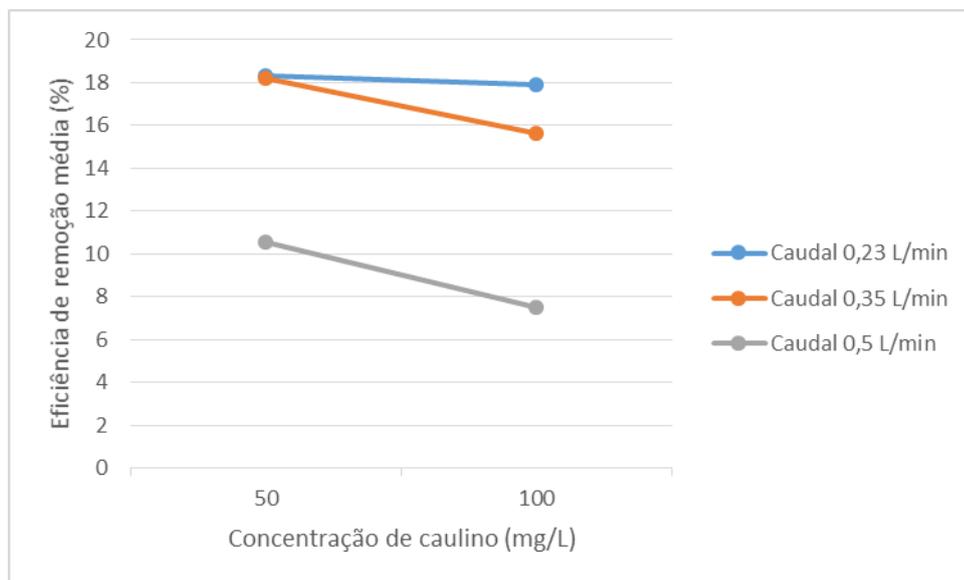


Figura 46 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 1 cm

A eficiência de remoção média associada a um posicionamento da chicana a 1 cm da base (figura 46) produz resultados bastante similares entre o caudal de 0,23 L/min e 0,35 L/min para uma concentração de 50 mg/L de caulino. No caso do caudal de 0,23 L/min, este mostra a eficiência de remoção média mais elevada, coincidindo com a concentração de caulino de 50 mg/L mantendo-se sensivelmente constante relativamente à concentração de 100 mg/L. Relativamente à concentração de 100 mg/L os valores obtidos são sempre inferiores, para os caudais estudados de 0,35 e 0,5 L/min, quando comparados com os ensaios realizados com a concentração de 50 mg/L.

#### 4. Resultados e Discussão

---

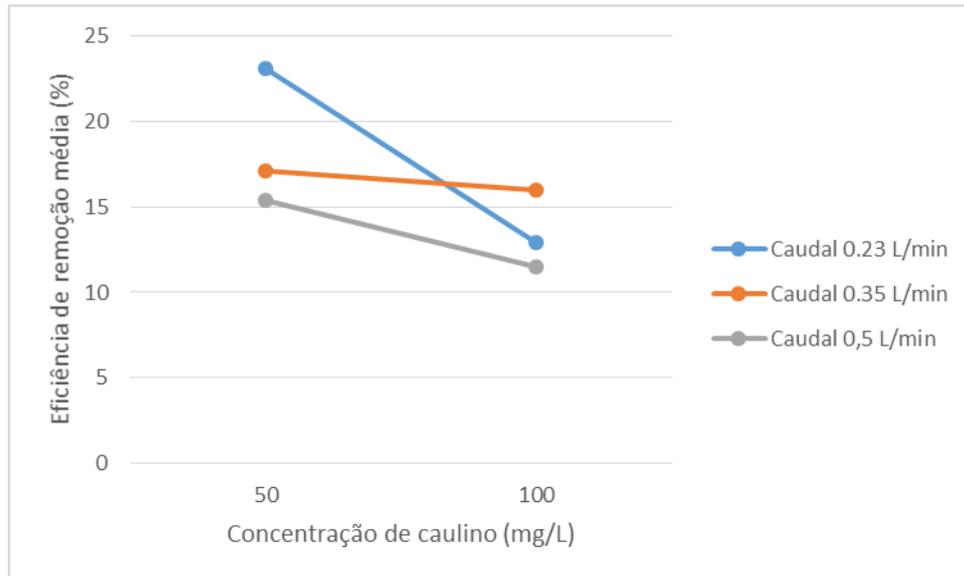


Figura 47 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 2 cm

Com a utilização da chicana a 2 cm da base do sedimentador (figura 47) os resultados obtidos foram semelhantes aos obtidos no ensaio anterior relativamente ao caudal de 0,35 L/min. O caudal de 0,23 L/min obteve o resultado mais elevado em termos de eficiência de remoção relativo à concentração de 50 mg/L, porém sofre uma redução bastante acentuada quando realizado o ensaio com uma concentração de caulino de 100 mg/L. Relativamente aos ensaios realizados com o caudal de 0,5 L/min, tal como foi verificado na figura 46, a eficiência de remoção é a menos satisfatória para ambas as concentrações de caulino.

