

Desenvolvimento de coagulante/ floculante para tratamento de águas residuais

Joana Costa Dias

Novembro de 2014

Orientação: Professora Dr.^a Leonilde Cristina Morais

Co-Orientação: Professora Dr.^a Maria Manuela Barbosa Correia

Agradecimentos

A concretização desta dissertação conclui a minha jornada no Instituto Superior de Engenharia do Porto. Gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram de forma decisiva para a sua concretização.

Em primeiro lugar, agradeço a todos aqueles que, com o seu saber, a sua colaboração e o seu apoio crítico dispuseram do seu tempo para me ajudar.

Agradeço à Professora Doutora Cristina Morais e à Professora Doutora Manuela Correia por todo o apoio prestado e, principalmente, pela compreensão demonstrada desde a iniciação deste trabalho até ao último dia da sua conclusão.

Uma palavra especial ao Laboratório de Tecnologia Química do ISEP, nomeadamente para a Professora Doutora Teresa Esteves, para a Eng.^a Marília e para o Eng.^o Tomás que possibilitaram o desenvolvimento e a realização dos ensaios laboratoriais, agradecendo todo o apoio prestado.

Aos meus pais e irmão agradeço todo o apoio incondicional dado durante este período de tempo, ao incentivo nos momentos mais complicados e por acreditarem que tudo isto era possível.

Ao Paulo agradeço por toda ajuda, pela confiança e valorização sempre entusiasta do meu trabalho, dando-me coragem para ultrapassar as limitações decorrentes ao longo deste período.

Aos meus amigos agradeço todo o companheirismo demonstrado ao longo destes anos.

Aos amigos onde a amizade começou no ISEP agradeço pelos momentos de entusiasmo partilhados juntos, pelo apoio nos momentos menos fáceis e pela criação de laços “familiares”.

Resumo

Esta dissertação teve como objetivo clarificar a qualidade das águas residuais de uma indústria de fabricação de adesivos. Para esta clarificação optou-se por um tratamento de coagulação/floculação a ser efetuado com a adição de apenas um produto no estado sólido. Para este estudo, selecionou-se substâncias comercialmente disponíveis destacando-se para esta formulação um coagulante, sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), dois adjuvantes, hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (adjuvante H) e Montmorillonite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (adjuvante M) e um floculante, uma poliacrilamida aniônica ($\text{C}_3\text{H}_5\text{NO}$)_n.

O efluente bruto da indústria de adesivos foi caracterizado e verificou-se que dos parâmetros analisados, apenas o pH obedece aos valores limite de emissão para descarga no coletor municipal.

Determinaram-se as quantidades ótimas das substâncias selecionadas, a quantidade mínima de produto formulado e foi feita a otimização da composição do produto formulado, para três níveis de pH e duas condições de agitação

Numa primeira fase, a realização de ensaios preliminares sobre a quantidade de cada uma das substâncias conduziu aos valores 5 e 30 g de coagulante, 2 e 10 g de adjuvante M; 3 g de adjuvante H e 0,01 g de floculante por 500 mL de efluente.

Na otimização da quantidade mínima de produto formulado obteve-se o valor de 5g de produto por 500 mL de efluente.

Relativamente à formulação do produto foi definido estudar o efeito da variação das razões, %(m/m), dos adjuvantes (M e H) em função do coagulante, para diferentes valores de pH inicial (6,2; 8,1 e 10) e para duas condições de agitação (A e B), sobre os parâmetros analisados (CQO, SST, turvação, pH final e IVL). Na condição A manteve-se uma agitação de 150 rpm durante 2 minutos, reduzindo-se para 60 rpm durante 15 minutos e, por fim, para 30 rpm durante 5 minutos. Na condição B foi usada uma agitação constante de 90 rpm durante 22 minutos.

O estudo do efeito das variações das razões % (m/m) dos adjuvantes M e H foi dividido em três grupos com três subgrupos: 1º grupo - 0,6 a razão mássica adjuvante M/coagulante e 0,4, 1,2 e 2 a razão mássica adjuvante H/ coagulante; 2º grupo - 0,2 a razão mássica adjuvante M/coagulante e 0,1, 0,4 e 0,6 a razão mássica adjuvante H/ coagulante; 3º grupo -

0,1 a razão mássica adjuvante M/coagulante e 0,1, 0,2 e 0,3 a razão mássica adjuvante H/coagulante.

Após este estudo obteve-se para cada condição de agitação (A e B), as razões $\%(m/m)$ e o pH inicial mais adequados, com base nos melhores resultados obtidos no efeito sobre a CQO. Para a condição de agitação A o melhor resultado obteve-se para pH inicial igual a 8,1 com a razão mássica de adjuvante M/ coagulante igual a 0,1 e a razão mássica de adjuvante H/coagulante igual a 0,1 (percentagens de remoção de 98,01%, 99,60% e 99,43% para a CQO, SST e turvação, respetivamente). Para a condição de agitação B o melhor resultado obteve-se para pH inicial igual a 8,1 com a razão mássica de adjuvante M/ coagulante igual a 0,1 e a razão mássica de adjuvante H/coagulante igual a 0,1 (percentagens de remoção de 98,67%, 99,77% e 98,40% para a CQO, SST e turvação, respetivamente). Nestas condições é necessário efetuar a correção do pH após o tratamento. Apesar das elevadas percentagens de remoção obtidas, o índice volumétrico de lamas indica fraca qualidade de sedimentação.

Palavras-chaves: águas residuais, coagulação/floculação, coagulante, adjuvante, CQO

Abstract

This dissertation aimed to clarify and improve the quality of wastewater from an industry of adhesives manufacture. For this purpose, a treatment coagulation / flocculation with the addition of only one product in the solid state was chosen. Commercially available substances were selected to be included in this formulation: a coagulant, aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), two adjuvants, calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (adjuvant H) and Montmorillonite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (adjuvant M) and a flocculant, an anionic polyacrylamide $(\text{C}_3\text{H}_5\text{NO})_n$.

The raw effluent from the adhesives industry has been characterized and it was found that for the parameters analyzed, only the pH meets the emission limit values for discharge into municipal collector.

Optimal amounts of the selected substances and the minimum quantity of formulated product were determined. The composition of the formulated product was optimized for three pH levels and two stirring conditions.

Initially, preliminary tests on the amount of each of the substances led to the values 5 and 30 g of coagulant, 2 and 10 of adjuvant M; 3 g of adjuvant H and 0.01 g of flocculant per 500 mL of effluent.

In optimizing the minimum quantity of formulated product a value of 5 g of product per 500 ml of effluent was obtained.

For the formulation of the product, the effect of varying ratios % (w/w), adjuvants (M and H) according to the coagulant, for different initial pH values (6.2, 8.1 and 10) and two conditions of agitation (A and B) on the analyzed parameters (COD, TSS, turbidity and clarity, final pH and SVI) were studied. The condition A is maintained by stirring of 150 rpm for 2 minutes, decreased to 60 rpm for 15 minutes, and finally to 30 rpm for 5 minutes. In condition B constant agitation of 90 rpm for 22 minutes was used.

The study of the effect of different ratios % (w/w) of M and H adjuvants was divided into three groups each with three subgroups: 1st group - mass ratio adjuvant M/coagulant = 0.6 and the mass ratio adjuvant H/coagulant of 0.4, 1.2 and 2; 2nd group - mass ratio adjuvant M/coagulant = 0.2 and the mass ratio adjuvant H/coagulant of 0.1, 0.4 and 0.6; 3rd group - mass ratio adjuvant M/coagulant = 0.1 and the mass ratio adjuvant H/coagulant of 0.1, 0.2 and 0.3.

For each condition of agitation (A and B), the ratios % (w/w) and the most suitable initial pH based on the best results obtained in the effect on COD were established. For the condition of stirring A, the best result was obtained for initial pH = 8.1 with the weight ratio of adjuvant M/coagulant equal to 0.1 and the weight ratio of adjuvant H/coagulant equal to 0.1 (removal percentages of 98.01%, 99.60% and 99.43% for COD, TSS and turbidity, respectively). To the stirring condition B, the best result was obtained for initial pH = 8.1 with the weight ratio of adjuvant M/coagulant equal to 0.1 and the weight ratio of adjuvant H/coagulant equal to 0.1 (removal percentages of 98.67%, 99.77% and 98.40% for COD, TSS and turbidity, respectively). Under these conditions it is necessary to make the pH adjustment after treatment. Despite the high removal percentages obtained, the Sludge Volume Index indicates poor sedimentation quality.

Key words: wastewater, coagulation / flocculation, coagulation, adjuvant, COD

Índice

1. Introdução	1
1.1 Contexto/Enquadramento	1
1.2 Motivação e objetivos.....	1
1.3 Estrutura da dissertação	2
1.4 A importância da água	3
1.4.1 Pegada Hídrica.....	4
1.4.2 Consumo de água na Europa e em Portugal	5
1.5 O tratamento de águas residuais na atualidade	7
1.5.1 Pré-Tratamento.....	7
1.5.2 Tratamento Primário	7
1.5.3 Tratamento Secundário	8
1.5.3.1 Lamas ativadas	8
1.5.3.2 Leitos Percoladores	8
1.5.3.3 Discos Biológicos	8
1.5.4 Tratamento Terciário.....	9
1.6 Legislação aplicável	9
2. Tratamento - coagulação/floculação	11
2.1 Coloides	11
2.2 Propriedades elétricas.....	13
2.3 Coagulação.....	14
2.3.1 Compressão da camada difusa	14
2.3.2 Adsorção e neutralização da carga.....	14
2.3.3 Inclusão num precipitado	15
2.3.4 Adsorção e formação de pontes entre partículas	15
2.4 Tipos de coagulantes	15
2.4.1 Sais metálicos.....	15
2.4.1.1 Sulfato de alumínio	15
2.4.1.2 Sulfato ferroso	16
2.4.1.3 Cloreto Férrico.....	16
2.4.2 Coagulantes orgânicos	16
2.4.3 Adjuvantes.....	17
2.5 Floculação.....	17
2.5.1 Floculação pericínética	17
2.5.2 Floculação ortocínética	18
2.6 Fatores que afetam a coagulação/floculação	18
2.6.1 Turvação.....	18
2.6.2 Temperatura da água residual	18
2.6.3 pH.....	19
2.6.4 Alcalinidade	19
2.6.5 Grau e tempo de mistura	19
2.6.6 Natureza e dosagem do coagulante	19
3. Caracterização do processo fabril.....	21

3.1	Análise global dos resíduos do setor e da sua gestão	22
3.2	Circuito de águas de lavagem	23
4.	Descrição experimental.....	25
4.1	Caracterização do efluente bruto	25
4.2	Seleção de produtos comercialmente disponíveis a incluir na formulação	26
4.3	Ensaio preliminares em Jar Test: estudo das quantidades ótimas de cada constituente	26
4.3.1	Estudo da gama de coagulante	27
4.3.2	Estudo da gama de adjuvante H	27
4.3.3	Estudo da gama de adjuvante M	27
4.3.4	Estudo da gama de floculante	28
4.4	Ensaio exploratórios: determinação da quantidade mínima de produto formulado	28
4.5	Ensaio experimentais: otimização da composição do produto formulado, pH e agitação.....	28
4.5.1	Primeiro grupo de ensaios (razão mássica adjuvante M/coagulante = 0,6)	29
4.5.2	Segundo grupo de ensaios (razão mássica adjuvante M/coagulante = 0,2)	30
4.5.3	Terceiro grupo de ensaios (razão mássica adjuvante M/coagulante = 0,1)	30
5.	Resultados e discussão	31
5.1	Características médias do efluente bruto	31
5.2	Ensaio preliminares	32
5.3	Ensaio exploratórios	33
5.4	Resultados dos ensaios experimentais	34
5.4.1	Efeito sobre a CQO	34
5.4.2	Efeito sobre o pH final.....	38
5.4.3	Efeito sobre a turvação e clarificação	41
5.4.4	Efeito sobre os SST	45
5.4.5	Efeito sobre o IVL	48
6.	Conclusões e Trabalho Futuro	53
6.1	Trabalho Futuro.....	55
	Referências	57
	Anexo A - Procedimento para análise de parâmetros	59
A.1.	Procedimento de análise da carência química de oxigénio (CQO)	59
A.2.	Procedimento de análise da Turvação	59
A.3.	Procedimento para determinação de Sólidos Suspensos totais (SST)	60
A.4.	Procedimento para determinação do índice volumétrico de lamas (IVL)	60
	Anexo B - Análise de parâmetros ao efluente bruto para diferentes diluições.....	61
	Anexo C – Quantidades e razão das substâncias	63
	Anexo D - Informação do custo dos constituintes da formulação.....	65
	Anexo E – Resultados obtidos para CQO	67
	Anexo F – Resultados obtidos para pH final	69
	Anexo G – Resultados obtidos para a Turvação e Clarificação	71
	Anexo H – Resultados obtidos para os SST	75
	Anexo I – Resultados obtidos para IVL	77

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Colóide hidrofílico. (Chang, 2005)	12
Figura 2.2 - Colóides hidrofóbicos (Chang, 2005).....	12
Figura 2.3 - Esquema da partícula com a camada rígida e a camada difusa. (Silva, 2010) ..	13
Figura 3.1 - Diagrama do processo de fabricação (PNPRI, 2000)	21
Figura 3.2 - Circuito do efluente na unidade fabril	23
Figura 4.1 - Diagrama de fases do estudo de tratamento físico-químico	25
Figura 5.1 – Cor do efluente bruto.....	32
Figura 5.2 – Exemplo de lamas geradas num ensaio preliminar.....	33
Figura 5.3 – Resultados de clarificação dos ensaios 1 (a), ensaio 2 (b), ensaio 3 (c), ensaio 4 (d), usando 5 g de produto formulado	34
Figura 5.4 – Resultados de CQO para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2\text{min}$; 60rpm $\Delta t = 15\text{min}$; 30rpm $\Delta t = 5\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	35
Figura 5.5 – Resultados de CQO para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	37
Figura 5.6 – Resultados de pH final para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2\text{min}$; 60rpm $\Delta t = 15\text{min}$; 30rpm $\Delta t = 5\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	39
Figura 5.7 – Resultados de pH final para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	40
Figura 5.8 – Resultados de turvação para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2\text{min}$; 60 rpm $\Delta t = 15\text{ min}$; 30 rpm $\Delta t = 5\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	42
Figura 5.9 – Resultados de turvação para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	43
Figura 5.10 - Resultados de SST para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2\text{min}$; 60rpm $\Delta t = 15\text{min}$; 30rpm $\Delta t = 5\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	46
Figura 5.11 - Resultados de SST para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	47
Figura 5.12 - Resultados de IVL para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2\text{min}$; 60rpm $\Delta t = 15\text{min}$; 30rpm $\Delta t = 5\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	49
Figura 5.13 – Resultados de IVL para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22\text{ min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)	50

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Consumo da água por sectores na Europa (Moura, 2008)	5
Tabela 1.2 - Consumo de água abastecida pela rede pública por município. Fonte: INE, Inquérito ao Ambiente – Caracterização do Saneamento Básico 2005 (Moura, 2008)	6
Tabela 1.3 – Classificação dos sistemas biológicos de tratamento de efluentes (Meireles, 2011)	8
Tabela 1.4 - Alguns valores limites de emissão do anexo XVIII do decreto-lei n.º236/98 (Ministério, 1998)	10
Tabela 1.5 - Alguns valores limites de emissão impostos pelo município de Vila Nova de Gaia	10
Tabela 4.1 – Formulação do produto do primeiro grupo de ensaios	29
Tabela 4.2 – Formulação do produto para o segundo grupo de ensaios	30
Tabela 4.3 - Formulação do produto para o terceiro grupo de ensaios.....	30
Tabela 5.1 – Caracterização do efluente bruto	31
Tabela 5.2 – Quantidade das substâncias utilizadas nos quatro melhores ensaios preliminares	33
Tabela 5.3 – Tabela de níveis de clarificação	44
Tabela 5.4 – Qualidade da sedimentação de acordo com o valor de IVL (Vaz, 2009)	48
Tabela 5.5 – Resultados de CQO, SST e Turvação para os melhores ensaios de cada conjunto de condições iniciais.....	51
Tabela B.1 - Resultados obtidos para efluente bruto para diferentes diluições	61
Tabela C.1 - Quantidade e a razão de adjuvante para ensaios do 1º grupo	63
Tabela C.2 - Quantidade e a razão de adjuvante para ensaios do 2º grupo	63
Tabela C.3 - Quantidade e a razão de adjuvante para ensaios do 3º grupo	63
Tabela D.1 - Preço por substância	65
Tabela E.1 - Resultados da CQO para condição de agitação A e B para pH = 10.....	67
Tabela E.2 - Resultados da CQO para condição de agitação A e B para pH = 8,1.....	67
Tabela E.3 - Resultados da CQO para condição de agitação A e B para pH = 6,2.....	68
Tabela F.1 - Resultados do pH final para condição de agitação A e B para pH = 10.....	69
Tabela F.2 - Resultados do pH final para condição de agitação A e B para pH = 8,1.....	69
Tabela F.3 - Resultados do pH final para condição de agitação A e B para pH = 6,2.....	70
Tabela G.1 - Resultados da Turvação para condição de agitação A e B para pH = 10.....	71
Tabela G.2 - Resultados da Turvação para condição de agitação A e B para pH = 8,1.....	71
Tabela G.3 - Resultados da Turvação para condição de agitação A e B para pH = 6,2.....	72
Tabela G.4 - Resultados da clarificação para condição de agitação A e B para pH = 10.....	72
Tabela G.5 - Resultados da clarificação para condição de agitação A e B para pH = 8,1.....	72
Tabela G.6 - Resultados da clarificação para condição de agitação A e B para pH = 6,2.....	73
Tabela H.1 - Resultados de SST para condição de agitação A e B para pH = 10.....	75
Tabela H.2 - Resultados de SST para condição de agitação A e B para pH = 8,1.....	75
Tabela H.3 - Resultados de SST para condição de agitação A e B para pH = 6,2.....	76
Tabela I.1 - Resultados do IVL para condição de agitação A e B para pH = 10.....	77
Tabela I.2 - Resultados do IVL para condição de agitação A e B para pH = 8,1.....	77

Tabela I.3 - Resultados da clarificação para condição de agitação A e B para pH = 6,278

Abreviaturas e Símbolos

CBO5	Carência Bioquímica de oxigênio
CQO	Carência química de oxigênio
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais
FTU	Unidades de turvação
IVL	Índice Volumétrico de lamas
ONU	Organização das Nações Unidas
RPM	Rotações por minuto
SST	Sólidos Suspensos Totais
V30	Volume de lamas sedimentada após 30 minutos do início do teste
VLE	Valor limite de emissão

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto/Enquadramento

O trabalho descrito neste relatório foi desenvolvido no âmbito Dissertação, 2º ano do Mestrado em Engenharia Química, ramo Tecnologias de Proteção Ambiental do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

O contato direto com os processos de tratamento de águas residuais, em ambiente empresarial, incluindo a sua otimização, monitorização e garantia do cumprimento de requisitos legais, suscitou o interesse na possibilidade de aprofundar este tema.

1.2 Motivação e objetivos

O ambiente é um ponto fulcral na existência dos seres vivos e a poluição é, atualmente, uma das maiores preocupações da sociedade. Na prática a contaminação ambiental existe devido, principalmente, ao aumento da população mundial e ao crescimento económico alheio à proteção do ambiente.

A água é um dos recursos naturais mais ameaçados pela poluição. Neste sentido, o tema deste trabalho remete-se ao tratamento das águas residuais que, quando não tratadas previamente, constituem uma importante fonte de poluição.

Com uma regulamentação e legislação cada vez mais rigorosas, as indústrias vêem-se obrigadas a gerir as emissões, efluentes e resíduos produzidos pelos seus processos produtivos.

De uma forma geral, as águas residuais necessitam de ser previamente tratadas para que sejam eliminados os principais contaminantes que prejudicam o ambiente. Normalmente, as indústrias possuem uma estação de tratamento de águas residuais industriais (ETARI) onde efetuam o primeiro tratamento que tem como objetivo cumprir os requisitos mínimos estipulados nos regulamentos para que os efluentes possam ser descarregados no coletor das águas residuais municipais. Toma-se como exemplos, para a descarga no meio público

hídrico, o cumprimento dos valores limite de emissão (VLE) da carência bioquímica de oxigénio (CBO₅), carência química de oxigénio (CQO), sólidos suspensos totais (SST), entres outros parâmetros. Destes coletores, as águas são dirigidas para a estação de tratamento de águas residuais (ETAR) do município onde, para além de tratamento primário sofrem tratamento secundário e, se necessário, um tratamento terciário para poderem serem libertadas no ambiente.

Neste trabalho, pretende-se abordar o tratamento de águas residuais de um tipo específico de indústria, a fabricação de adesivos, instalada numa zona industrial do norte de Portugal. A empresa iniciou a sua atividade em fevereiro de 1994 e tem vindo a crescer ao longo destes anos estando, neste momento, a expandir as suas instalações para poder oferecer uma resposta mais rápida e com maior qualidade aos seus clientes. Por ano, esta empresa consome aproximadamente 1500 m³ de água no seu processo produtivo e rejeita cerca de 800 m³ como águas residuais.

Esta indústria, com o objetivo de tratar as águas residuais efetuou contratos com algumas empresas prestadoras deste serviço. No entanto, não obtiveram sucesso nas tentativas efetuadas. Uma das três empresas não conseguiu tratar água justificando que a agitação constante implementada no tanque de tratamento não era adequada. As outras duas empresas conseguiram obter efluente tratado, porém a quantidade de coagulante e floculante necessários ao tratamento era elevada provocando custos excessivos e demasiadas lamas. Além disso, também era necessário ter um operador disponível cerca de 2 horas para o tratamento.

Assim, pretendeu-se com este trabalho estudar um tratamento por coagulação/floculação utilizando-se um produto formulado, constituído por uma mistura de substâncias previamente selecionadas e quantificadas. Esta formulação foi desenvolvida com o objetivo de obter a água tratada, obedecendo aos parâmetros previamente definidos na legislação.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo é composto por esta introdução ao tema da dissertação contendo o contexto, a motivação, o objetivo do trabalho e a análise da atualidade sobre o tema abordado. Seguidamente, no segundo capítulo corresponde à base teórica do tema em desenvolvimento, abordando o tratamento de coagulação/floculação, coagulantes, adjuvantes e floculantes. O terceiro capítulo caracteriza o processo fabril da indústria em estudo. Continuamente o quarto capítulo aborda as diferentes fases da parte experimental. O quinto capítulo descreve os resultados obtidos

para os ensaios desenvolvidos. Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho e as perspectivas de futuros desenvolvimentos.

1.4 A importância da água

A água existe no planeta há milhões de anos, em estado sólido, líquido ou gasoso, no entanto, não se trata de um recurso ilimitado. Sendo um bem essencial à vida, logo devia ser preservada como tal (Martins, 2009).

Com o aumento da população e o crescimento económico existiu a preocupação do consumo de água por parte dos governos e organizações não-governamentais. Pois, a água é determinante para a sobrevivência do ser humano, do setor económico, cultural e social (Vianna, et al., 2005).

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) cerca de 75% do Planeta é composto por água, no entanto, a maior parte desta água é salgada não podendo ser usada pelo ser humano para consumo ou para agricultura. Ou seja, o ser humano consome água doce, o que corresponde aproximadamente a 2,5% do total de água no planeta. Ainda assim só cerca de 0,007% dessa água se encontra em locais de fácil acesso (Martins, 2009).

O ciclo hidrológico é responsável pela constante renovação da água doce: a água que existe no solo evapora-se e regressa novamente à terra por precipitação. Desta forma a água doce é constantemente reciclada. Porém, devido ao forte crescimento populacional e à falta de consciencialização existe um elevado desperdício de água. (Grassi, 2004)

A água pode ser utilizada de diversas formas e, conseqüentemente existe poluição dos seguintes tipos: (Martins, 2009)

- Poluição do solo – descarga de poluentes nas origens de água subterrâneas;
- Poluição térmica – descarga de efluentes a altas temperaturas;
- Poluição física – descarga de material em suspensão;
- Poluição biológica – descarga de bactérias patogénicas e vírus;
- Poluição química – descarga de produtos químicos.

É importante realçar que qualidade da água é tão relevante como a quantidade pois, não basta que haja quantidade, é necessário que a qualidade da água seja compatível com o uso a que é destinada. (Grassi, 2004)

O consumo e a poluição da água podem estar associados a atividades específicas como irrigação, higiene pessoal, limpeza, refrigeração e processamento. Até ao passado recente, havia poucas abordagens científicas e práticas de gestão da produção e abastecimento de água. Como resultado, há pouca consciencialização sobre o facto de que a organização e as

caraterísticas de produção e a cadeia de abastecimento influenciam fortemente os volumes de consumo e poluição da água.

O consumo de água pode ser avaliado/calculado pela Pegada Hídrica.

1.4.1 Pegada Hídrica

A pegada hídrica é um indicador da utilização da água que considera não só o uso direto por um consumidor ou produtor, mas também o seu uso indireto. Pode ser considerada como um indicador abrangente da apropriação de recursos hídricos. Assim, para um produto, a pegada hídrica é o volume de água utilizado para produzi-lo, medida ao longo de toda a cadeia produtiva, mostrando consecutivamente o consumo de água por fontes e a quantificação de poluição pelo tipo de poluição. Existem 3 tipos de pegadas hídricas para um produto: (Hoekstra, et al., 2011)

- Pegada hídrica azul – Refere-se ao consumo de água (superficial ou subterrânea) ao longo da sua cadeia produtiva. Entende-se como consumo a perda de água que evapora, retorna a outra bacia hidrográfica ou ao mar ou é incorporada num produto;
- Pegada hídrica verde – Consumo de água da chuva;
- Pegada hídrica cinzenta - Refere-se à poluição e é definida como o volume de água doce necessário para assimilar a carga de poluentes, a partir de concentrações naturais e de padrões de qualidade da água existentes.

Este tipo de cálculo oferece uma perspetiva sobre a forma como o consumidor/produtor gere o seu consumo e efeitos aplicáveis ao recurso utilizado, água.

A avaliação da pegada hídrica abrange um amplo leque de atividades, visando:

- Quantificar e localizar a pegada hídrica num processo, produto, produtor ou consumidor ou de uma área geográfica;
- Avaliar a sustentabilidade ambiental, social e económica;
- Formular estratégias.

Esta avaliação é uma ferramenta analítica que pode auxiliar na compreensão sobre como atividades e produtos interagem com a escassez e a poluição da água bem como os impactos associados. Dá-nos uma visão adicional para que se possa entender o que poderá ser feito. (Hoekstra, et al., 2011)

Uma avaliação completa da pegada hídrica é caracterizada por quatro fases distintas:

- Definição de objetivos e metas;
- Contabilização da pegada hídrica;
- Avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica;
- Formulação de respostas à pegada hídrica.

O tratamento das águas residuais industriais é contabilizado na pegada hídrica. O resultado deste tratamento irá afetar a pegada hídrica cinzenta, ou seja, quando as águas são totalmente recicladas ou reutilizadas para o mesmo e/ou outro fim, após o tratamento que se acha necessário, a pegada hídrica será igual a zero. No entanto, se a água for descarregada num coletor apropriado, existirá uma pegada hídrica cinzenta associada à qualidade do efluente. Contudo, a pegada hídrica cinzenta depende da qualidade do efluente tratado no momento de lançamento no meio ambiente e não da qualidade antes de tratamento. O tratamento poderá ter um valor igual a zero para a pegada hídrica cinzenta quando as concentrações de poluentes no efluente tratado forem iguais ou inferiores a água do meio recetor. Pode-se ainda considerar que o tratamento de águas residuais terá uma pegada hídrica azul quando houver evaporação de águas durante o processo de tratamento em tanques de estabilização. (Hoekstra, et al., 2011)

1.4.2 Consumo de água na Europa e em Portugal

A indústria em geral necessita de água para a sua produção, nomeadamente para o seu processo produtivo, lavagens após a produção e para arrefecimento. Na Tabela 1.1 apresenta-se o consumo de água no ano de 2000 e a previsão para o ano 2030.

Tabela 1.1 - Consumo da água por sectores na Europa (Moura, 2008)

Sectores	Norte Europa ¹		Sul Europa ²		Novos membros ³		Candidatos ⁴		Europa	
	2000	2030	2000	2030	2000	2030	2000	2030	2000	2030
Agricultura (%)	3	-11	44	+14	7	+0	60	+10	32	+11
Energia (%)	45	-73	23	-63	61	-75	15	-48	31	-68
Indústria (%)	20	+30	11	+24	10	+94	9	+124	13	+43
Habitacões (%)	32	-18	22	-6	22	+74	16	+60	24	+3
Total (km ³)	90,1	60,5	136,6	126,8	23,3	16,6	57,5	68,6	307,6	273,3

¹ Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Finlândia, Holanda, Irlanda, Luxemburgo, Noruega, Reino Unido, Suécia e Suíça; ² Espanha, França, Grécia, Itália e Portugal; ³ Chipre, Eslováquia, Eslovénia, Estónia, Hungria, Lituânia, Malta, Polónia e República Checa; ⁴ Bulgária, Roménia e Turquia.

Segundo a Tabela 1.1 as previsões apontam que na Europa vai diminuir o consumo de água utilizada na produção de energia e vai aumentar significativamente o consumo na indústria e na agricultura até 2030, nos países designados como novos membros e candidatos.

Em Portugal, o setor agrícola é o maior consumidor de água principalmente nas bacias hidrográficas do Tejo e do Douro, seguindo-se o abastecimento às populações e à indústria.

Os principais produtores de resíduos líquidos industriais são as indústrias extrativas, indústrias transformadoras e a restauração. (Moura, 2008)

Na Tabela 1.2 apresentam-se os consumos registados em 2005 da água abastecida pela rede pública em Portugal, no continente, na região Norte e por município do Grande Porto.

Tabela 1.2 - Consumo de água abastecida pela rede pública por município (Moura, 2008)

	Consumo, milhares de m ³			
	Tipo de Uso			
	Total	Residencial e de serviços	Industrial	Outros*
Portugal	659 359	493 403	99 695	66 261
Continente	599 281	455 040	88 850	55 391
Norte	157 579	125 264	20 923	11 392
Grande Porto	71 470	56 956	10 888	3 626
Espinho	1 740	1 457	245	38
Gondomar	8 398	7 447	21	930
Maia	7 016	4 909	1 145	962
Matosinhos	9 478	6 765	1 563	1 150
Porto	18 773	14 975	3 798	0
Póvoa de Varzim	3 129	2 258	414	457
Valongo	4 430	3 964	381	85
Vila do Conde	3 223	2 351	868	4
Vila Nova de Gaia	15 283	12 830	2 453	0

*A rubrica "outros" inclui todos os tipos de consumos não previstos na rubricas anteriores (segurança contra incêndios, lavagem de rua, rega, etc)

O tratamento das águas residuais que se irá trabalhar pertence ao município de Vila Nova de Gaia, que conforme a Tabela 1.2 é o segundo maior consumidor de água, relativo ao uso industrial, no Grande Porto.

Como já referido anteriormente, o problema da poluição ambiental resultante das atividades industriais tem implicações para a saúde pública e gestão dos recursos nacionais e energéticos.

Na indústria não há processos de fabrico que não estejam associados à degradação do meio ambiente. O grau de perigosidade ambiental varia consoante o tipo de indústria, matérias-primas utilizadas, do processo de produção, do produto fabricados, dos resíduos produzidos, entre outros. (Moura, 2008)

Muitos efluentes necessitam de serem tratados antes de serem lançados para o meio hídrico através dos coletores municipais. A maior parte destes tratamentos não tem uma operação e manutenção adequada, o que é devido ao facto de, na maioria dos casos, o tratamento do efluente não estar integrado no processo industrial. Por outro lado, o tratamento é efetuado em pequenas unidades cujos responsáveis não dispõem de recursos e conhecimentos técnicos adequados para tratar os resíduos produzidos. (Moura, 2008)

1.5 O tratamento de águas residuais na atualidade

As águas residuais de uma indústria podem sofrer vários tratamentos, tais como, pré-tratamentos, tratamentos primários, secundários e terciários. Cada tratamento tem os objetivos específicos e dependendo das características das águas a tratar poderá ser necessário realizar todos os níveis de tratamentos até obter uma água clarificada que obedeça Às imposições legais.

Com o pré-tratamento pretende-se separar os sólidos mais grosseiros, gordura e areia presentes no efluente. De seguida o tratamento primário, caracterizado pela coagulação/floculação, permite remover parte da matéria poluente por processos físicos. Por sua vez o tratamento secundário reduz os teores de matéria orgânica presente no efluente. Por fim, o tratamento terciário permite melhorar a qualidade das águas residuais tratadas e inclui, entre outros processos, a desinfecção para a inativação dos organismos patogénicos. (Guyer, 2011)

1.5.1 Pré-Tratamento

O pré-tratamento ou tratamento preliminar tem como objetivo remover os elementos grosseiros presentes nas águas residuais afluentes a uma ETAR, protegendo o funcionamento dos órgãos a jusante. Este pré-tratamento tem efeitos na redução de custos de manutenção dos processos e equipamentos que constituem uma ETAR. (Meireles, 2011) Pode incluir operações como gradagem e tamisagem, preparando o efluente para as etapas seguintes. (Metcalf, 1991)

1.5.2 Tratamento Primário

O tratamento primário é caracterizado por separação da matéria poluente através de sedimentação. Há quatro tipos de sedimentação que dependem do tipo de sólidos presentes no líquido: (Metcalf, 1991)

- Sedimentação discreta – verifica-se quando não existindo interferência entre partículas (ex.: desarenadores)
- Sedimentação floculenta - as partículas têm tendência a aglomerarem-se, a velocidade de queda da partícula vai aumentando devido a essa coalescência que implica o aumento das dimensões, provocando a sedimentação. (ex.: coagulação/floculação);
- Sedimentação por manto – ocorre para concentrações elevadas de sólidos (SS > 500 mg/L). Neste caso pode-se distinguir várias zonas distintas sendo cada zona caracterizada por uma dada concentração e velocidade de sedimentação;

- Sedimentação por compactação – caracterizada por elevada concentração de sólidos formando uma camada compacta com teor de água reduzido.

Na prática, é normal ocorrerem os quatro tipos de sedimentação simultaneamente num tanque de sedimentação. (Moura, 2008)

A eficiência de um tratamento primário pode ser igual ou superior a 60%, dependendo do tipo de tratamento e da forma de operação da ETAR. (Meireles, 2011)

1.5.3 Tratamento Secundário

Em geral, este tratamento baseia-se em processos de tratamento biológicos que utilizam microrganismos que decompõem a matéria orgânica, conforme o descrito na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Classificação dos sistemas biológicos de tratamento de efluentes (Meireles, 2011)

Biomassa Suspensa		Biomassa Fixa	
Aeróbios	Anaeróbios	Aeróbios	Anaeróbios
Lagoas	Lagoas	Filtro percolador	Filtro anaeróbio
Lamas ativadas	Digestor de contato	Discos Biológicos	Discos Biológicos
	UASB (leito de grânulos)	Biofiltros	
	EGSB (leito expandido de grânulo, com recirculação)		

1.5.3.1 Lamas ativadas

Este é um processo de tratamento aeróbio caracterizado pela biodegradação da matéria orgânica da água residual pelo contato com os microrganismos, responsáveis pelo processo de oxidação dessa matéria (Moura, 2008).