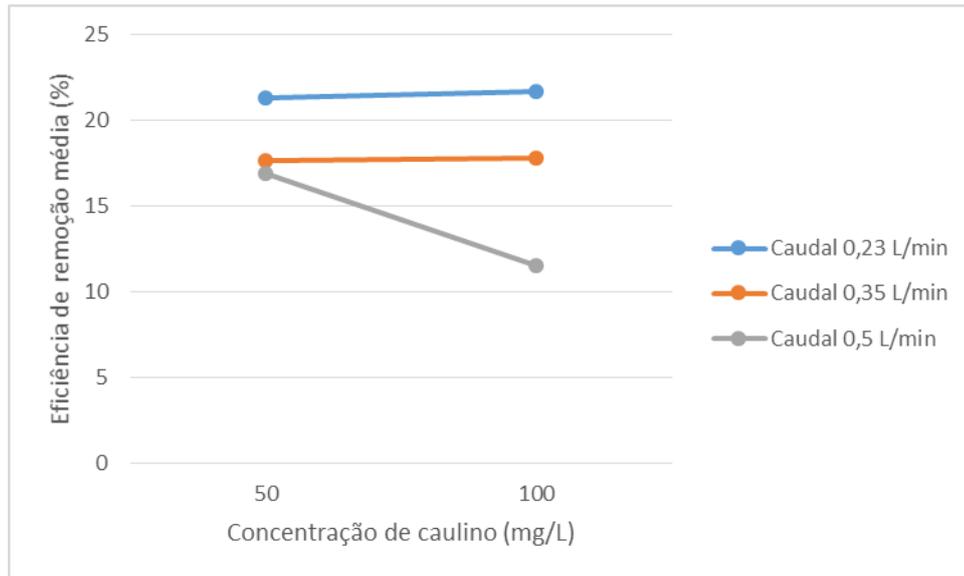


Figura 48 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 3 cm

Em relação aos ensaios realizados com a o posicionamento da chicana a 3 cm (figura 48) os resultados verificaram uma grande mudança em relação aos anteriores visto que, com o posicionamento da chicana a 3 cm da base do sedimentador, a concentração de caulino que produziu resultados mais satisfatórios, em termos de eficiência de remoção média, foi a concentração de 100 mg/L para o ensaio relativo ao caudal de 0,23 L/min. A eficiência de remoção média relativa ao caudal de 0,35 L/min e 0,5 L/min revela-se constante e em concordância com o verificado nos ensaios realizados com o posicionamento da chicana a 1 e 2 cm da base.

Os resultados evidenciam que a eficiência de remoção não aumenta para concentrações de caulino superiores, como seria de esperar se estivesse a ocorrer a sedimentação de partículas floculadas (Pereira, 2013). Não foi possível concluir sobre a razão para este facto, com base nos presentes resultados.

#### 4.5 Eficiência de remoção média – Fase 2

Foi realizada a mesma análise referida anteriormente para os dados relativos à eficiência de remoção com a nova configuração de entrada do sedimentador

#### 4. Resultados e Discussão

---

estabelecida. Os ensaios realizados foram relativos ao caudal de 0,35 L/min e 0,5 L/min, com as respectivas concentrações de caulino e posicionamentos da chicana em relação à base do sedimentador.

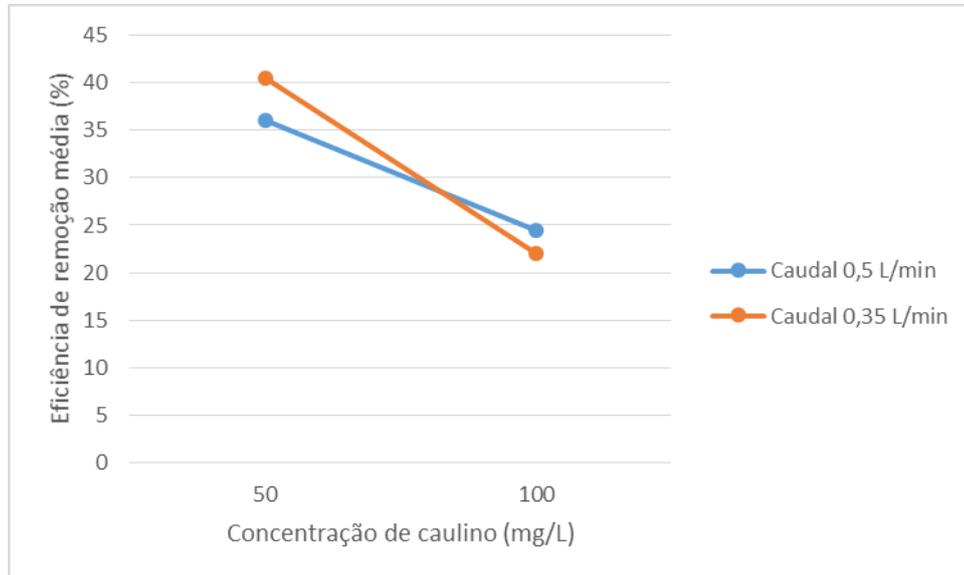


Figura 49 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 1 cm

Através da análise do gráfico (figura 49) é possível perceber que o ensaio relativo à conjugação do caudal de 0,35 L/min e concentração de 50 mg/L produziu resultados mais favoráveis de eficiência de remoção média com valores na ordem dos 40%, porém este valor foi reduzido para cerca de metade quando se ensaiou a concentração de 100 mg/L. Em relação ao caudal de 0,5 L/min a mesma situação é verificada, em que a eficiência de remoção média é mais elevada para a concentração de 50 mg/L, sofrendo uma grande diminuição com a concentração de 100 mg/L.

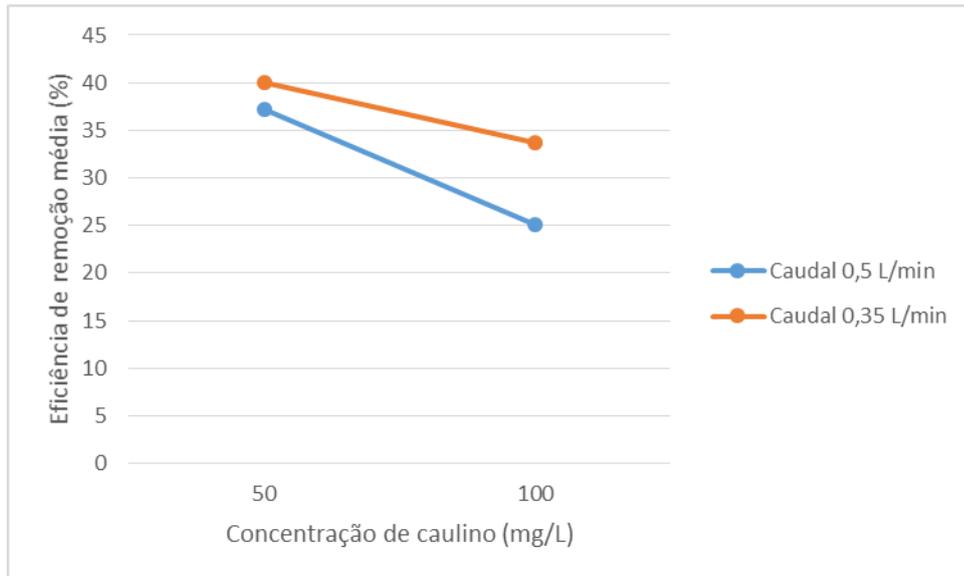


Figura 50 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 2 cm

Em relação aos ensaios realizados com a chicana posicionada a 2 cm da base do sedimentador (figura 50) os resultados obtidos com maior eficiência de remoção foram obtidos para um caudal de 0,35 L/min com uma concentração de 50 mg/L de caulino, 40,065 %. A eficiência de remoção relativa ao caudal de 0,35 L/min é, para todas as concentrações, superior ao obtido com a concentração de 0,5 L/min.