1.5.3.2 Leitos Percoladores

À semelhança do tratamento por lamas ativadas, o tratamento por leitos percoladores também é efetuado por microrganismos. O efluente a ser tratado entra num distribuidor rotativo criando no leito um biofilme constituído por microrganismo que biodegradam a matéria orgânica (Metcalf, 1991). Quando o efluente é filtrado pode ser feita a recirculação em torno do leito percolador ou descarga no meio recetor. Esta recirculação do efluente é realizada para aumentar a eficiência do sistema e impedir a criação de cheiros ou a morte do filme biológico. (Ruas, 2010)

1.5.3.3 Discos Biológicos

Os discos biológicos ou biodiscos são uma evolução natural dos leitos percoladores. O filme de microrganismos encontra-se na superfície do disco mas para aumentar a área de

contacto, juntam-se vários discos paralelos de reduzida espessura, com rugosidade, para permitir uma maior aderência dos microrganismos. Os discos ao girar mergulham parcialmente num canal com água residual. Como os discos estão em constante movimento existe alternância entre o contacto com o ar e a matéria orgânica. (Ruas, 2010)

1.5.4 Tratamento Terciário

Antes do lançamento final do efluente tratado existe a necessidade de desinfetá-lo para remoção dos organismos patogénicos ou remoção de determinados nutrientes. Existem nutrientes como o azoto e o fósforo que podem potenciar a eutrofização das águas recetoras.

Para a remoção destes nutrientes podem-se usar os seguintes processos: (Meireles, 2011)

- Desnitrificação – Em condições anóxicas os nitratos presentes na água são reduzidos a azoto gasoso que se liberta para a atmosfera e simultaneamente ocorre a oxidação de matéria pelos microrganismos;
- Remoção do fósforo por exemplo por precipitação química;

Para a desinfecção das águas residuais os processos mais utilizados são: (Meireles, 2011)

- Ozonização;
- Filtração por membranas;
- Radiação Ultravioleta;
- Entre outros.

1.6 Legislação aplicável

A nível de legislação aplicável em Portugal, encontra-se em vigor o Decreto-Lei n.º 236/98 que estabelece normas, critérios e objetivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos. No ponto 2 do artigo 2º estabelece “ (...) normas de descarga das águas residuais na água e no solo, visando a qualidade do meio aquático e a proteção da saúde pública e solos.”.

O anexo XVIII apresenta os valores limites de emissão (VLE) aplicáveis à descarga de águas residuais. Entre outros, indicam-se VLE para o pH, temperatura, carência bioquímica de oxigénio (CBO5), carência química de oxigénio (CQO), sólidos suspensos totais (SST), alumínio, ferro total, cheiro e cor. Na Tabela 1.4 apresentam-se os valores limites para os parâmetros referenciados. (Ambiente, 1998)

Tabela 1.4 - Alguns valores limites de emissão do anexo XVIII do decreto-lei n.º236/98 (Ambiente, 1998)

Parâmetro	Expressão dos resultados	VLE ⁽¹⁾
pH	Escala de Sorensen	6,0 – 9,0 ⁽²⁾
Temperatura	°C	Aumento de 3°C ⁽³⁾
CBO ₅ , 20°C	mg/l O ₂	40
CQO	mg/l O ₂	150
SST	mg/l	60
Alumínio	mg/l Al	10
Ferro total	mg/l Fe	2,0
Cheiro	-	Não detetável na diluição 1:20
Cor	-	Não visível na diluição 1:20

(1) VLE — valor limite de emissão, entendido como média mensal, definida como média aritmética das médias diárias referentes aos dias de laboração de um mês, que não deve ser excedido. O valor diário, determinado com base numa amostra representativa da água residual descarregada durante um período de vinte e quatro horas, não poderá exceder o dobro do valor médio mensal (a amostra num período de vinte e quatro horas deverá ser composta tendo em atenção o regime de descarga das águas residuais produzidas).

(2) O valor médio diário poderá, no máximo, estar compreendido no intervalo 5,0-10,0.

(3) Temperatura do meio recetor após a descarga de água residual, medida a 30 m a jusante do ponto de descarga, podendo o valor médio exceder o valor médio mensal do 2.º

No que diz respeito à reutilização das águas após tratamento no processo de produção da indústria não existe legislação ou regulamentação específica. Assim, para ter um padrão de controlo destas águas é necessário saber quais as necessidades e limitações a considerar para não existir qualquer contaminação no processo produtivo que afete diretamente o produto final.

Para o município onde se encontra instalada a unidade fabril, os valores máximos aplicáveis para a descarga no coletor do município estão descritos na Tabela 1.5.

Tabela 1.5 - Alguns valores limites de emissão impostos pelo município de Vila Nova de Gaia (Ambiente, 1998).

Parâmetros	Expressão dos resultados	VLE
pH	Escala de Sorensen	6,0 – 9,0
CQO	mg/l O ₂	1000
SST	mg/l	500

Capítulo 2

Tratamento - coagulação/floculação

A coagulação e a floculação são processos físico-químicos usados em tratamentos de águas residuais para remover o material em suspensão e sob a forma coloidal que provoca turvação, cor, algas, organismos planctónicos, fosfatos, metais pesados, bactérias, vírus, microrganismos patogénicos e substâncias responsáveis por gostos e cheiros. (Soares, 2009)

2.1 Coloides

Uma suspensão coloidal é uma dispersão de partículas num meio dispersante, cujas dimensões podem variar entre $0,001\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$.

As partículas de argila são as que têm menor tamanho, em contrapartida as partículas de areias possuem o maior tamanho nas águas.

Os coloides além de serem classificados pelo seu tamanho/dimensão, também são caracterizados pela sua estabilidade. Existem coloides que são extremamente estáveis, outros por sua vez são temporariamente instáveis. Pode-se dizer que nas águas residuais existem dois tipos distintos: hidrofílicos e/ou hidrofóbicos. Os coloides hidrofílicos, com soluções que abrangem moléculas de grande dimensão, como proteínas, que contêm na sua superfície grupos hidrofílicos que em contacto com a água formam uma camada através de forças ião-dipolo ou por ligações de hidrogénio. Esta camada atua como barreira no contacto entre partículas fornecendo elevada estabilidade aos coloides. Na Figura 2.1 mostra-se um exemplo de um coloide hidrofílico. (Chang, 2005) (Silva, 2010)

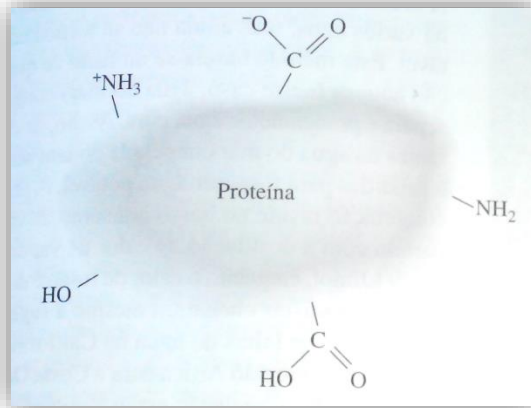


Figura 2.1 - Colóide hidrofílico. (Chang, 2005)

Por sua vez os colóides hidrofóbicos não possuem afinidade para o meio aquoso, ou seja, as interações entre as moléculas são reduzidas, devendo-se a sua estabilidade apenas à sua carga superficial. Por estas razões, estes colóides apresentam tendência para a destabilização por coagulação e são o grupo de colóides com maior interesse no tratamento de águas residuais. Estas partículas estão separadas umas das outras pelas forças de repulsão electrostáticas que são baseadas nos fundamentos da teoria da dupla camada. Na Figura 2.2 estão representados colóides hidrofóbicos. (Chang, 2005) (Silva, 2010)

O diagrama na Figura 2.2 representa a estabilização de colóides hidrofóbicos, através da adsorção de iões negativos à superfície e a repulsão entre as cargas do mesmo sinal que impede o agrupamento das partículas. (Chang, 2005)

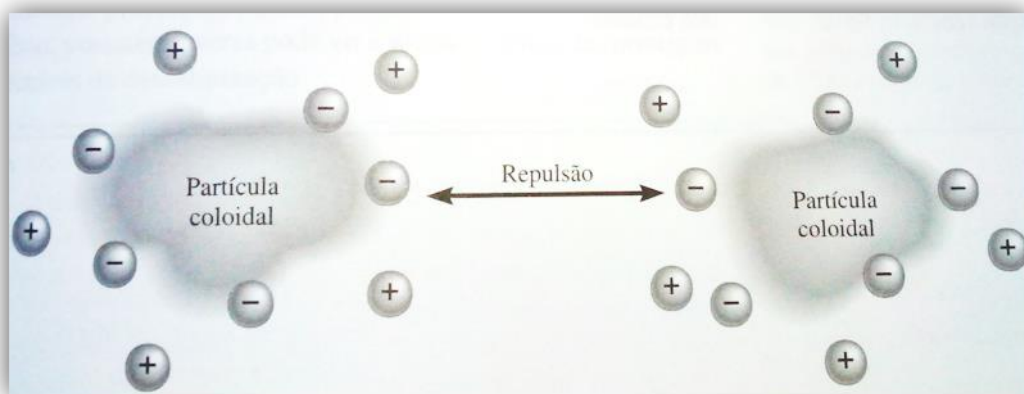


Figura 2.2 - Colóides hidrofóbicos (Chang, 2005)

2.2 Propriedades elétricas

Nas águas residuais as partículas coloidais apresentam cargas elétricas negativas na sua superfície que atraem elevada quantidade de iões de carga contrária presentes no meio envolvente. Devido à limitação da dimensão da superfície das partículas, apenas um número limitado de iões consegue ser adsorvidos, formando uma camada rígida. (Mallebrera, 2011) Esta camada rígida, camada de Stern, é formada com os iões estabilizadores e a superfície da partícula, definindo uma fronteira entre a partícula e o meio envolvente. (Silva, 2010) À volta desta camada forma-se uma outra camada de iões de carga elétrica de sinal oposto com fraca aderência designada por camada difusa, formando um gradiente electroestático entre a superfície da partícula e a solução. (Soares, 2009)

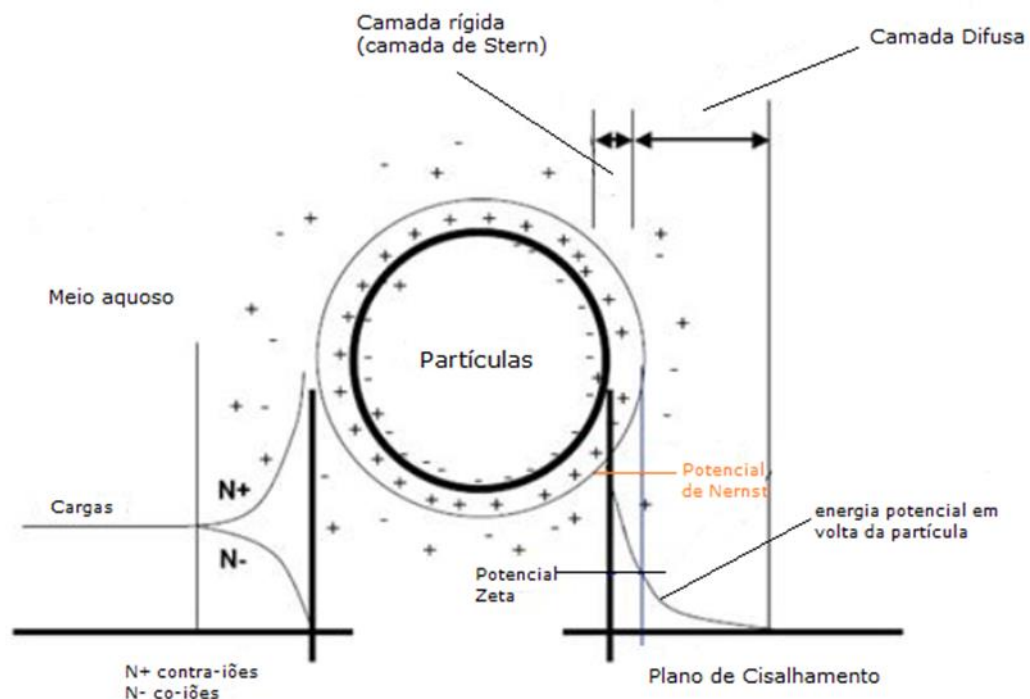


Figura 2.3 - Esquema da partícula com a camada rígida e a camada difusa. (Silva, 2010)

O potencial zeta referido na Figura 2.3 mede as cargas da partícula coloidal e a distância da influência da carga. Este potencial apenas se aplica às partículas hidrofóbicas. Define-se que a estabilidade destes coloides dependem do somatório de interação global entre as forças atrativas de London-Van der Waals e das forças repulsivas electroestáticas. (Silva, 2010) (Soares, 2009) (Mallebrera, 2011)

Esta relação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\xi = \frac{4\pi\delta q}{D} \quad (2.1)$$

Em que:

- ξ - Potencial zeta
- δ – Espessura da camada (distância entre a partícula coloidal e a segunda camada)
- q – Carga da partícula ou a diferença de carga entre a partícula e o seio da solução
- D – Constante dielétrica o meio

Com a diminuição do potencial zeta, as partículas coloidais vão se aproximando existindo uma maior probabilidade destas coliderem. Nestas condições, existe uma maior tendência de se aglomerarem, com a adição de coagulantes, que fornecem carga de sinal contrário ao das partículas proporcionando a destabilização da suspensão. É de salientar que a sobredosagem de coagulante provoca o efeito contrário, ou seja, dispersão das partículas estabilizando a suspensão. (Silva, 2010) (Mallebrera, 2011)

2.3 Coagulação

O processo de coagulação tem como objetivo provocar a destabilização das partículas coloidais através da redução das forças repulsivas entre estas (Perry, 1997). Esta destabilização pode ocorrer por compressão da camada difusa, adsorção e neutralização da carga, inclusão num precipitado e adsorção e formação de pontes entre partículas (Silva, 2010)

2.3.1 Compressão da camada difusa

Este mecanismo é caracterizado pela adição de cargas opostas às cargas das partículas coloidais no meio envolvente. A regra de Schulze-Hardy explica que quanto maior for a carga do ião positivo menor é a quantidade necessária do agente coagulante. (Mallebrera, 2011)

2.3.2 Adsorção e neutralização da carga

É baseado na adição de iões metálicos ou polímeros orgânicos como coagulantes. Os iões com cargas elétricas opostas às das partículas coloidais adsorvem e neutralizam as partículas. Quando é utilizada uma sobredosagem do coagulante verifica-se a reversão da carga superficial. (Silva, 2010)

2.3.3 Inclusão num precipitado

Consiste na adição de sais metálicos trivalentes como coagulantes, tais como Al^{3+} ou Fe^{3+} , formando precipitados de hidróxidos dos íons metálicos. Estes precipitados são volumosos, o que conseqüentemente aumenta a velocidade de decantação. (Silva, 2010)

2.3.4 Adsorção e formação de pontes entre partículas

Através da adição de polímeros orgânicos originando pontes entre partículas e conseqüentemente a adsorção entre as partículas em suspensão e as moléculas da cadeia polimérica. (Mallebrera, 2011) Os polímeros adicionados podem ter o mesmo sinal de carga das partículas ou podem ser neutros. (Silva, 2010)

2.4 Tipos de coagulantes

Como já referido anteriormente, para existir uma destabilização da suspensão é necessário a adição de agentes coagulantes.

A coagulação pode ocorrer através da adição de coagulantes inorgânicos, polímeros orgânicos sintéticos ou naturais.

2.4.1 Sais metálicos

2.4.1.1 Sulfato de alumínio

O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) é de fácil aquisição e baixo custo é o mais utilizado no tratamento de águas residuais. Este reagente é obtido em estado sólido e, por possuir aproximadamente 17% de óxidos de alumínio (Al_2O_3) solúveis em água, pode ser aplicado no estado sólido ou em soluções concentradas. (Silva, 2010)

Para valores de pH: (Metcalf, 1991)

- Inferior ou igual a 5,0, o alumínio predomina na água sobre a forma de $\text{Al}(\text{H}_2\text{O}_5)_6^{3+}$, $\text{Al}(\text{H}_2\text{O}_5)(\text{OH})^{2+}$ e $\text{Al}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$;
- Entre 5,0 e 6,5, predominam os compostos poliméricos, $\text{Al}_3(\text{OH})_{38}^{5+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_2\text{O}^{4+}$, entre outros;
- Superior a 6,5, forma-se um coloide de carga positiva, $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3$ (sólido) que tem a capacidade de promover a coagulação mútua dos colóides de carga negativa que estão presentes na solução.

Em geral, o sulfato de alumínio tem maior eficácia na gama de valores de pH entre 5,5 e 8,0.

2.4.1.2 Sulfato ferroso

O sulfato ferroso $\text{Fe}(\text{SO}_4)$ diferencia-se do sulfato de alumínio pela formação de flocos com maior dimensão e densidade, o que promove uma melhor decantação. (Curinha, 2008) Para pH ácidos este reagente é usado para remover a cor. Para pH alcalino apresenta melhores eficiências na remoção dos íons de ferro e manganésio. Pode-se afirmar que o sulfato ferroso apresenta melhor eficiência na gama de valores de pH entre 5,0 e 11,0. (Silva, 2010)

2.4.1.3 Cloreto Férrico

Este reagente é utilizado quando nas águas a tratar o teor em cor e em acidez é elevado, o que inviabiliza a aplicação do sulfato de alumínio. (Soares, 2009) Também é utilizado em águas que possuem gás sulfídrico funcionando como agente oxidante. Este coagulante é bastante usado por ser de fácil obtenção. (Silva, 2010)

2.4.2 Coagulantes orgânicos

Considera-se que os coagulantes orgânicos são polímeros orgânicos são macromoléculas solúveis em água, de natureza sintética ou natural, sendo uma alternativa aos coagulantes inorgânicos. Atuam como agentes coagulantes e/ou floculantes com a formação de pontes de ligação entre as partículas coloidais, as quais facilitam a decantação. (Silva, 2010)

O termo polieletrólito aplica-se a polímeros que possuem centros ativos ionizáveis na sua cadeia polimérica, podendo estes ser de carga positiva (polímeros catiónicos), carga negativa (polímeros aniônicos) ou não possuírem carga elétrica (polímeros neutros). (Vaz, 2009)

Os polímeros aniônicos ou neutros são aplicáveis juntamente com coagulantes metálicos para a promoção das ligações entre coloides, para desenvolver flocos mais resistentes e de maiores dimensões. Estes polímeros são assim considerados auxiliares de coagulação ou adjuvantes. (Silva, 2010)

2.4.3 Adjuvantes

O processo de coagulação/floculação por vezes apresenta algumas dificuldades como a formação lenta de flocos, flocos frágeis que se fragmentam no processo de condicionamento e formação de flocos de dimensão muito pequena que passam através dos filtros. Para ultrapassar esta barreira a adição de adjuvantes é uma solução, pois favorece este processo. A sua ação deste reagente permite aumentar a velocidade de reação devido à formação de um floco mais coeso, ou seja, volumoso e pesado. (Soares, 2009)

Os adjuvantes podem ser de natureza mineral ou orgânica, de origem natural ou sintética e a sua carga elétrica pode ser aniónica, catiónica ou neutra. Para o tratamento das águas residuais são destacados os polieletrólitos, sílica ativada, argilas, carbonato de cálcio e o carvão ativado em pó. (Soares, 2009)

2.5 Floculação

Após o processo de coagulação que tem por finalidade causar a destabilização da suspensão coloidal procede-se à etapa seguinte, a floculação, a qual consiste no desenvolvimento de flocos com tamanho adequado por agregação de micro-flocos desenvolvidos na floculação (Metcalf, 1991).

Neste processo existem fatores relevantes que afetam diretamente a eficiência, o tempo de retenção e a velocidade de escoamento da água. O tempo retenção depende da água em tratamento, da quantidade de coagulante utilizado, do tipo de floculador e dos resultados pretendidos. (Fasemore, 2004)

Para este processo que tem como objetivos agregar as partículas coloidais, existem dois tipos de mecanismos associados: (Metcalf, 1991) (Silva, 2010)

2.5.1 Floculação pericinética

Neste mecanismo a colisão entre as partículas resulta do movimento aleatório, movimento Browniano, em que a energia propulsora é a energia térmica do próprio fluido. Este tipo de floculação depende apenas do volume e da frequência de colisões por unidade de tempo.

2.5.2 Floculação ortocinética

A floculação ortocinética é caracterizada pela colisão ser favorecida pela turbulência provocada por forças mecânicas exteriores, gerando agitação na água. Através deste movimento, as partículas com dimensões superiores a 1µm colidem umas com as outras.

Assim, esta agitação provocada pelos mecanismos referidos, num determinado ponto o movimento é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade médio. O gradiente de velocidade médio é um parâmetro importante na avaliação do padrão de escoamento em unidades de coagulação e floculação, que pode ser determinado de acordo com a expressão: (Metcalf, 1991) (Silva, 2010)

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (2.2)$$

Em que:

- $\bar{G}$ – Gradiente de velocidade médio
- P – Potência dissipada na massa líquida, W
- V - volume de líquido na câmara de mistura, m³
- μ - Viscosidade dinâmica, Pa.s

2.6 Fatores que afetam a coagulação/floculação

Para que o processo coagulação/floculação tenha uma eficácia razoável é necessário ter em conta as diferentes variáveis que o afetam diretamente. Assim os fatores a considerar são:

2.6.1 Turvação

A natureza e a dimensão das partículas presentes em água residual são muito variáveis. As águas com maiores níveis de turvação, requerem maior dosagem de coagulante. Contudo esta dosagem não é linear em função do grau de turvação presente. É constatado que por vezes, as águas com maiores níveis de partículas necessitam de menos quantidade de coagulante devido à probabilidade de existir mais facilmente colisões entre estas. (Silva, 2010)

2.6.2 Temperatura da água residual

Com temperaturas baixas, as velocidades da maioria das reações são lentas e existe dificuldade na dissociação do coagulante, resultando numa menor eficiência e sendo

necessário maiores quantidades de coagulante. A este problema acresce a dificuldade de sedimentação devido ao aumento da densidade da água com a diminuição da temperatura. (Soares, 2009) (Alves, 2010)

2.6.3 pH

Possivelmente este fator será o mais importante e compromete diretamente a eficiência da coagulação/floculação. A coagulação deve ocorrer na gama ótima de valores de pH do agente coagulante adicionado no tratamento, caso contrário existe um gasto de reagente elevado e a eficiência final tem baixa qualidade. Assim, para ajudar neste ajuste podem ser usado os adjuvantes para manter o pH em zonas neutras ou alcalinas ou por outro lado adicionar ácidos para baixar o pH para valores adequados. (Soares, 2009) (Alves, 2010)

2.6.4 Alcalinidade

A alcalinidade, definida como a capacidade de neutralização de ácidos, torna-se um importante fator pois, os coagulantes adicionados atuam como um ácido em solução, consumido a alcalinidade presente na água que por sua vez reduz o valor de pH. Tendo em conta os desvios estequiométricos no equilíbrio químico da solução existe a necessidade de manter a alcalinidade para que se observe o equilíbrio no pH ótimo. (Soares, 2009) (Silva, 2010)

2.6.5 Grau e tempo de mistura

Nos processos de coagulação/floculação existem duas etapas de agitação: agitação rápida em simultâneo com a adição do coagulante para se promover a rápida suspensão homogênea; agitação lenta para favorecer a colisão entre partículas para produzir flocos de maior dimensão sem haver desagregação dos existentes. (Soares, 2009)

Em relação à agitação não se pretende que seja reduzida, pois dificultam a formação dos flocos nem que sejam muito elevada pois poderá desfazer o floco já formado, fragmentando em pequenas partículas. (Silva, 2010)

2.6.6 Natureza e dosagem do coagulante

A escolha do coagulante apropriado para o tratamento de águas residuais é de extrema importância pois vai afetar diretamente a redução do teor de partículas coloidais em suspensão e consequentemente a clarificação. (Soares, 2009)

As espécies químicas mais utilizadas são os coagulantes com alumínio, ferro e outros metais ou substâncias poliméricas.

Capítulo 3

Caracterização do processo fabril

O processo de fabrico de adesivos refere-se a um conjunto de operações de mistura, sendo o seu número dependente da complexidade da formulação. Os resíduos produzidos são variáveis com o tipo de produção em curso. O diagrama representado na Figura 3.1 esquematiza, de um modo genérico, as diferentes operações envolvidas. (PNPRI, 2000)

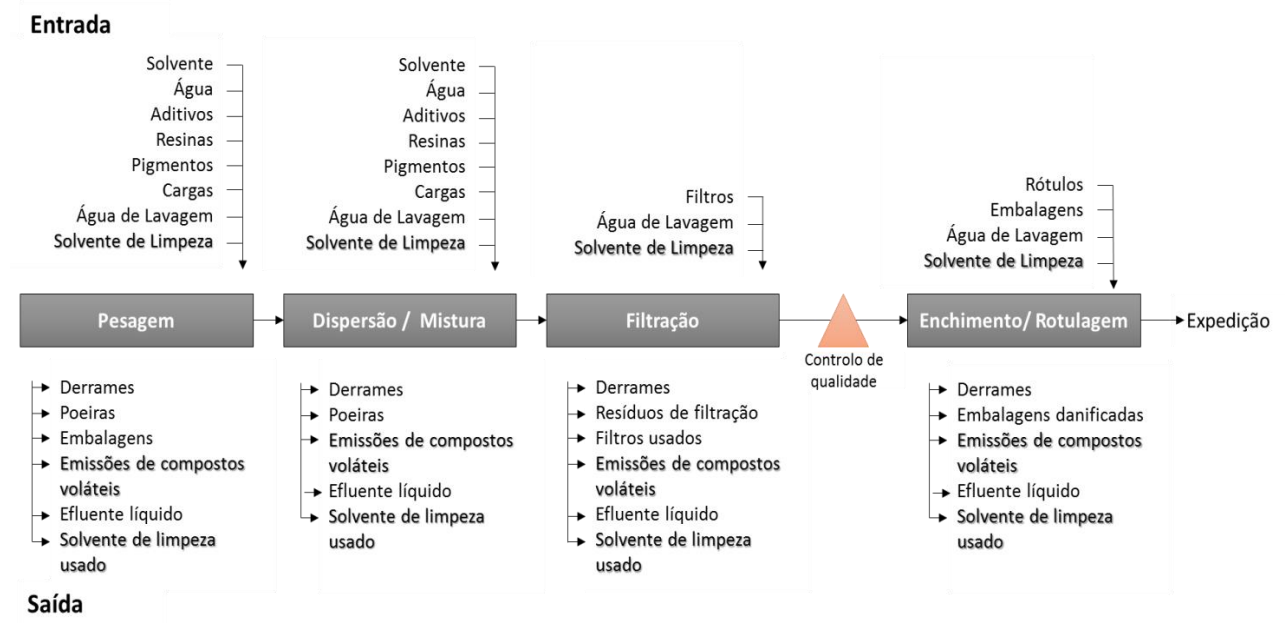


Figura 3.1 - Diagrama do processo de fabricação (PNPRI, 2000)

- **Pesagem:** refere-se ao controlo da quantidade de matérias-primas, normalmente constituídas por água ou solvente (consoante o produto requerido seja de base aquosa ou orgânica), cargas e aditivos diversos, resinas, pigmento, etc.
- **Dispersão/Mistura:** pode referir-se apenas a uma única operação ou a um conjunto de operações. Nas situações que envolvem a incorporação de matérias-primas em pó, a primeira operação é uma dispersão (mistura efetuada

em cubas equipadas com hélices dispersoras por agitação a alta/média velocidade) para uma primeira homogeneização e dispersão dos sólidos. Estas operações são efetuadas em cubas abertas ou fechadas nas formulações de base aquosa, e em cubas fechadas nas formulações de base solvente.

- Filtração: esta operação tem como principal objetivo retirar qualquer impureza que permaneça no produto e/ou, principalmente, reter as matérias-primas que não foram suficientemente dispersas e homogeneizadas. Os filtros mais utilizados são laváveis e reutilizáveis.
- Controlo de qualidade e acertos finais: esta operação é essencial para a garantia da qualidade do produto final, podendo ser levado a cabo apenas no final do processo e/ou intermedicamente no decurso da produção. Faz-se a partir de um processo de amostragem, por lote, e análise laboratorial. Tem por objetivo a verificação das características essenciais do produto, de forma a proceder-se aos acertos finais, sempre que necessário. É também nesta etapa que se detetam os erros de formulação que podem conduzir à rejeição de todo o lote. Nestes casos, o lote rejeitado poderá ser reintroduzido como matéria-prima no fabrico de formulações compatíveis.
- Enchimento / Rotulagem: esta é a operação final antes da expedição, não representando mais do que o enchimento da embalagem com o produto a comercializar. O rótulo é aplicado após a fase de enchimento.

3.1 Análise global dos resíduos do setor e da sua gestão

Dadas as características dos processos envolvidos, este setor apresenta uma fraca produção de resíduos decorrentes diretamente do processo de fabrico, normalmente, associados a derrames acidentais e às operações de filtração. Verifica-se que a maior produção de resíduos é resultantes das embalagens das matérias-primas e dos produtos de limpeza do equipamento. (PNPRI, 2000)

De acordo com a sua origem, os resíduos e os efluentes podem dividir-se como a seguir se refere. (PNPRI, 2000)

- a) Resíduos resultantes da limpeza de equipamento: são resíduos líquidos resultantes da limpeza de equipamento entre formulações diferentes, podendo subdividir-se em dois tipos distintos:
 - resíduos da limpeza de equipamento de produção de base solvente: normalmente constituído por solventes contaminados com características de perigosidade. São resíduos produzidos em quantidades controláveis que posteriormente são

enviados para empresas especializadas pela recuperação e reaproveitamento dos solventes presentes;

- efluentes da lavagem de equipamento de produção de base aquosa: são efluentes líquidos resultantes da lavagem do equipamento. São produzidos em grande quantidade, de característica não-perigosa e, normalmente, não são reutilizados, embora apresentem boas potencialidades de recuperação/recirculação. Têm como destino final o tratamento em ETAR.
- b) Resíduos de embalagem: são resíduos produzidos em quantidades significativas e resultam, na sua maioria, das embalagens das matérias-primas. Algumas são resultantes da retoma das embalagens devolvidas pelos consumidores. Assim, o papel, o cartão, o plástico e embalagens de metal (não contaminados) são enviados para empresas de reciclagem. As embalagens retomadas principalmente dos consumidores são lavadas por forma a proceder-se à sua reutilização.
- c) Lamas: resultam dos tratamentos na ETAR.

3.2 Circuito de águas de lavagem

Conforme descrito no ponto 3.1., as águas de lavagem dos equipamentos e das embalagens retomadas dos consumidores são a origem do efluente bruto em estudo. A Figura 3.2 mostra, de uma forma esquemática, o circuito das águas residuais e efluente bruto, até ao efluente tratado.

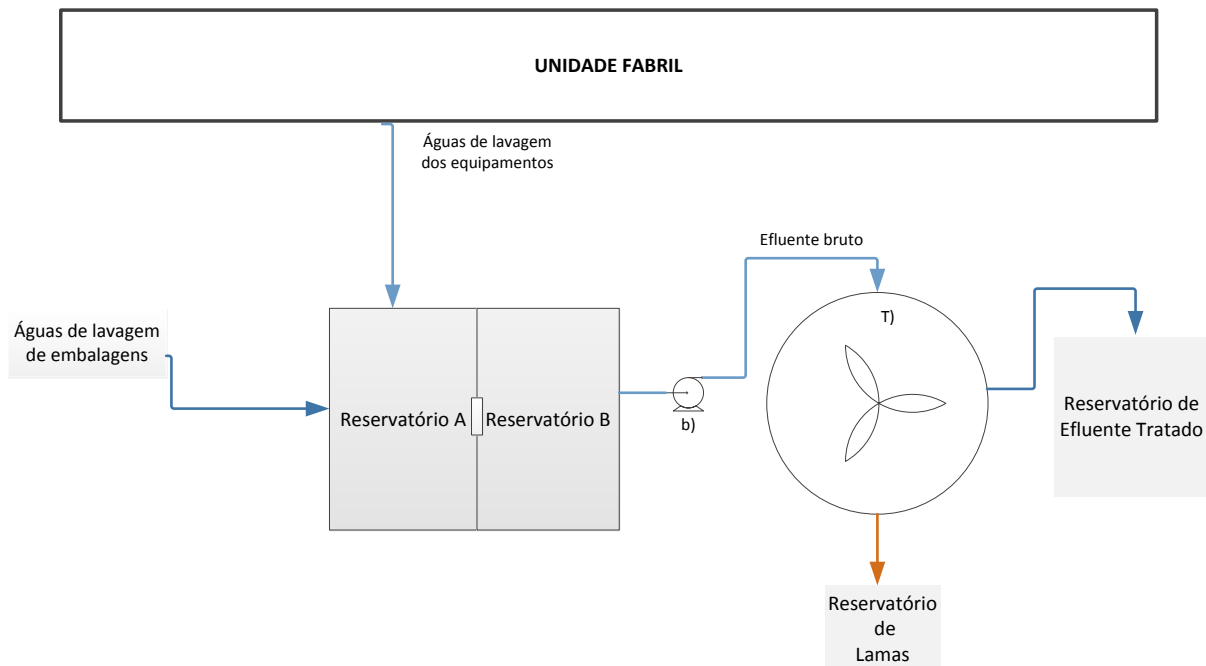


Figura 3.2 - Circuito do efluente na unidade fabril

Como se pode observar na Figura 3.2 as águas de lavagem dos equipamentos de produção e das embalagens são dirigidas para o reservatório A. Quando o reservatório A atinge um determinado volume, as águas vão desaguar ao reservatório B; por sua vez, quando o reservatório B atinge o volume máximo, são retirados 10 m³ para o tanque de tratamento (T) com a ajuda de uma bomba (b). No tanque de tratamento procede-se à clarificação das águas por coagulação-floculação, sendo o tempo de retenção nesse tanque de 1,5 dias. Após esse período, no qual ocorrerá a separação dos sólidos em suspensão, o efluente segue para o reservatório de efluente tratado para posterior descarga no coletor municipal. As lamas produzidas são encaminhadas para um reservatório de lamas onde são desidratadas, tendo como destino final a deposição em aterro.

Este tratamento é efetuado duas vezes por semana.

Capítulo 4

Descrição experimental

Na Figura 4.1 é apresentado um diagrama com as diferentes fases do trabalho experimental.