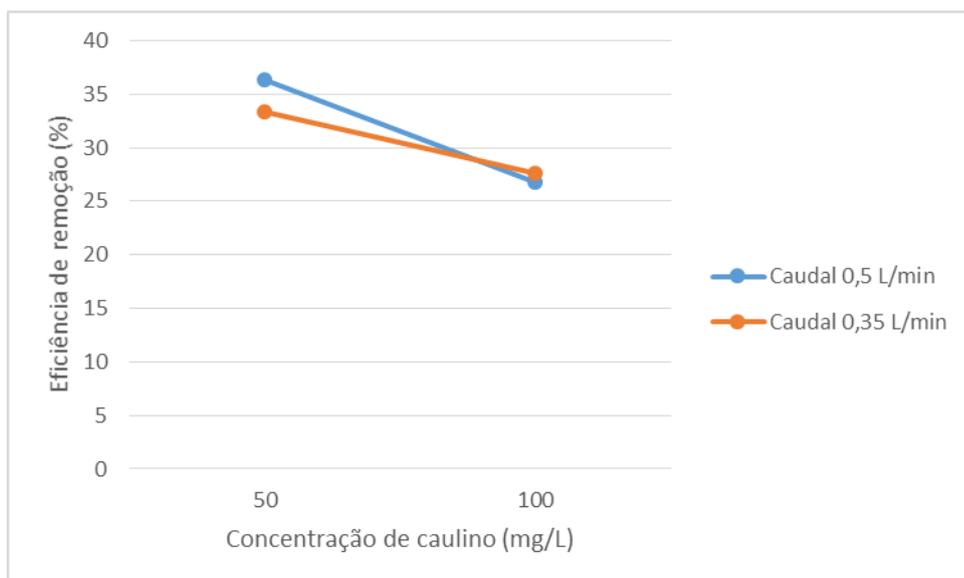


Figura 51 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, chicana posicionada a 3 cm

#### 4. Resultados e Discussão

---

Com a chicana posicionada a 3 cm da base (figura 51) os resultados mais satisfatórios foram, uma vez mais obtidos, para o caudal de 0,35 L/min.

Através da análise dos gráficos de remoção média foi possível concluir que com a nova configuração de entrada do modelo reduzido do sedimentador, foi possível concluir que com a chicana posicionada a 1 cm da base, com um caudal de 0,35 L/min a eficiência de remoção foi mais elevada, relativamente à concentração de 50 mg/L, com um valor de cerca de 40 %.

#### 4.6 Eficiência de remoção 1ª configuração Vs Eficiência de remoção 2ª configuração

Apresentam-se as eficiências de remoção relativas aos ensaios realizados com a 1ª configuração de entrada e com a 2ª configuração, comparando os valores obtidos nos ensaios experimentais. Serão apresentados os ensaios efetuados com o caudal de 0,35 L/min e o caudal de 0,5 L/min com os devidos posicionamentos da chicana bem como a concentração de caulino.

##### 4.6.1 Caudal de 0,35 L/min

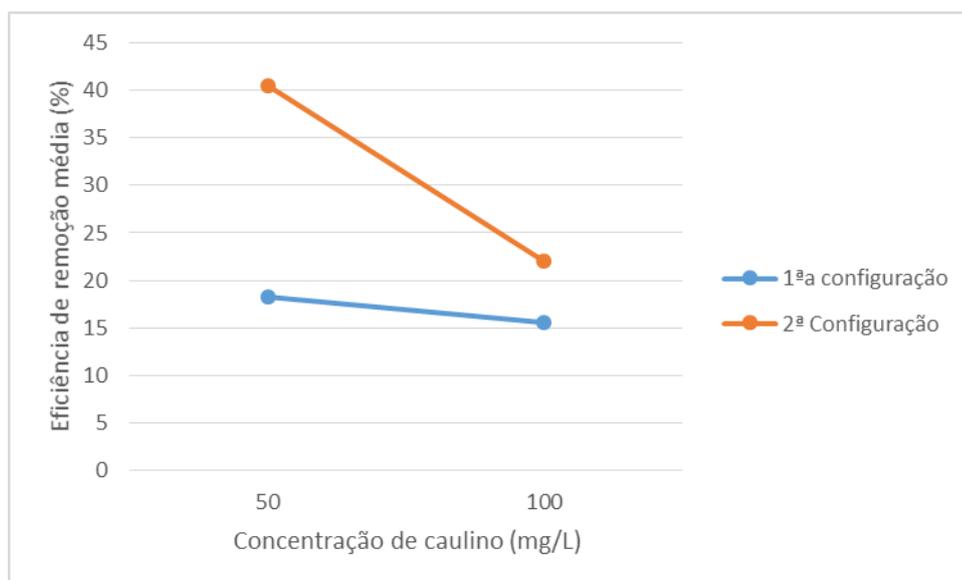


Figura 52 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0,35 L/min, chicana posicionada a 1 cm

Relativamente aos ensaios realizados com um caudal de 0,35 L/min e a chicana posicionada a 1 cm (figura 52) os resultados obtidos apresentaram uma melhoria significativa com a utilização da 2ª configuração de entrada. A diferença mais significativa surge quando a concentração de 50 mg/L foi ensaiada, sendo que na 1ª fase, a eficiência de remoção foi de cerca de 20 %, na 2ª fase atingiu valores de cerca de 40 %. A concentração de 100 mg/L apesar de não apresentar uma diferença tão acentuada de eficiência de remoção, continua a ser superior para os ensaios relativos à 2ª fase.