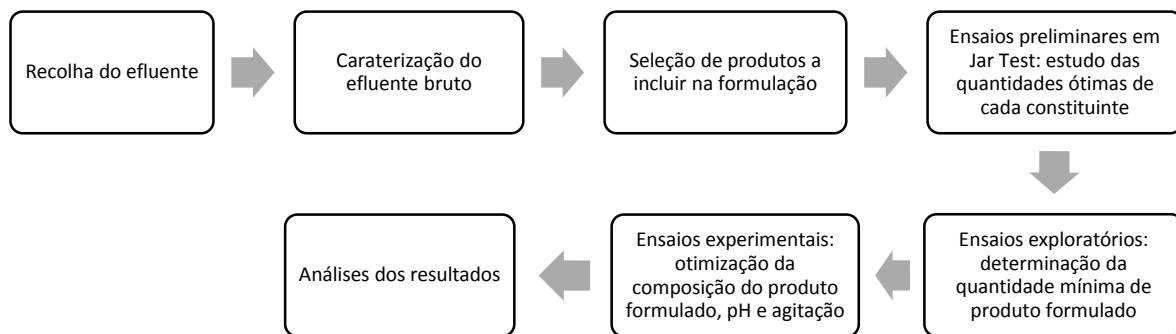


Figura 4.1 - Fases do estudo de tratamento físico-químico

4.1 Caracterização do efluente bruto

Para dar início ao estudo do tratamento físico-químico pelo processo de coagulação/floculação procedeu-se à caracterização do efluente bruto cuja recolha ocorreu nos dias 10/03/14, 01/04/14 e 03/06/14 sendo a quantidade recolhida de 50 L, 20 L e 20L, respetivamente. Os parâmetros analisados foram:

- pH;
- carência química de oxigénio (CQO);
- cor aparente;
- turvação;
- sólidos suspensos totais (SST);
- nitratos.

No anexo A descrevem-se os procedimentos executados para cada uma das análises.

As medições dos parâmetros descritos foram avaliados para diluições de 20 X, 50 X e 100 X do efluente bruto (anexo B).

4.2 Seleção de produtos comercialmente disponíveis a incluir na formulação

Normalmente, num tratamento de coagulação/floculação convencional o coagulante é adicionado ao efluente sob a forma de uma solução concentrada e, com a agitação do meio formam-se microflocos. Posteriormente pode ser adicionado um floculante em fase líquida para agregação dos microflocos, facilitando a deposição no fundo do tanque de tratamento (M. Filella, 1993).

Um dos objetivos deste trabalho é formular um produto único no estado sólido para promover a coagulação/floculação e proporcionar ao operador uma maior comodidade e facilidade no tratamento. Para esse efeito é necessário estudar diferentes formulações do produto e otimizar as condições operacionais de tratamento.

Da análise dos produtos comercialmente disponíveis mais vulgarmente utilizados no tratamento de águas e atendendo à razão custo/benefício, selecionaram-se os produtos que a seguir se referem.

O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) é usado como coagulante no tratamento de águas residuais. Ao produzir hidróxidos que envolvem e adsorvem as impurezas permite remover a turvação, enquanto os iões trivalentes de carga elétrica positiva têm um efeito de remoção de cor, atraindo e neutralizando as cargas elétricas dos colóides. Este coagulante será estudado devido à sua gama abrangente de pH (Packham, 1962).

A utilização de adjuvantes pode ter um efeito positivo sobre a eficiência do coagulante. Para avaliar esta possibilidade selecionou-se dois adjuvantes: hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (adjuvante H) e Montmorillonite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (adjuvante M). O adjuvante H será utilizado para dar volume aos microflocos formados no processo de coagulação, enquanto o adjuvante M irá aumentar a sua densidade, permitindo diminuir o tempo de decantação. (CALCIDRATA, 2011), (Agostinho, 2006). Relativamente ao floculante, selecionou-se uma poliacrilamida aniónica $(\text{C}_3\text{H}_5\text{NO})_n$, para agregar os flocos originados pelo processo de coagulação. A gama de valores de pH de funcionamento situa-se entre 6 e 14 (Derypol, 2007).

4.3 Ensaios preliminares em Jar Test: estudo das quantidades ótimas de cada constituinte

Após a seleção dos produtos procedeu-se à determinação, por via experimental, das quantidades ótimas de cada um desses produtos.

Nestes ensaios, à escala reduzida, reproduzem-se as condições segundo as quais é levado a cabo o tratamento físico-químico de águas residuais. A sua conveniência reside no facto de permitir testar métodos de tratamento passíveis de utilização prática, de um modo simples, expedito e pouco dispendioso. Estes ensaios estão diretamente relacionados com os mecanismos de coagulação e floculação e a sua aplicação pretende determinar os valores mais adequados para os parâmetros que influenciam diretamente aqueles fenómenos.

Os testes laboratoriais de coagulação/floculação têm o objetivo de otimizar dois componentes importantes: custo e desempenho. Em geral, a dose ótima será a mais baixa (que conduz a menor custo) produzindo a menor quantidade de flocos e originando um efluente com características que permitam a sua descarga no coletor municipal, no caso em estudo.

Todos os ensaios foram realizados a pH inicial igual a 6,2, sem correção e com agitação constante (60 rpm durante 10 min).

4.3.1 Estudo da gama de coagulante

Os ensaios para a determinação da quantidade de coagulante foram efetuados em Jar-Test e foram realizados na gama entre 1g e 50 g.

Para gobelés de 1000 mL adicionou-se 500 mL de efluente e efetuaram-se ensaios variando a quantidade de coagulante adicionado (1 g, 2,5 g, 5 g, 7,5 g, 10 g, 15 g, 30 g, 40 g e 50 g).

4.3.2 Estudo da gama de adjuvante H

Após a determinação da quantidade mínima e máxima de coagulante obtidas no ponto anterior, estudou-se a quantidade de adjuvante H.

Os ensaios decorreram em gobelés de 1000 mL com 500 mL de efluente e com a quantidade mínima de coagulante, variando a quantidade de adjuvante H adicionada (1 g, 2 g, 5 g, 7,5 g, 10 g e 15 g).

Este procedimento foi repetido para a quantidade máxima de coagulante.

Os ensaios permitiram determinar as quantidades mínima e máxima de adjuvante H para as duas quantidades de coagulante testadas (mínima e máxima).

4.3.3 Estudo da gama de adjuvante M

Após a realização dos ensaios anteriores procedeu-se à determinação da quantidade de adjuvante M para os valores mínimos e máximos do coagulante e adjuvante H, mantendo o mesmo procedimento. Adicionou-se 1 g, 3 g, 6 g e 9 g de adjuvante M.

4.3.4 Estudo da gama de flocculante

Segundo a literatura o flocculante é utilizado em solução com uma percentagem máxima de 0,5% (Derypol, 2007). Procedeu-se à avaliação da quantidade ótima de flocculante em estado sólido utilizando as quantidades de 0,005 g, 0,01 g, 0,02 g, 0,05 g, 0,08 g e 0,1 g para os valores mínimos e máximos do coagulante e adjuvante H e usando a quantidade ótima de adjuvante M.

4.4 Ensaios exploratórios: determinação da quantidade mínima de produto formulado

Dos ensaios preliminares retiraram-se informações sobre as condições operatórias e o seu efeito na clarificação do efluente.

O passo seguinte consistiu na realização de ensaios exploratórios de formulação do produto. Estes ensaios tiveram como base os resultados obtidos nos ensaios anteriores e pretendiam minimizar a dosagem de produto formulado a adicionar.

Mantendo as proporções de cada uma das substâncias a incluir na formulação do produto, que decorreram dos quatro melhores resultados dos ensaios preliminares, ensaiaram-se as quantidades 1 g, 2 g, 5 g, 8 g, 10 g e 15 g de produto, para 500 mL de efluente e com agitação constante (60 rpm durante 10 minutos), pH inicial igual a 6,2 e sem correção.

4.5 Ensaios experimentais: otimização da composição do produto formulado, pH e agitação

Após a definição da quantidade mínima aceitável de produto formulado a adicionar a 500 mL de efluente bruto, procedeu-se à otimização da composição do produto. Após cada ensaio, no efluente clarificado realizou-se a análise dos seguintes parâmetros:

- carência química do oxigénio (CQO);
- pH;
- turvação;
- clarificação;
- sólidos suspensos totais;
- índice volumétrico de lamas.

No anexo A descreve-se os procedimentos executados para cada uma das análises. Dos parâmetros estudados, os de maior interesse e cujo valor pode impedir a descarga no coletor municipal do efluente tratado são a CQO e a turvação.

O planeamento experimental foi definido para estudar o efeito da variação das razões, $\%(m/m)$, dos adjuvantes (M e H) em função do coagulante, para diferentes valores de pH e para as duas condições de agitação (A e B), sobre os parâmetros analisados.

Os ensaios experimentais foram realizados variando o pH inicial (6,2; 8,1 e 10) e para duas condições de agitação. Na primeira, (condição A) manteve-se uma agitação de 150 rpm durante 2 minutos, reduzindo-se para 60 rpm durante 15 minutos e, por fim, para 30 rpm durante 5 minutos. Na segunda condição (condição B) foi usada uma agitação constante de 90 rpm durante 22 minutos. Neste caso, o tempo de agitação foi o mesmo da condição A, mas com agitação constante para simular as condições existentes no tanque de tratamento da indústria de adesivos em estudo.

4.5.1 Primeiro grupo de ensaios (razão mássica adjuvante M/coagulante = 0,6)

O primeiro grupo de ensaios foi dividido em 3 subgrupos. Nestes subgrupos manteve-se constante e igual a 0,6 a razão mássica adjuvante M/coagulante. A quantidade de adjuvante H usada foi de 0,4, 1,2 e 2 vezes a quantidade de coagulante, com um incremento de 0,8 entre os subgrupos. A Tabela 4.1 mostra a composição $\%(m/m)$ do produto usado em cada subgrupo de ensaios. As razões mássicas dos adjuvantes relativamente ao coagulante são apresentadas no anexo C.

Tabela 4.1 – Formulação do produto do primeiro grupo de ensaios

Ensaio	% (m/m)				Razão do	
					Adjuvante/coagulante	
1º grupo	Coagulante	Adjuvante H	Adjuvante M	Floculante	Adjuvante H	Adjuvante M
1.1	49,95	19,98	29,97	0,1	0,4	0,6
1.2	35,69	42,83	21,41	0,07	1,2	0,6
1.3	27,76	55,52	16,66	0,06	2	0,6

Em cada subgrupo foi realizado um ensaio para cada valor de pH inicial e para cada condição de agitação, perfazendo um total de 18 ensaios com réplicas.

4.5.2 Segundo grupo de ensaios (razão mássica adjuvante M/coagulante = 0,2)

O segundo grupo de ensaios foi dividido em 3 subgrupos. Nestes subgrupos manteve-se constante e igual a 0,2 a razão mássica adjuvante M/coagulante. A quantidade de adjuvante H usada foi 0,1, 0,4 e 0,6 vezes a quantidade de coagulante, com um incremento de 0,3 e 0,2 entre os subgrupos. A Tabela 4.2 mostra a composição %(m/m) do produto usado em cada subgrupo de ensaios. As razões mássicas dos adjuvantes relativamente ao coagulante são apresentadas no anexo C.

Tabela 4.2 – Formulação do produto para o segundo grupo de ensaios

<i>Ensaio</i>	<i>% (m/m)</i>				<i>Razão do Adjuvante/coagulante</i>	
<i>2º grupo</i>	Coagulante	Adjuvante H	Adjuvante M	Floculante	Adjuvante H	Adjuvante M
2.1	77,74	8,88	13,33	0,04	0,1	0,2
2.2	66,01	22,63	11,32	0,04	0,4	0,2
2.3	57,36	32,78	9,83	0,03	0,6	0,2

Em cada subgrupo foi realizado um ensaio para cada valor de pH inicial e para cada condição de agitação, perfazendo um total de 18 ensaios com réplicas.

4.5.3 Terceiro grupo de ensaios (razão mássica adjuvante M/coagulante = 0,1)

Tal como anteriormente, o grupo de ensaios foi dividido em 3 subgrupos, mantendo-se constante e igual a 0,1 a razão mássica adjuvante M/coagulante. A quantidade de adjuvante H usada foi 0,1, 0,2 e 0,3 vezes a quantidade de coagulante, com um incremento de 0,1 entre os subgrupos. A Tabela 4.3 mostra a composição %(m/m) do produto usado em cada subgrupo de ensaios. As razões mássicas dos adjuvantes relativamente ao coagulante são apresentadas no anexo C.

Tabela 4.3 - Formulação do produto para o terceiro grupo de ensaios

<i>Ensaio</i>	<i>% (m/m)</i>				<i>Razão do Adjuvante/coagulante</i>	
<i>3º grupo</i>	Coagulante	Adjuvante H	Adjuvante M	Floculante	Adjuvante H	Adjuvante M
3.1	85,69	5,71	8,57	0,03	0,1	0,1
3.2	76,90	15,3	7,69	0,03	0,2	0,1
3.3	69,75	23,23	6,98	0,02	0,3	0,1

Em cada subgrupo foi realizado um ensaio para cada valor de pH inicial e para cada condição de agitação, perfazendo um total de 18 ensaios com réplicas.

Capítulo 5

Resultados e discussão

5.1 Características médias do efluente bruto

Na Tabela 5.1, apresenta-se os valores do pH, da carência química de oxigênio (CQO), a cor aparente, a turvação, os sólidos suspensos totais (SST) e os nitratos do efluente bruto. A partir dos resultados obtidos verifica-se que para todos os parâmetros analisados, os valores são elevados, com exceção do pH que cumpre o estipulado na legislação (Ambiente, 1998).

Tabela 5.1 – Caracterização do efluente bruto

pH	CQO (mg O ₂ /L)	Cor aparente (PtCo)	Turvação (FTU)	SST (mg/L)	Nitratos (mg NO ₃ ⁻ /L)
6,3	22060	> 55000	22570	23170	2040

O efluente bruto é constituído em cerca de 80% por águas de lavagem dos equipamentos de produção e em 20% por águas de lavagem de embalagens.

In situ, este efluente tem um cheiro muito característico (forte), cor acinzentada e é de tratamento difícil. Há adesivos com pH aproximadamente 4 e outros que vão ao extremo de 14. As águas de lavagem destes adesivos seguem uma linha de águas desaguando nos reservatórios conforme se mostra na Figura 3.2. Na Figura 5.1 apresenta-se a cor do efluente bruto.

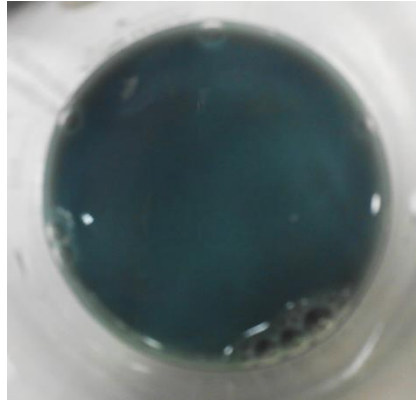


Figura 5.1 – Cor do efluente bruto.

5.2 Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares tiveram como objetivo determinar as quantidades mínimas e máxima de cada um dos constituintes da formulação. No que se refere ao estudo da massa de coagulante, observou-se que quantidades inferiores a 5 g não formavam flocos detetáveis visualmente e que para quantidades acima de 30 g não se observava uma melhoria nas características dos flocos formados. Também se verificou que para quantidades de coagulante superior a 30 g o pH apresenta valores inferiores a 3, o que, segundo a literatura, não é favorável para a reação. (M. Filella, 1993)

Relativamente ao adjuvante H observou-se que para quantidades inferiores a 2 g não existia qualquer alteração visual, enquanto quantidades superiores a 10 g provocavam uma cor amarelada ao efluente, provavelmente devida à precipitação de $Al(H_2O)_3(OH)_3$. Esta constatação verificou-se para os dois níveis de coagulantes estudados (5 e 30 g).

Em relação ao adjuvante M observou-se que 3 g foi o valor ideal para a gama estipulada para os constituintes avaliados anteriormente. Este adjuvante dá aos flocos densidade facilitando a sedimentação. Para quantidades inferiores a 3 g, visualmente não foi observada qualquer alteração do floco, apenas maior velocidade de sedimentação. Verificou-se que o adjuvante M não se dissolve na totalidade para quantidades superiores a 3 g e, ao retirar as lamas produzidas, identifica-se a sua presença pela cor acastanhada.

Por fim, relativamente ao floculante verificou-se que para quantidades inferiores a 0,01 g não existia agregação suficiente dos flocos e para quantidades superiores observou-se um aumento na viscosidade do sobrenadante.

Os ensaios preliminares permitiram definir valores ou gamas de massa para cada uma das substâncias. Porém, as quantidades determinadas são elevadas, traduzindo-se num custo por tratamento excessivo. Se o tratamento fosse efetuado usando na formulação as quantidades mínimas determinadas nos ensaios preliminares, por exemplo, para 10 m³ de

efluente bruto seriam necessários 100 kg de coagulante, 40 kg de adjuvante H, 60 kg de adjuvante M e 0,2 kg de floculante, o que se traduziria num custo de 55,024 € (Anexo D).

É também de realçar que nos ensaios preliminares, realizados com a adição sucessiva de cada componente, observou-se a formação de um elevado volume de lamas (Figura 5.2).



Figura 5.2 – Exemplo de lamas geradas num ensaio preliminar.

O passo seguinte consistiu em desenvolver ensaios exploratórios de formulação do produto.

5.3 Ensaio exploratórios

Para minimizar a quantidade das substâncias a utilizar, formulou-se uma série de produtos que consistiu na mistura das substâncias estudadas com proporções variáveis, com base nas quantidades dos quatro melhores ensaios preliminares definidos (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Quantidade das substâncias utilizadas nos quatro melhores ensaios preliminares

Ensaio	Coagulante (g)	Adjuvante H (g)	Adjuvante M (g)	Floculante (g)	Total (g)
1	5	2	3	0,01	10,01
2	5	10	3	0,01	18,01
3	30	2	3	0,01	35,01
4	30	10	3	0,01	43,01

Com as formulações geradas foram efetuados ensaios conforme referido no ponto 4.5. Verificou-se que nas quatro formulações, para quantidades inferiores a 5 g, existia formação e agregação de flocos, mas a clarificação era quase insignificante. Para quantidades iguais ou superiores a 5 g observou-se clarificação que melhorava apenas ligeiramente com o aumento da quantidade de produto. Assim, com base na clarificação apresentada na Figura 5.3, definiu-se que a quantidade mínima para prosseguir os ensaios experimentais seria de 5 g de produto formulado por 500 mL de efluente bruto.

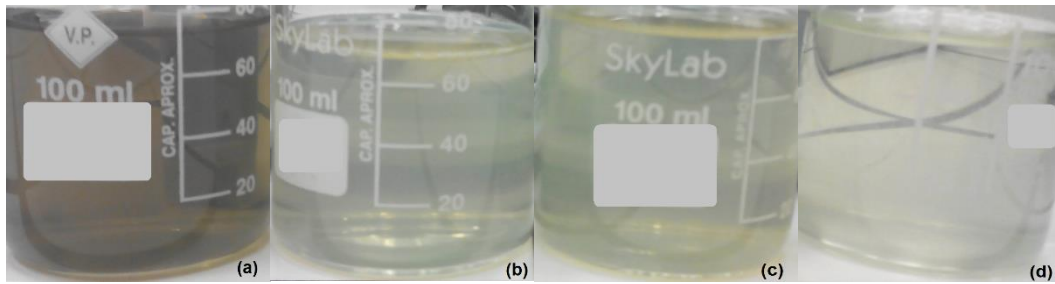


Figura 5.3 – Resultados de clarificação dos ensaios 1 (a), ensaio 2 (b), ensaio 3 (c), ensaio 4 (d), usando 5 g de produto formulado

5.4 Resultados dos ensaios experimentais

Conforme referido no capítulo 4, foram analisados os seguintes parâmetros:

- carência química de oxigénio (CQO);
- pH final;
- turvação;
- clarificação;
- sólidos suspensos totais (SST);
- índice volumétrico de lamas (IVL).

Os resultados dos três grupos de ensaios foram agrupados e apresentados em figuras (Figura 5.4 à Figura 5.13) de forma a proceder à avaliação do efeito de cada condição testada (composição, pH inicial e agitação) sobre os parâmetros analisados. A identificação do ensaio em cada figura encontra-se associada às coordenadas razão mássica adjuvante M/coagulante e razão mássica adjuvante H/coagulante.

5.4.1 Efeito sobre a CQO

O resultado pretendido para a CQO é o menor possível, com um valor inferior a 1000 mg O₂/L, valor limite de emissão para a descarga do efluente no coletor municipal.

Na Figura 5.4 e Figura 5.5 mostram-se os valores de CQO obtidos após o tratamento para as várias composições percentuais usadas na formulação do produto, para a condição de agitação A e B, respetivamente. Como complemento, no anexo E apresentam-se tabelas com os resultados obtidos e com as percentagens de remoção obtidas para cada ensaio.

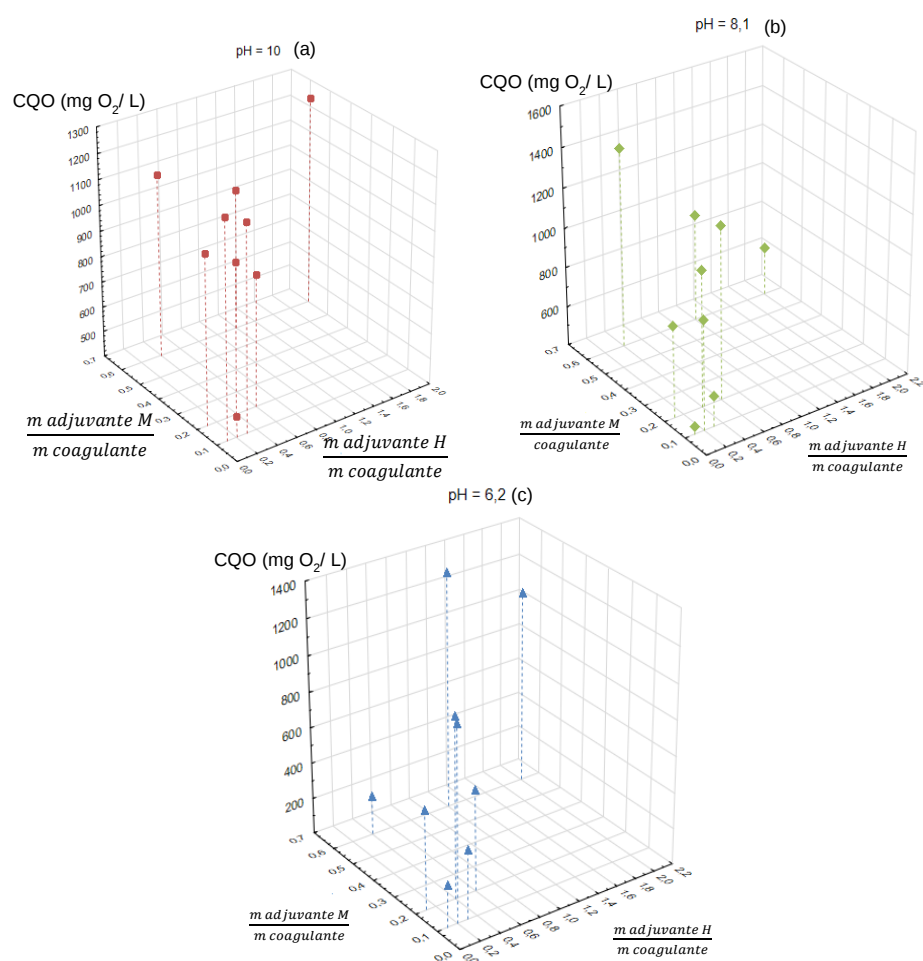


Figura 5.4 – Resultados de CQO para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2$ min; 60 rpm $\Delta t = 15$ min; 30 rpm $\Delta t = 5$ min) para pH = 10 (a), pH = 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

Para pH = 10, Figura 5.4 (a), observa-se que para cinco dos nove ensaios estudados obtêm-se valores de CQO superiores a 1000 mg O₂/L. O valor mínimo de CQO observou-se para a condição relativa às coordenadas (0,2;0,1) de razão mássica de adjuvante H/coagulante e de razão mássica de adjuvante M/coagulante, correspondente a uma remoção de 97,82%. Seguidamente, para pH = 8,1, Figura 5.4 (b), verifica-se que três dos nove ensaios apresentam valores de CQO superiores a 1000 mg O₂/L. O valor mínimo de CQO observou-se para a condição relativa às coordenadas (0,1;0,1) de razão mássica de adjuvante H/coagulante e de razão mássica de adjuvante M/coagulante, correspondente a uma remoção de 98,01%. Por fim na Figura 5.4 (c) para pH = 6,2 verifica-se que três dos nove ensaios apresentam valores de CQO superiores a 1000 mg O₂/L. O valor mínimo de CQO é obtido para a condição relativa às coordenadas (0,4;0,6) de razão mássica de adjuvante H/coagulante e de razão mássica de adjuvante M/coagulante, apresentando uma remoção de 99,00%.

A percentagem de remoção de CQO para a condição de agitação A aumenta com a diminuição do valor do pH e com o aumento da quantidade do adjuvante M.

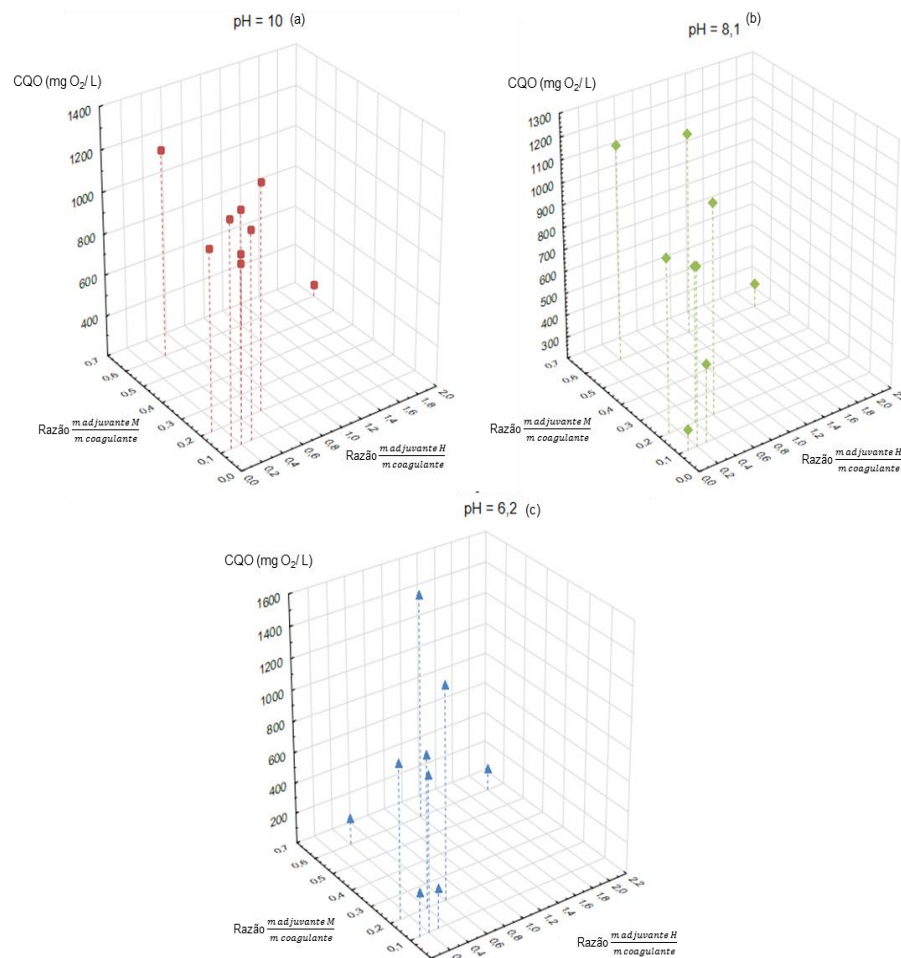


Figura 5.5 – Resultados de CQO para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22$ min) para pH = 10 (a), pH = 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

Na Figura 5.5 (a) observa-se que para pH = 10, seis dos nove ensaios estudados apresentam valores de CQO superiores a 1000 mg O₂/L, observando-se um ótimo para a condição relativa às coordenadas (2;0,6) de razão mássica de adjuvante H/coagulante e de razão mássica de adjuvante M/coagulante, correspondente a uma remoção de 98,80%. Seguidamente, para pH 8,1 Figura 5.5 (b), verifica-se que três dos nove ensaios apresentam valores de CQO superiores a 1000 mg O₂/L. O valor mínimo de CQO observou-se para a condição relativa às coordenadas (0,1;0,1) de razão mássica de adjuvante H/coagulante e de razão mássica de adjuvante M/coagulante, correspondente a uma remoção de 98,67%. Por fim para pH 6,2, Figura 5.5 (c), é possível observar que dois dos nove ensaios apresentam valores de CQO superiores a 1000 mg O₂/L, obtendo-se um valor mínimo de CQO para a

condição relativa às coordenadas (2;0,6) de razão mássica de adjuvante H/coagulante e de razão mássica de adjuvante M/coagulante, correspondente a uma remoção de 99,33%.

Para as condições de agitação A e B, o melhor resultado é referente ao pH = 6,2 para a razão mássica de adjuvante M/coagulante 0,6 apenas verificando-se que para a condição de agitação B é necessário uma maior quantidade de adjuvante H.

Salienta-se que em todos os ensaios as percentagens de remoção de CQO são superiores a 90% atendendo a que o efluente bruto apresenta um valor de CQO de 22060 mg O₂/L. O processo de coagulação/floculação, com base exclusivamente na adição do produto formulado, permitiu obter valores de CQO inferiores a 1500 mg O₂/L em todos os ensaios.

5.4.2 Efeito sobre o pH final

A influência do pH sobre os ecossistemas aquáticos naturais dá-se diretamente devido aos efeitos provocado na fisiologia das diversas espécies. Também o efeito indireto é muito importante, podendo em determinadas condições de pH, contribuir para a precipitação dos elementos químicos tóxicos como metais pesados. Por outro lado, também pode causar efeitos nas solubilidades de nutrientes (Metcalf, 1991). Desta forma, a gama estabelecida na legislação, de 6 a 9, decreto-lei n.º 236/98 coincide com os valores aceitáveis para a descarga num coletor municipal.

Na Figura 5.6 e Figura 5.7 mostram-se, para as condições de agitação A e B, respetivamente, os valores de pH obtidos após o tratamento usando as várias composições percentuais do produto formulado. No anexo F apresentam-se tabelas com os resultados obtidos em cada ensaio.

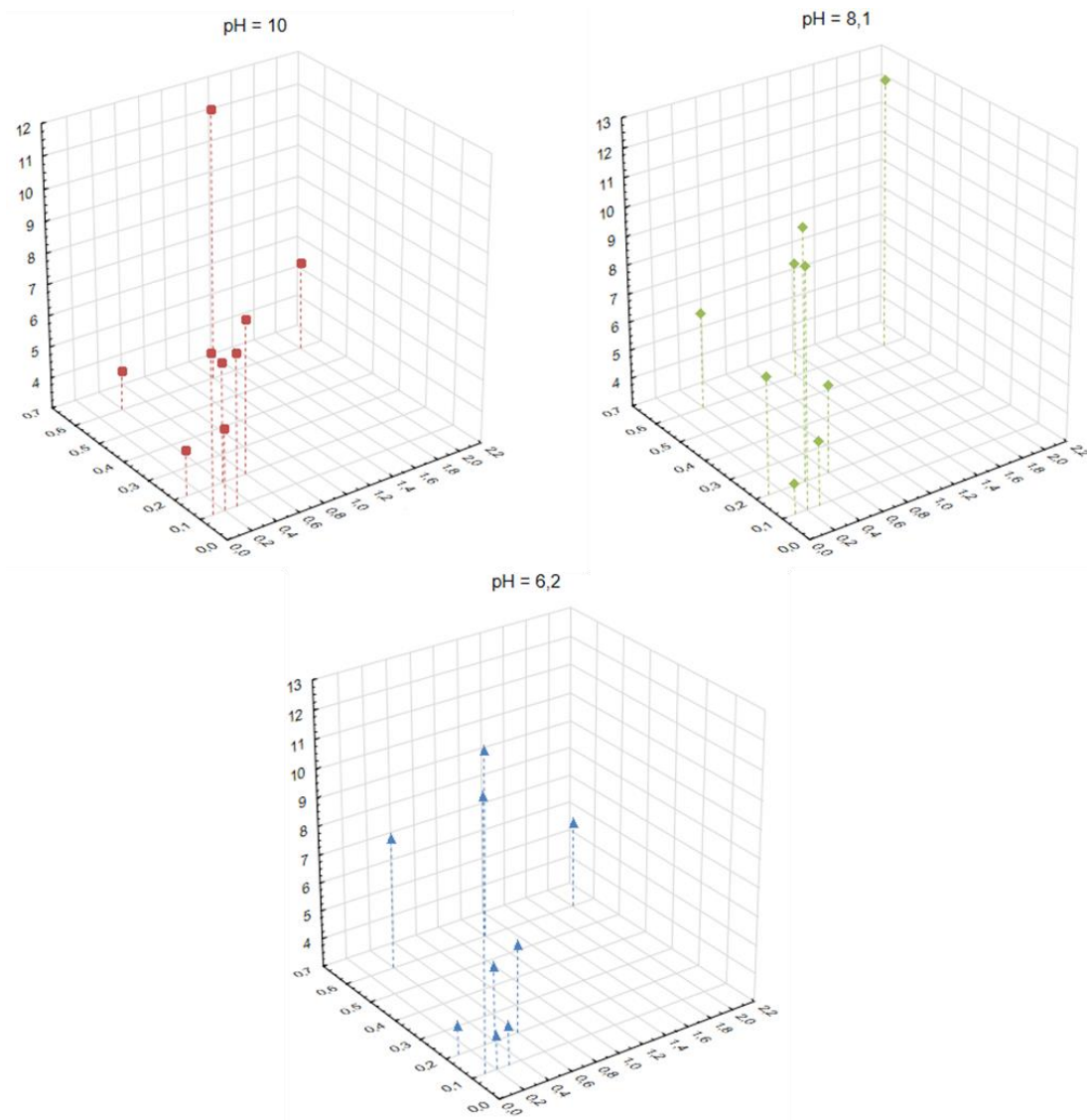


Figura 5.6 – Resultados de pH final para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2$ min; 60rpm $\Delta t = 15$ min; 30rpm $\Delta t = 5$ min) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

Para pH=10, Figura 5.6 (a), quatro dos ensaios apresentam pH final inferior a 6 e um superior a 9. Para as razões mássicas de adjuvante M/coagulante de 0,1 e 0,2, dois dos três ensaios estão dentro do intervalo de valores aceitáveis (6 a 9). No entanto os 3 ensaios para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,6 encontram-se fora desse intervalo.