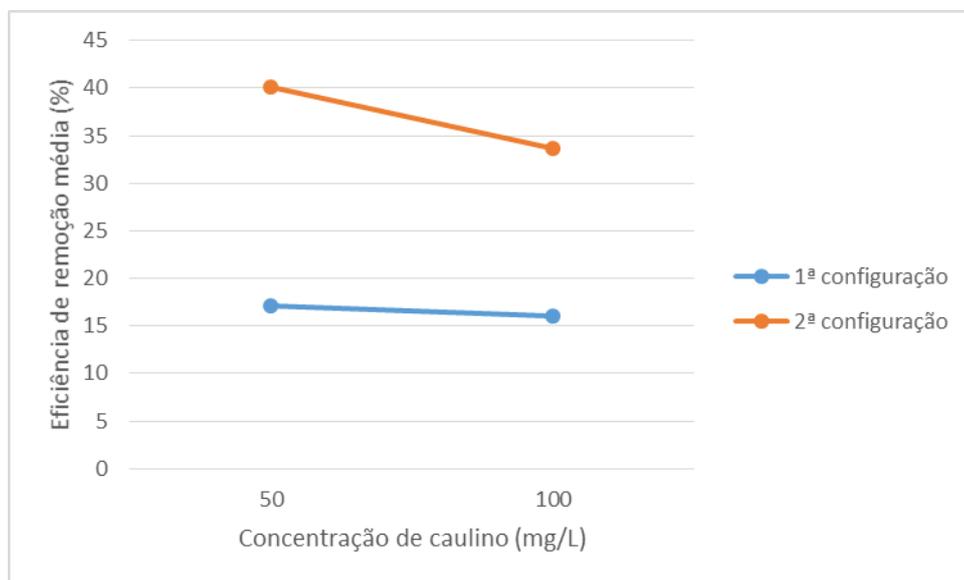


Figura 53 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0,35 L/min, chicana posicionada a 2 cm

Os ensaios realizados com a chicana posicionada a 2 cm da base do sedimentador (figura 53) revelaram uma vez mais, uma maior eficácia de remoção para os ensaios relacionados com a 2ª configuração de entrada. Neste caso, todas as concentrações sofreram uma melhoria significativa em relação aos valores obtidos com a 1ª configuração de entrada, porém a concentração de 50 mg/L obteve a maior diferença com uma eficiência de cerca de 40 % contra cerca de 17 % relativos à 1ª configuração de entrada.

#### 4. Resultados e Discussão

---

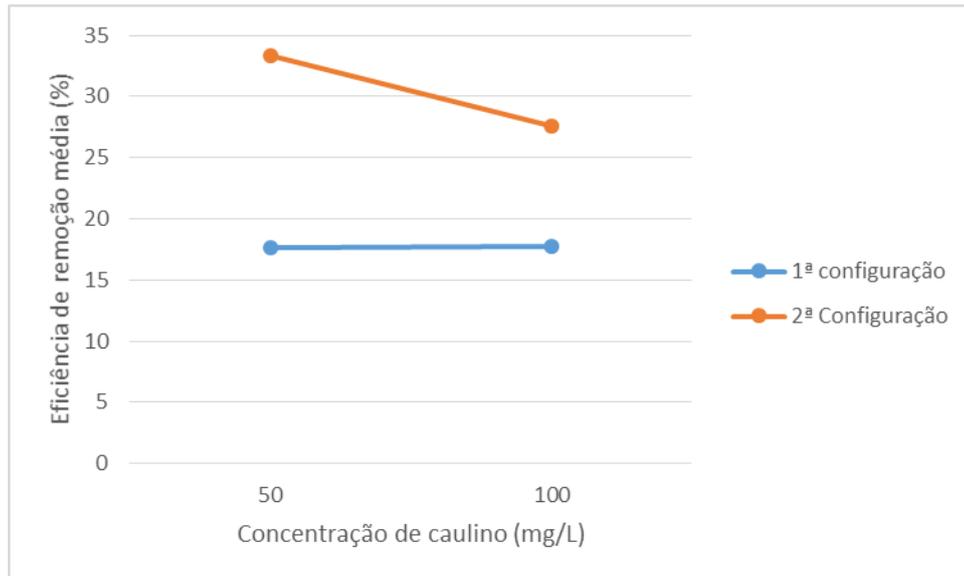


Figura 54 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0,35 L/min, chicana posicionada a 3 cm

Em relação aos valores obtidos pelos ensaios com a chicana posicionada a 3 cm da base (figura 54) verifica-se que a eficiência de remoção é, para esta sequência de ensaios, mais eficiente para a 2ª configuração de entrada utilizada. Ao contrário do que acontece com os ensaios relativos aos anteriores posicionamentos de chicana, é de notar que ao longo do aumento da concentração de caulino os valores de eficiência de remoção, das duas configurações, aproximam-se, porém, sem nunca se cruzarem, pelo que a eficiência de remoção é sempre superior para qualquer valor de concentração de caulino para os ensaios obtidos utilizando a 2ª configuração de entrada.

##### 4.6.2 Caudal de 0,5 L/min

Visualizam-se os ensaios realizados com o caudal de 0,5 L/min com os respetivos posicionamentos da chicana e com a concentração de caulino habitual. Os resultados foram tratados de forma a demonstrar, comparativamente, os valores obtidos pelos ensaios relacionados com a 1ª e a 2ª configuração de entrada.

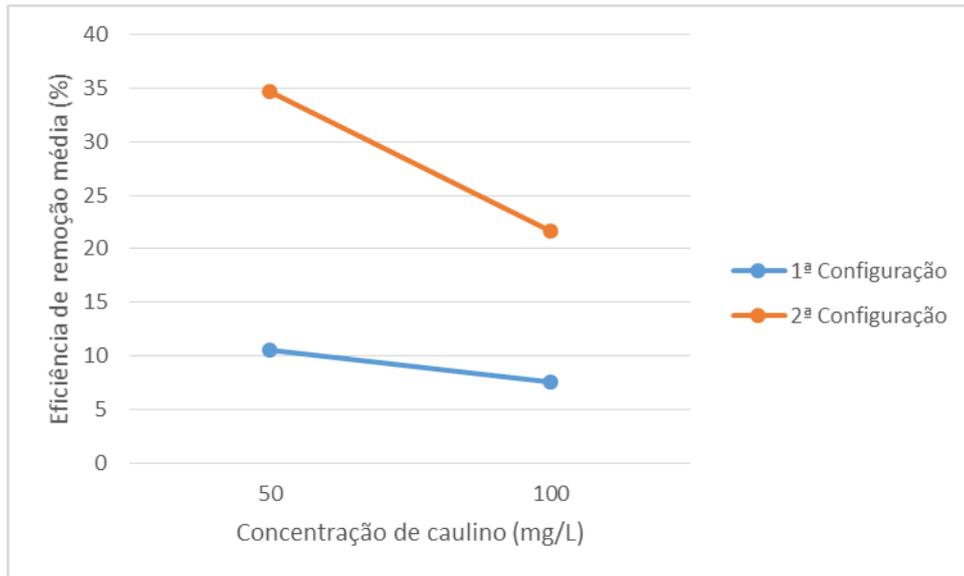


Figura 55 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0.5 L/min, chicana posicionada a 1 cm

Os resultados obtidos de eficiência de remoção relativos ao posicionamento da chicana a 1 cm da base (figura 55) revelam que a eficiência de remoção é, novamente, superior com a utilização da 2ª configuração de entrada no modelo de sedimentador. A concentração de caulino que verificou uma maior diferença de remoção entre estas duas configurações de entrada foi a de 50 mg/L, 24,09 %.

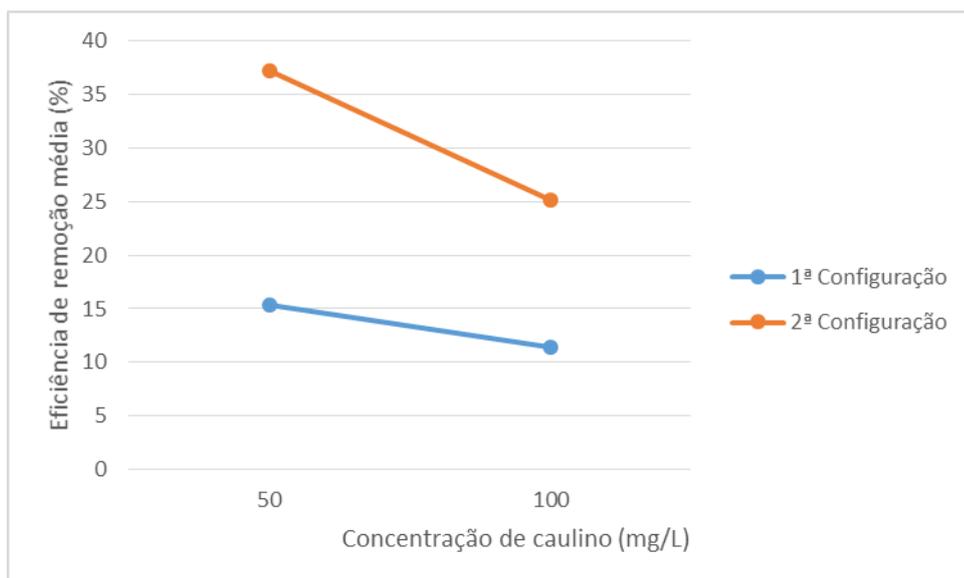


Figura 56 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0.5 L/min, chicana posicionada a 2 cm

#### 4. Resultados e Discussão

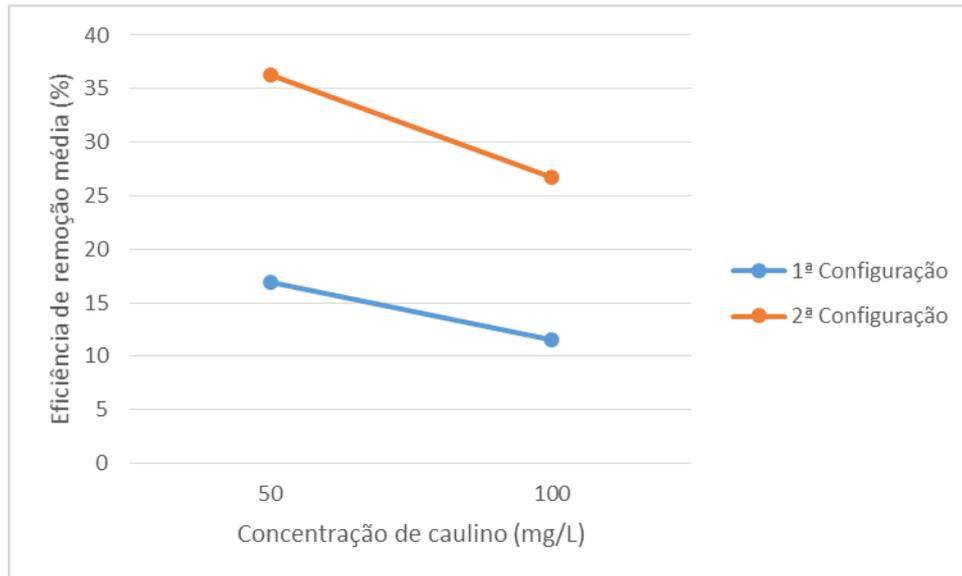


Figura 57 - Eficiência de remoção média em função da concentração para o sedimentador, para um caudal de 0,5 L/min, chicana posicionada a 3 cm

Apresentam-se graficamente os resultados obtidos com o posicionamento da chicana a 2 cm (figura 56) e 3 cm da base do sedimentador (figura 57) para o caudal de 0,5 L/min. Observa-se que a 2ª configuração mantém-se a mais eficaz em comparação com a 1ª configuração obtendo, nos ensaios relativos ao posicionamento da chicana a 2 cm, um diferença de eficácia de remoção de 21,88% para a concentração de 50 mg/L, valor máximo entre as concentrações de caulino. Em relação aos valores alcançados com o posicionamento da chicana a 3 cm da base, o alinhamento de eficiências de remoção média em função da concentração de caulino é bastante semelhante ao obtido com a chicana posicionada a 2 cm da base, sendo que, uma vez mais, o maior valor de diferença de eficácia de remoção é relativo à concentração de 50 mg/L, 19,45 %.