A pH 8,1, Figura 5.6 (b), dois ensaios apresentam valores de pH final inferiores a 6 e três encontram-se acima de 9. Para as razões mássicas de adjuvante M/coagulante de 0,2 e de 0,6, dois dos três ensaios estão dentro do intervalo de valores aceitáveis. Contudo os três ensaios correspondentes à razão mássica de 0,1 encontram-se fora da gama aceitável.

Por fim a pH = 6,2, Figura 5.6 (c), para as razões mássicas de adjuvante M/coagulante de 0,2 e 0,6 existem 1 e 2 ensaios, respetivamente, que estão dentro do intervalo de valores aceitáveis, não havendo nenhum ensaio nessas condições, para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1.

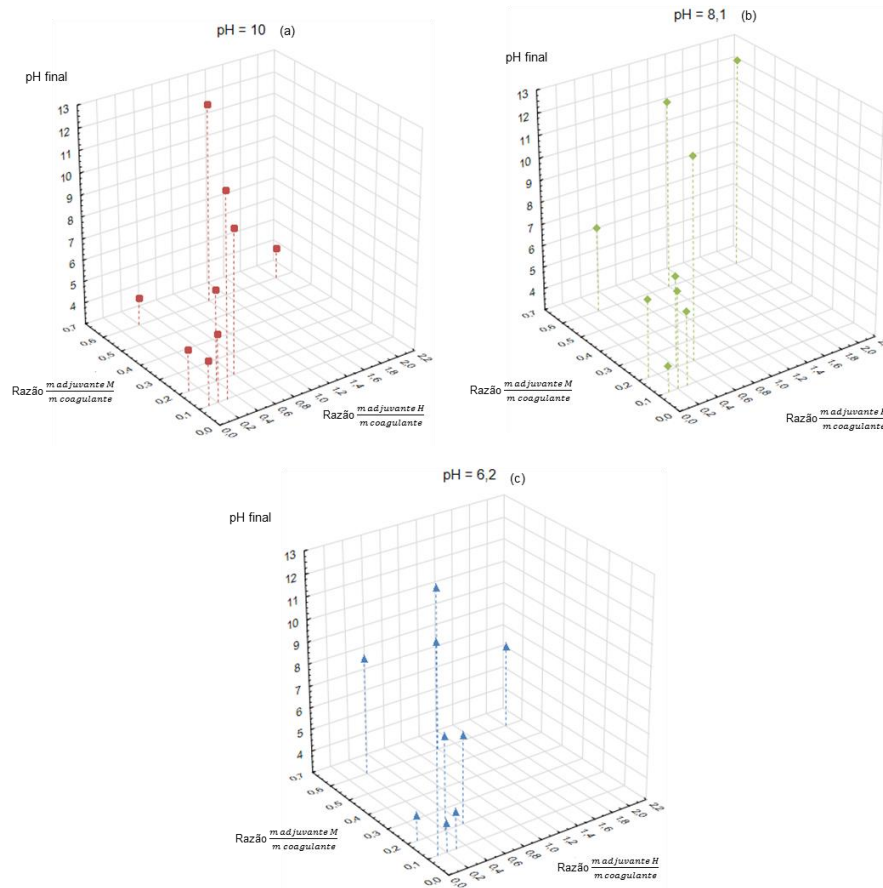


Figura 5.7 – Resultados de pH final para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22$ min) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

Na Figura 5.7 (a), para o pH=10, sete dos nove ensaios apresentam pH final fora do intervalo de valores aceitáveis. Os dois ensaios que apresentam valores de pH final aceitáveis correspondem às condições relativas às coordenadas (0,1;0,2) e (0,2;0,4) de razão mássica de adjuvante H/coagulante e de razão mássica de adjuvante M/coagulante, respetivamente.

Para pH = 8,1, Figura 5.7 (b), quatro dos nove ensaios não se encontram dentro dos critérios de aceitação. Para as razões mássicas de adjuvante M/coagulante de 0,1 e 0,2 obtiveram-se 2 ensaios em cada condição que apresentam valores de pH final aceitáveis

enquanto para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,6 apenas 1 ensaio se encontra dentro da gama aceitável.

Por fim, para pH = 6,2, Figura 5.7 (c), não se obteve nenhum ensaio com pH final dentro dos valores aceitáveis quando se usa a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1. Para a razão mássica de 0,2 obteve-se 2 ensaios dentro do intervalo de valores aceitáveis e para a razão mássica de 0,6 obteve-se 1 ensaio nessas condições.

A maioria dos ensaios efetuados não permitem obter valores de pH final dentro do intervalo aceitável. Uma solução para este incumprimento seria a correção do pH após o tratamento.

5.4.3 Efeito sobre a turvação e clarificação

A turvação da água deve-se à presença de partículas coloidais e/ou em suspensão, finamente divididas, tais como argilas, limo, areias, matérias orgânicas e inorgânicas, plâncton e outros organismos microscópicos, que obstruem a transmissão da luz através da água. Como os microrganismos (bactérias, vírus e protozoários) se encontram, geralmente, aderidos a estas partículas, a remoção da turvação pode reduzir significativamente a contaminação microbiológica da água (Ambiente, 2007). A turvação revela-se um indicador muito útil na monitorização operacional do tratamento da água.

Para o efluente bruto o valor da turvação é de 22570 FTU.

Na Figura 5.8 e Figura 5.9 mostram-se, para as condições de agitação A e B, respetivamente, os valores de turvação obtidos após o tratamento usando as várias composições percentuais do produto formulado. No anexo G apresentam-se tabelas com os resultados obtidos em cada ensaio.

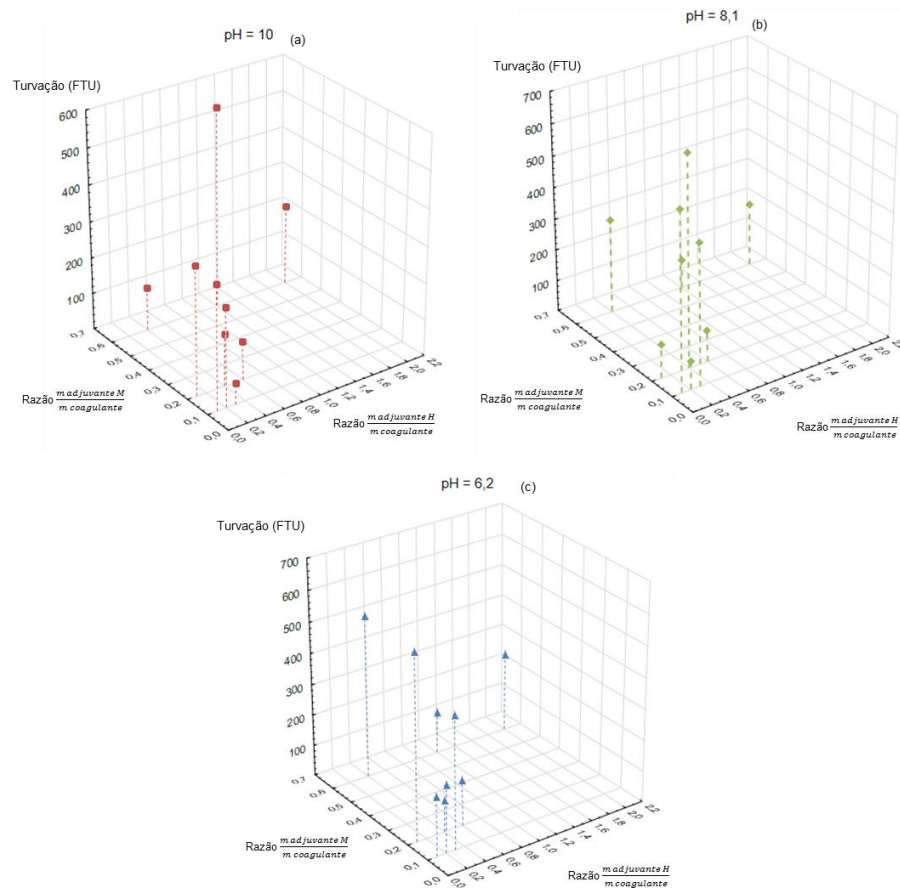


Figura 5.8 – Resultados de turvação para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2$ min; 60 rpm $\Delta t = 15$ min; 30 rpm $\Delta t = 5$ min) para pH = 10 (a), pH = 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

O objetivo do tratamento é obter o menor valor possível para a turvação.

Para pH = 10, Figura 5.8 (a), o valor mínimo de turvação observou-se para a condição relativa à razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,3, com uma remoção de 99,74%.

A pH = 8,1 o melhor valor obtido corresponde à razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1 e à razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,2, com uma remoção de 99,60% (Figura 5.8 (b)).

Por fim, para o pH = 6,2, Figura 5.8 (c), o ótimo corresponde à razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,2 e à razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,2, com uma percentagem de remoção de 99,55%.

Os melhores valores obtidos, para cada um dos valores de pH inicial, apresentam um valor inferior a 105 FTU.

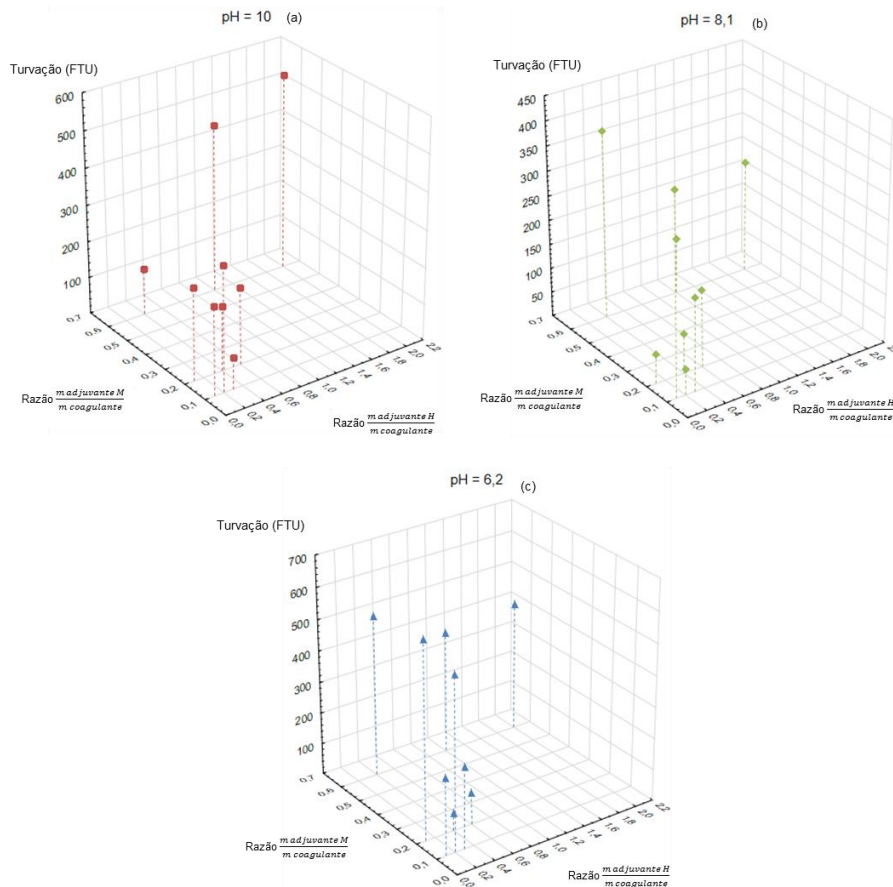


Figura 5.9 – Resultados de turvação para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22$ min) para pH = 10 (a), pH = 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

Observando a Figura 5.9 (a) o melhor valor obtido corresponde à razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1 e à razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,3, obtendo-se uma percentagem de remoção de 99,62%.

Para o pH = 8,1, Figura 5.9 (b), o ótimo observou-se para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,2, a que corresponde uma percentagem de remoção de 99,77%.

Por último, para pH = 6,2, o melhor valor foi obtido para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,2 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,4, com uma remoção de 99,75% (Figura 5.9 (c)).

Para esta agitação, B, os melhores valores observados são inferiores a 90 FTU.

A partir deste parâmetro foi estudada a clarificação do efluente tratado. Assim, criou-se uma escala de clarificação, a variar entre 0 e 5, que abrange valores de turvação até 450 FTU, como se pode ver na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Tabela de níveis de clarificação

Classificação					
0	1	2	3	4	5
					
Turvação (FTU)					
>450	450 -351	350- 301	300 – 201	200 -101	<100

Com esta análise, a classificação 0 significa que a turvação do efluente tratado não é aceitável, tendo que ser submetido a um novo tratamento. As classificações 1 e 2 também não são aceitáveis; o efluente, devido à sua tonalidade, não pode ser descarregado no coletor municipal. Para estes casos a possibilidade seria aumentar a quantidade de produto usado, contudo o que se pretende é obter o ótimo apenas com 5g de produto/500 mL de efluente. Relativamente à classificação entre 3 e 5 seria aceitável para o efluente tratado. No entanto, a classificação 5 é a desejável. No anexo G encontram-se os valores de classificação de clarificação para cada ensaio efetuado.

Com base na Figura 5.8 (a) e tabela 5.3, verifica-se que 66,7 % dos ensaios cumpre o objetivo de se situar na classificação de 3 a 5 com 11,1% na classificação 5.

Dos ensaios apresentados na Figura 5.9 (a), 55,6% obtiveram classificação igual ou superior a 3 e, igualmente 11,1% a classificação 5.

Para pH = 8,1 e agitação A (Figura 5.8 (b)) obtiveram-se 66,7% dos ensaios com classificação igual ou superior a 3, dos quais 22,2% corresponde à classificação 5. Para o mesmo pH e agitação B (Figura 5.9 (b)), 77,8% dos ensaios correspondem a uma classificação igual ou superior a 3, dos quais 33,3% corresponde à classificação 5.

Por fim, para pH = 6,2 e agitação A, (Figura 5.8 (c), verificou-se que 66,7% dos ensaios obteve a classificação 3 e 4. Para o mesmo pH e agitação B (Figura 5.9 (c), verificou-se que 66,7% dos ensaios obteve a classificação igual ou superior a 3, e 22,2% a classificação 5.

Conclui-se que para qualquer pH e agitação, a percentagem de clarificação será sempre superior a 55%.

5.4.4 Efeito sobre os SST

Por definição os sólidos suspensos são todos os sólidos sedimentáveis e flutuantes presentes no efluente. A determinação dos níveis de concentração das diversas frações de sólidos é utilizada nos estudos de controle de poluição das águas, caracterização de efluentes domésticos e industriais e no controle de sistemas de tratamento destes efluentes (Correia, 2012).

Quando presentes excessivamente nas águas podem causar danos à vida aquática, com a diminuição da incidência de luz, aumento da sedimentação no leito dos rios destruindo organismos que fornecem alimentos, ou também danificar os leitos de desova de peixes. Os sólidos podem reter bactérias e resíduos orgânicos no fundo dos rios, promovendo a decomposição anaeróbia (Guyer, 2011).

Para a descarga no coletor municipal o valor terá que ser o mais baixo possível, não podendo ultrapassar os 500 mg/L. O valor de SST no efluente bruto é de 23170 mg/L.

Na Figura 5.10 e Figura 5.11 mostram-se, para as condições de agitação A e B, respectivamente, os valores de SST obtidos após o tratamento usando as várias composições percentuais do produto formulado. No anexo H apresentam-se tabelas com os resultados obtidos em cada ensaio.

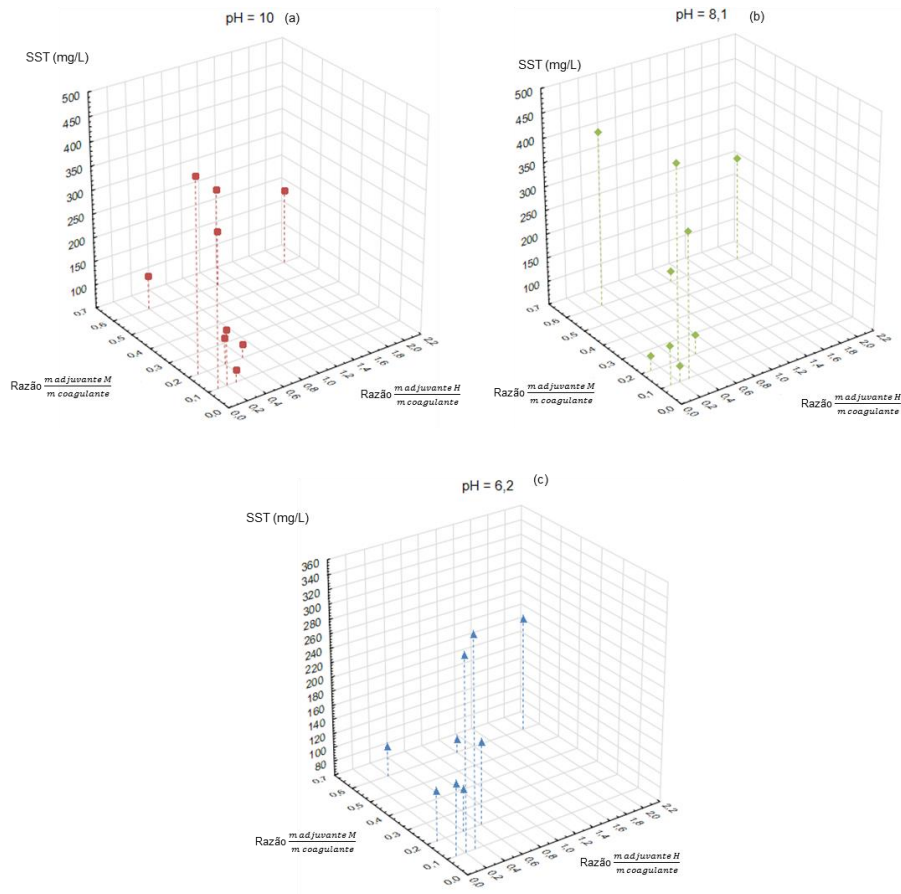


Figura 5.10 Resultados de SST para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2$ min; 60rpm $\Delta t = 15$ min; 30rpm $\Delta t = 5$ min) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

Observando a Figura 5.10 (a) o melhor valor obtido corresponde à razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1 e à razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,3, obtendo-se uma percentagem de remoção de 99,67%.