De referir que o maior valor obtido em termos de diferença entre a eficiência de remoção média, obtida com os ensaios da 1ª configuração e a eficiência de remoção média obtidos com os ensaios da 2ª configuração de entrada, são mais expressivos para uma concentração de caulino de 50 mg/L, facto verificável com todos os posicionamentos da chicana ensaiados. Com a chicana posicionada a 1 cm da base do modelo do sedimentador, obteve-se o valor mais elevado com 24,09 % de diferença entre as duas configurações.

#### 4.7 Evolução da remoção média em função da taxa superficial

Nas figuras 58 a 61, apresenta-se a evolução da eficiência de remoção do sedimentador em função da taxa de aplicação superficial para as três diferentes geometrias da chicana em diferentes concentrações. Da mesma forma poderia ter sido feita a análise dos resultados em função do caudal.

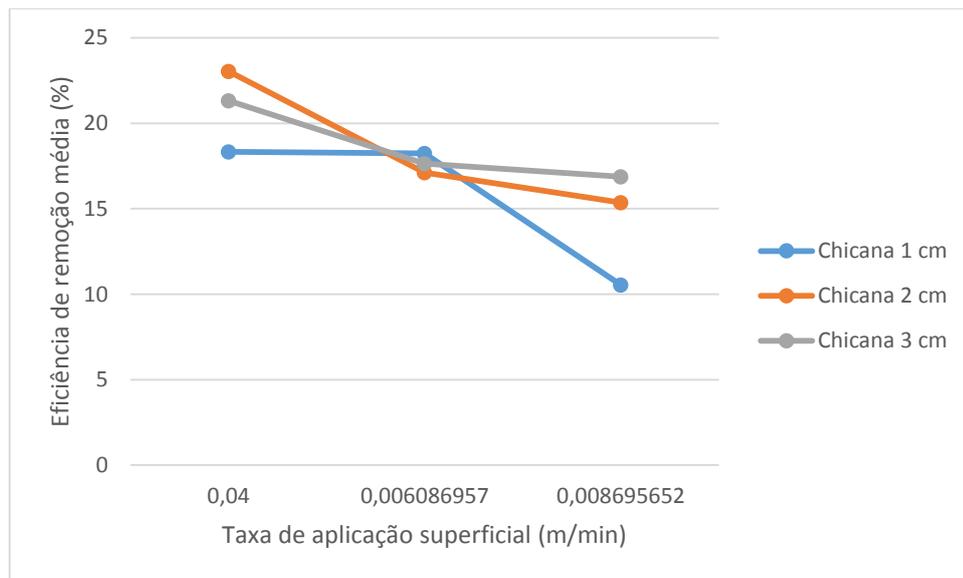


Figura 58 - Eficiência de remoção média em função da taxa de aplicação superficial para uma concentração de 50 mg/L - Fase 1

Na figura 58 pode-se verificar que a eficiência é maior para menores taxas de aplicação superficial, como seria de esperar. De notar que para posicionamentos da chicana a 2 cm da base do sedimentador a eficiência de remoção média é superior para uma concentração de 50 mg/L.

#### 4. Resultados e Discussão

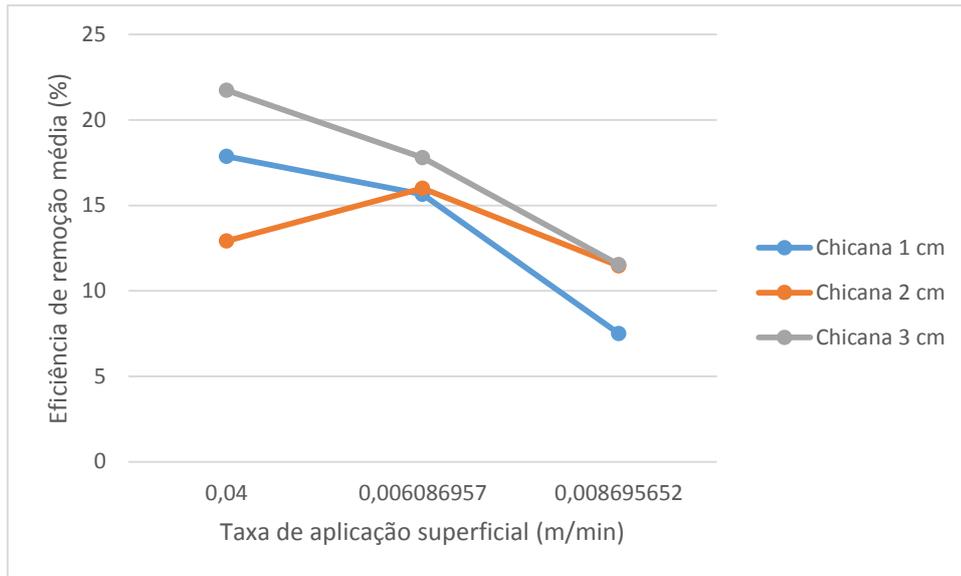


Figura 59 - Eficiência de remoção média em função da taxa de aplicação superficial para uma concentração de 100 mg/L - Fase 1

Tal como verificado na figura 58, a figura 59 mostra que com o aumento da taxa de aplicação superficial a eficiência de remoção diminui, tal como seria de prever. O posicionamento da chicana que produziu maiores valores foi a 3 cm da base, porém um pouco inferiores dos valores obtidos com a concentração de 50 mg/L.

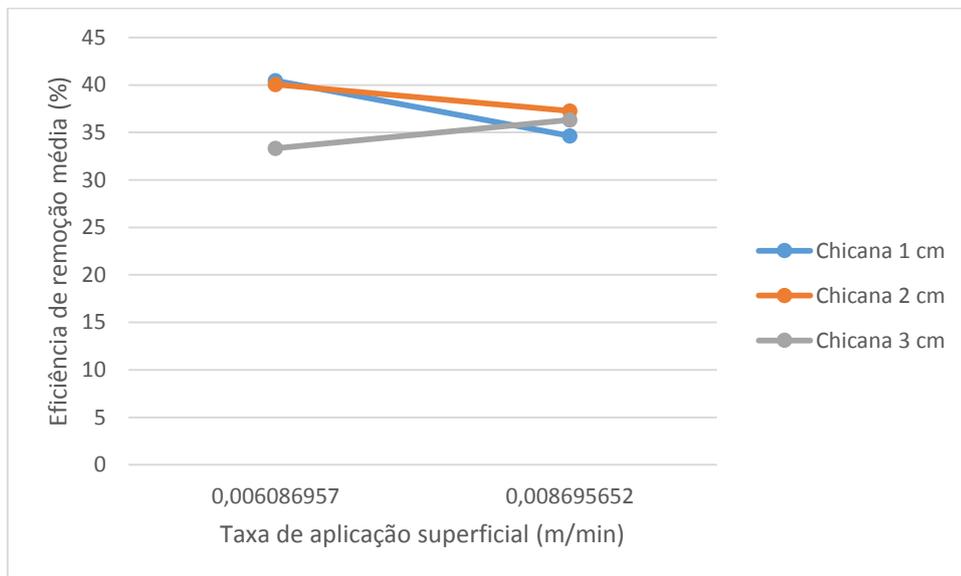


Figura 60 - Eficiência de remoção média em função da taxa de aplicação superficial para uma concentração de 50 mg/L - Fase 2

A figura 60 evidência um comportamento idêntico exceto no caso da chicana a 3 cm, o que pode traduzir um ensaio em que algo tenha corrido mal. Não foi possível concluir sobre a razão desta disparidade e optou-se por manter os resultados, pois evidenciam alguma dificuldade associada à obtenção dos presentes resultados experimentais.

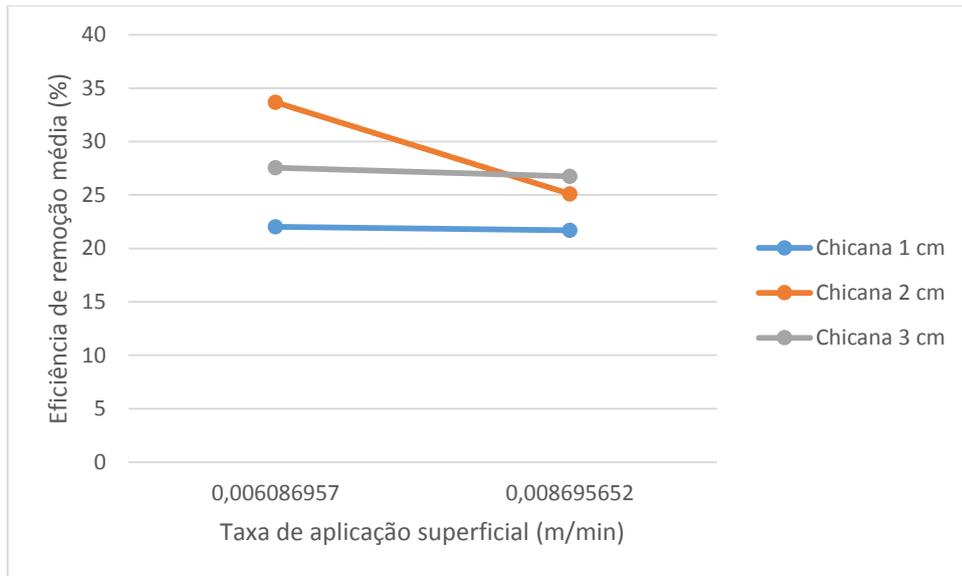


Figura 61 - Eficiência de remoção média em função da taxa de aplicação superficial para uma concentração de 100 mg/L - Fase 2

Relativamente à 2ª configuração de entrada, a taxa de aplicação superficial segue o mesmo padrão de diminuição referido nas figuras 58 e 59.

Globalmente, a análise da eficiência de remoção média em função da taxa de aplicação superficial permite concluir que a eficiência diminui com o incremento da taxa, para qualquer configuração (fase 1 ou 2, independentemente do posicionamento da chicana) e concentração estudada. Comparando as duas fase, observa-se um incremento de remoção para a fase 2, em que a entrada deixa de ser pontual, e passa a existir mais uniformidade de caudal em toda a largura do sedimentador.

### 4.7 Conclusões

Em estações de tratamento de águas residuais os sedimentadores primários, apresentam eficiências de remoção de sólidos entre 20 % e 40 % (Wilson, 2005). O modelo reduzido em laboratório apresentou valores distintos relativamente a cada uma das fases, sendo que na fase 1 apresentou valores entre 6 % e 25 %, e na fase 2, a eficiência de remoção de sólidos suspensos encontra-se entre 20 % e 45 %. Pode concluir-se que a configuração da entrada da 2ª fase origina uma maior eficiência de remoção, num sedimentador exatamente com as mesmas dimensões. Os ensaios realizados revelaram-se muito demorados devido ao facto de cada ensaios necessitar de 5 tempos de retenção de forma a atingir o regime permanente de escoamento, verificado entre o 2º e o 3º tempo de retenção.

Os valores obtidos relativamente aos ensaios da segunda fase revelaram uma melhoria significativa relativamente aos obtidos pelos valores da 1ª fase, tal como seria de esperar. Com a colocação da peça em forma de “T” na entrada do sedimentador, dividindo a configuração de entrada em quatro orifícios reduzimos significativamente as zonas de circulação presentes no sedimentador bem como a redução da velocidade presentes no mesmo, tal como foi verificado nos ensaios realizados por Rostami et al., 2010. Pelos ensaios realizados por Rostami et al, 2010 verifica-se que zonas de entrada posicionadas no fundo do sedimentador provocam velocidades indesejáveis no fundo do sedimentador, diminuindo o efeito da remoção do sedimentador, tal como é verificado na 1ª fase de ensaios relativos à 1ª configuração de entrada.

A visualização do escoamento permitiu verificar que o sedimentador se encontrava nivelado, com um escoamento superficial uniforme para um posicionamento da chicana para 1 cm e sem chicana.

## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se as conclusões desta dissertação.

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho consistiu em avaliar de que forma alterações na configuração de entrada de um sedimentador alterariam os valores de eficiência de remoção do mesmo. Foram estudadas duas configurações de entrada em que na primeira os valores seriam previsivelmente menos satisfatórios e na segunda seria possível observar uma visível melhoria.

Foi necessário perceber em termos de eficiência de remoção que fatores poderiam ser passíveis de alteração para obter os resultados pretendidos. Assim foi possível concluir:

1. A distância entre zona de entrada e o posicionamento da chicana influencia a eficiência de remoção, sendo que quanto mais afastado se encontra menor será a eficiência.
2. Quanto maior for a distância entre a zona de entrada da água residual e o posicionamento da chicana maior é a possibilidade de ocorrer zonas de circulação.
3. Configurações de entrada posicionadas no fundo do sedimentador verificam velocidades elevadas na base do sedimentador, fator a evitar devido ao facto de os sedimentos se depositarem no fundo.
4. Configurações de entrada com mais que um orifício revelam resultados mais vantajosos quer em relação à redução de zonas de circulação, quer em relação às velocidades observadas no interior dos sedimentadores.

## 5. Conclusões

---

Foi então realizada a 1ª alteração ao modelo reduzido de sedimentador primário, removendo a 1ª lamina que constituía o sedimentador, aumentando assim o espaço entre a entrada do sedimentador e a 1ª chicana. Verificou-se que só era possível efetuar medições quando estava decorrido um período de tempo igual a duas vezes o tempo de retenção calculado para o sedimentador. Para assegurar o correto funcionamento do sedimentador foram adotados cinco tempos de retenção. A instalação experimental construída relativa à 1ª fase de ensaios permitiu determinar a eficiência de sedimentação com uma incerteza relativa de 0,1% e 0,67%, valores considerados aceitáveis.

Relativamente à 2ª fase da dissertação, foi promovida uma alteração ao nível da zona de entrada de água, introduzindo um tubo em forma de “T” que divide a entrada de água por quatro orifícios de secção total igual à secção do tubo de entrada da água residual. Os ensaios foram realizados utilizando a mesma metodologia da 1ª fase e a incerteza experimental do rendimento foi de, 0,05% e 0,14%.

Foi possível verificar:

1. Com a 2ª fase as eficiências de remoção foram, para todos os ensaios realizados, superiores às verificadas com a 1ª fase.
2. A configuração de entrada influencia em grande escala a eficiência de remoção do sedimentador, sendo que com a utilização do tubo de entrada com quatro orifícios houve uma melhoria, no limite, de 20%
3. A visualização do escoamento permitiu verificar que a chicana não possibilita a formação de zonas mortas no sedimentador.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Na sequência do presente estudo e de forma a perceber e melhorar o conhecimento do fenómeno da sedimentação, por via experimental, apresentam-se as seguintes sugestões para possíveis trabalhos futuros:

1. Alterar o tipo de sedimentador a estudar, tal como sedimentador circular ou de lamelas e comparar os resultados obtidos com o modelo reduzido do sedimentador retangular
2. Realizar ensaios com diferentes configurações de entrada para perceber se há melhorias em relação às utilizadas na presente dissertação.
3. Utilização de técnicas experimentais mais avançadas, tais como anemometria laser Doppler, que possibilitem a caracterização do campo de velocidades no interior do sedimentador.



---

**BIBLIOGRAFIA**

- Hazen, A. (1904). *On Sedimentation*. Transc. ASCE, vol. 53.
- Levy, João T. de Quinhones. (1987). *Exploração de estações de tratamento de águas residuais*.
- Levy, João T. de Quinhones. (1987). *Operação de Estações de Tratamento de Águas Residuais*.
- Luizi, Rui. (2012) *Operação de Sistemas de Tratamento de Águas Residuais por Lamas com Arejamento Prolongado*, dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto superior Técnico.
- McGhee, Terence J. (1991). *Water Supply and Sewerage*. 6 th Ed. McGraw-Hill College.
- Metcalf&Eddy, Inc. (1993). *Wastewater engineering treatment and disposal reuse*. 4 th Ed. New York: McGraw-Hill.
- Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. (2007). *Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais*
- Moraes, P., *Decantação primária e precipitação*, Departamento de Tecnologia em Saneamento Ambiental
- Pereira, S., *Estudo Experimental num Modelo Reduzido dum Sedimentador Primário*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho (2013).
- Ronzano, E. & Dapena, J. L. (1995). *Tratamiento Biológico de Las Aguas Residuales*: Ediciones Díaz dos Santos.
- Rostami, M. S., Said, Abdullah, Syafalni, *Numerical modeling on inlet aperture effects on flow pattern in primary settling*, Appl. Math. Modelling, 1-23 (2010). Santos, J., *Metodologia de Tratamento de Lamas e Organização do Balanço de Massas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (2012).
- Shahrokhi, M., Rostami, F., Said, M., A., M., Sabbagh, S., R., Syafalni, *Experimental Investigation of the Influence of Baffle*, Technical Note, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 88-94 (2013).

- Sousa, A. A. (1990). *Elementos de Física e Química. Em Manual de Saneamento Básico I: Direção Geral de Recursos Naturais.*
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L. e Stensel, H.D., *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, Metcalf & Eddy, 4ª Edição, McGraw-Hill (2003)
- Thomas E., Wilson, P., D., DEE, Ph., D., *Clarifier Design*, Water Environment Federation (2005).
- Vanda Maria Barata de Silva Soares. (2008). *Hidráulica em Sistemas de Tratamento de Águas Residuais*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico
- WEF & ASCE (1998). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, Volume II: Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers
- WEF, *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. 1º ed. Nova Iorque: Manual and Report on Engineering (1992).
- Yoon, T., H., Lee, S., O., *Hydraulic Behavior and Removal Efficiency of Settling Tanks*, KSCE Journal of Civil Engineering, 53-57, (2000a).
- Yoon, T., H., Lee, S., O., *Numerical Modeling of Sedimentation Basins with a Baffle*, KSCE Journal of Civil Engineering, 227-232, (2000b).
- Zhou, S., McCorquodale, J., A., Godo, A., M., *Short Circuiting and Density Interface in Primary Clarifiers*, Journal of Hydraulic Engineering, 120, 1060-1080, (1994).