Relativamente ao pH = 8,1, Figura 5.10 (b), o melhor valor obtido observou-se para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,6 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 1,2, a que corresponde uma percentagem de remoção de 99,69%.

Por último, para pH = 6,2, o melhor valor foi obtido para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,6 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 1,2, com uma remoção de 99,66% (Figura 5.10 (c)).

Verifica-se que nenhum dos ensaios ultrapassou o limite de 500 mg/L.

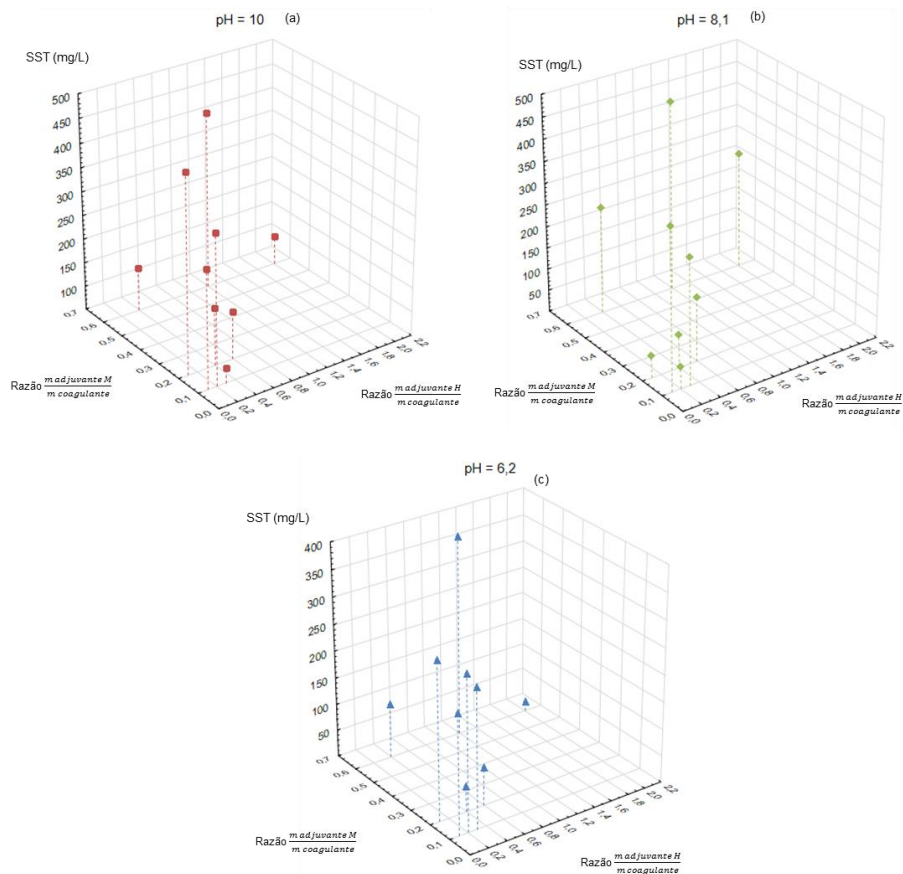


Figura 5.11 - Resultados de SST para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22$ min) para pH = 10 (a), pH = 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

Observando a Figura 5.11 (a) o melhor valor obtido corresponde à razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1 e à razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,3, obtendo-se uma percentagem de remoção de 99,65%.

Relativamente ao pH = 8,1, Figura 5.11 (b), o melhor valor obtido observou-se para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,2 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,1, a que corresponde uma percentagem de remoção de 99,78%.

Por último, para pH = 6,2, o melhor valor foi obtido para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,6 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 1,2, com uma remoção de 99,92% (Figura 5.11 (c)).

Verifica-se que nenhum dos ensaios ultrapassou o limite de 500 mg/L.

5.4.5 Efeito sobre o IVL

A sedimentação é um dos fatores que afetam um processo de tratamento. Este parâmetro é definido como o volume ocupado por 1 grama de lama seca em mililitros, após 30 minutos de sedimentação.

Quanto menor for o IVL melhor é a sedimentação das lamas. Na Tabela 5.4 apresenta-se a classificação da qualidade da sedimentação consoante uma gama de valores de IVL.

Tabela 5.4 – Qualidade da sedimentação de acordo com o valor de IVL (Vaz, 2009)

Qualidade da sedimentação	Valor de IVL (mL/g)
Excelente	< 80
Boa /moderada	80 – 150
Com dificuldades	> 120
Fraca	> 150

O controlo analítico deste parâmetro foi realizado através da medição do volume de lamas sedimentada após 30 minutos do início do teste (V30).

Na Figura 5.12 e na Figura 5.13 mostram-se, para as condições de agitação A e B, respetivamente, os valores de IVL obtidos após o tratamento usando as várias composições percentuais do produto formulado. No anexo I apresentam-se tabelas com os resultados obtidos em cada ensaio.

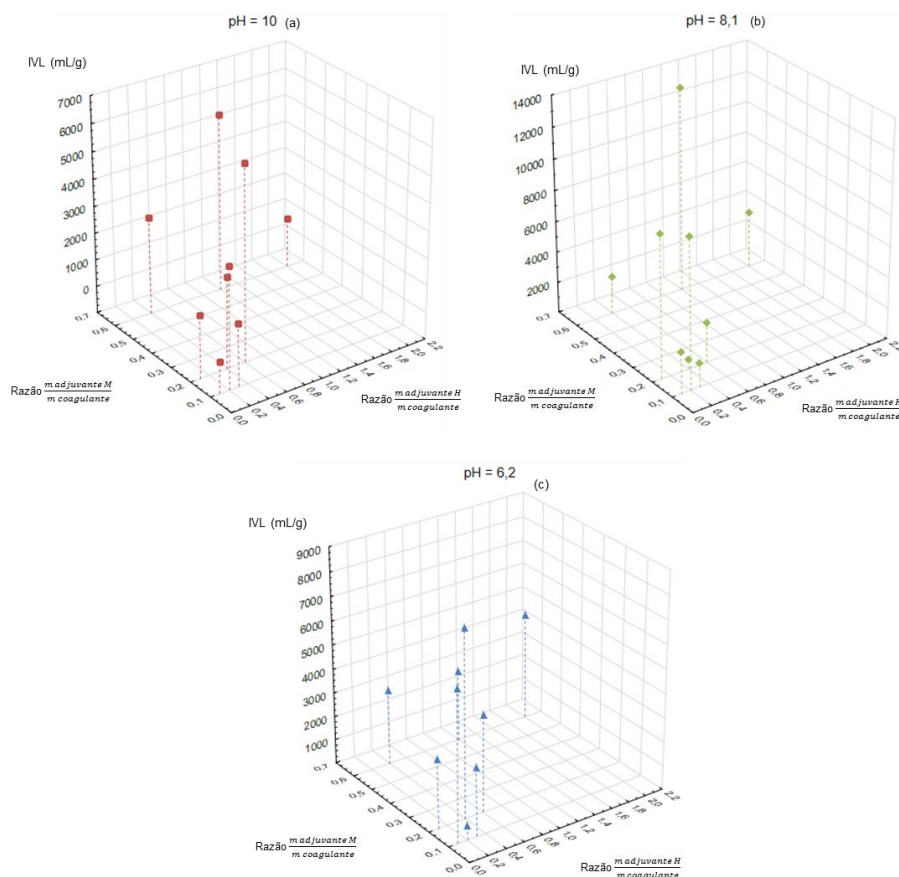


Figura 5.12 - Resultados de IVL para a condição de agitação A (150 rpm $\Delta t = 2\text{min}$; 60rpm $\Delta t = 15\text{min}$; 30rpm $\Delta t = 5\text{min}$) para pH = 10 (a), pH= 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

Observando a Figura 5.12 (a) o melhor valor obtido corresponde à razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1 e à razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,1, a que corresponde um valor de 178 mL/g.

Relativamente ao pH = 8,1, Figura 5.12 (b), o melhor valor obtido observou-se para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,2 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,4, a que corresponde um valor de 621 mL/g.

Por último, para pH = 6,2, o melhor valor foi obtido para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,2, com um valor de 615 mL/g (Figura 5.12 (c)).

Verifica-se que os resultados obtêm uma qualidade fraca de sedimentação conforme a classificação da qualidade da sedimentação indicada na Tabela 5.4.

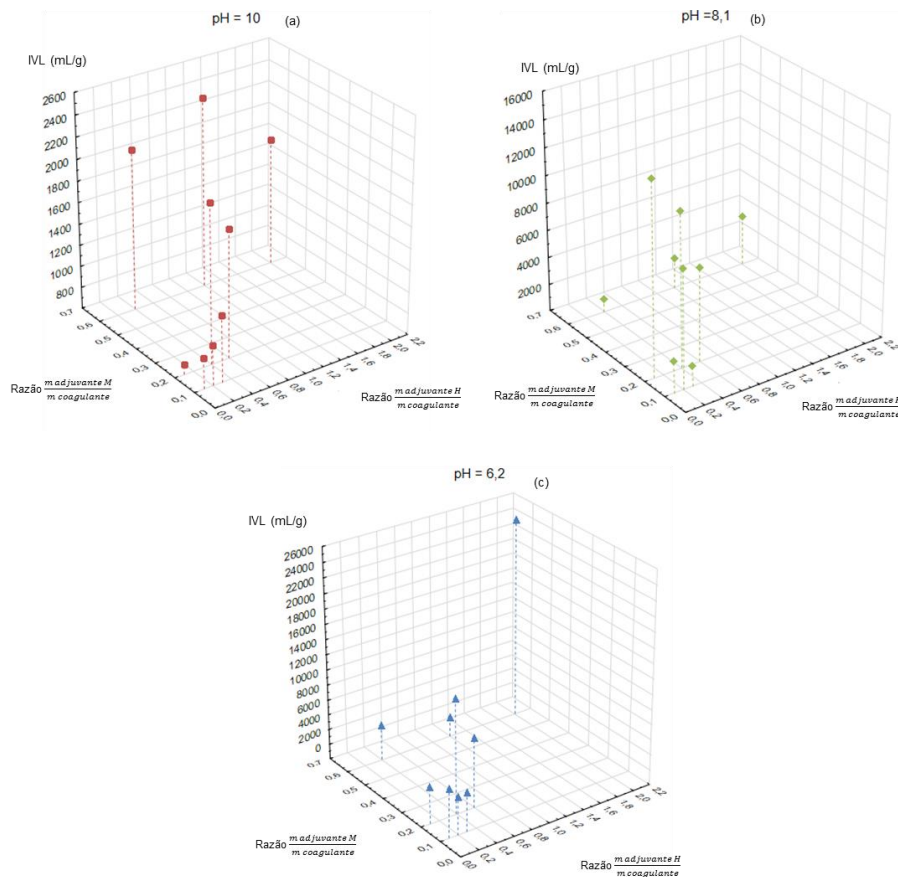


Figura 5.13 – Resultados de IVL para a condição de agitação B (90 rpm $\Delta t = 22$ min) para pH = 10 (a), pH = 8,1 (b) e pH = 6,2 (c)

Observando a Figura 5.13 (a) o melhor valor obtido corresponde à razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,1 e à razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,1, a que corresponde um valor de 890 mL/g.

Relativamente ao pH = 8,1, Figura 5.13 (b), o melhor valor obtido observou-se para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,6 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 0,4, a que corresponde um valor de 937 mL/g.

Por último, para pH = 6,2, o melhor valor foi obtido para a razão mássica de adjuvante M/coagulante de 0,6 e razão mássica de adjuvante H/coagulante de 1,2, com um valor de 620 mL/g (Figura 5.13 (c)).

Verifica-se que os resultados obtêm uma qualidade fraca de sedimentação conforme a classificação da qualidade da sedimentação indicada na Tabela 5.4.

Dos parâmetros analisados, os efeitos sobre a CQO, a turvação e os SST são os mais relevantes.

Pretende-se verificar para cada condição de agitação qual o ensaio mais adequado com base nos valores da CQO. A Figura 5.4 (agitação A) permite verificar, no caso de pH inicial igual a 10, que o ensaio em que se obtém o melhor resultado para a CQO, é o único que conduz a valores aceitáveis de turvação e de SST. De igual modo, na Figura 5.5 (agitação B) apenas o ensaio do melhor resultado para o pH inicial igual a 10 é o que permite obter valores aceitáveis para a turvação e os SST. Para pH inicial 8,1 e para pH inicial 6,2 verificou-se que para as duas condições de agitação, A e B, os melhores ensaios no que diz respeito à CQO, não permitem obter valores aceitáveis para a turvação, uma vez que se obtêm valores iguais ou superiores a 301 FTU.

Na Tabela 5.5 apresenta-se os valores obtidos para a CQO, pH final, turvação, clarificação, SST e IVL dos ensaios escolhidos (pH inicial igual a 8,1 e condição de agitação A e B).

Tabela 5.5 – Resultados de CQO, SST, turvação, clarificação, SST e IVL para os melhores ensaios de cada conjunto de condições iniciais

	Condição A	Condição B
pH	8,1	8,1
Coordenadas	0,1H; 0,1M	0,1H; 0,1M
CQO (mg/L)	439	293
SST (mg/L)	131	370
Turvação (FTU)	89	52
Clarificação	5	5
IVL (mL/g)	859	2314

O produto formulado dos ensaios escolhido para a condição A e B é constituído por 85,69% de coagulante, 5,71% de adjuvante H, 8,57% de adjuvante M e 0,03% de floculante. Esta formulação tem um custo de 0,2924 €/Kg.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

As águas residuais industriais são um problema da atualidade a nível mundial. Este trabalho teve como objetivo clarificar e melhorar a qualidade das águas residuais de uma indústria de fabricação de adesivos. Para esta clarificação optou-se por um tratamento de coagulação/floculação a ser efetuado com a adição de apenas um produto formulado. Para esta estudo, selecionou-se substâncias comercialmente disponíveis destacando-se para esta formulação um coagulante, dois adjuvantes (H e M) e um floculante.

O efluente bruto da indústria de adesivos foi caracterizado e verificou-se que nos parâmetros analisados, apenas o pH obedece aos valores limite de emissão para descarga no coletor municipal.

Para o estudo do tratamento foram inicialmente efetuados estudos das quantidades ótimas das substâncias selecionadas em Jar-Test, seguidamente estudou-se a quantidade mínima de produto formulado e por fim otimizou-se a composição do produto formulado, pH e agitação.

Nos estudos da determinação da quantidade ótima das substâncias previamente escolhidas quantificou-se uma gama entre 5 e 30 g para o coagulante, uma gama entre 2 e 10 g para o adjuvante H, estabeleceu-se a quantidade de 3 g de adjuvante M e determinou-se a quantidade de 0,01 g de floculante para tratar 500 mL de efluente bruto.

A quantidade mínima de produto formulado foi 5 g por 500 mL de efluente com base nos estudos da determinação da quantidade ótima de cada substância selecionada.

Na otimização da formulação do produto foi definido estudar o efeito da variação das razões, %(m/m), dos adjuvantes (M e H) em função do coagulante, para diferentes valores de pH inicial (6,2; 8,1 e 10) e para as duas condições de agitação (A e B), sobre os parâmetros analisados. Na primeira, (condição A) manteve-se uma agitação de 150 rpm durante 2 minutos, reduzindo-se para 60 rpm durante 15 minutos e, por fim, para 30 rpm durante 5 minutos. Na segunda condição (condição B) foi usada uma agitação constante de 90 rpm durante 22 minutos.

O estudo do efeito das variações das razões % (m/m) dos adjuvantes (M e H) foi dividido em três grupos com três subgrupos. No primeiro grupo de ensaios manteve-se constante e igual a 0,6 a razão mássica adjuvante M/coagulante e variou-se entre 0,4, 1,2 e 2 a razão mássica adjuvante H/ coagulante. No segundo grupo de ensaios manteve-se constante e igual a 0,2 a razão mássica adjuvante M/coagulante e variou-se entre 0,1, 0,4 e 0,6 a razão mássica adjuvante H/ coagulante. No terceiro grupo de ensaios manteve-se constante e igual a 0,1 a razão mássica adjuvante M/coagulante e variou-se entre 0,1, 0,2 e 0,3 a razão mássica adjuvante H/ coagulante.

Os efeitos sobre a carência química de oxigénio (CQO), o pH final, a turvação e clarificação, os sólidos suspensos totais (SST) e o índice volumétrico de lamas (IVL) foram analisados para cada ensaio realizado. Nas condições estudadas foi possível obter percentagens de remoção superiores a 90%, para CQO, SST e turvação.

Após o estudo do tratamento obteve-se para cada condição de agitação (A e B), as razões % (m/m) e o pH inicial mais adequados, com base nos melhores resultados obtidos no efeito sobre a CQO. Para a condição de agitação A o melhor resultado obteve-se para pH inicial igual a 10 com a razão mássica de adjuvante M/ coagulante igual a 0,1 e a razão mássica de adjuvante H/coagulante igual a 0,1 (percentagens de remoção de 98,01%, 99,43% e 99,60% para a CQO, SST e turvação, respetivamente). Para a condição de agitação B o melhor resultado obteve-se para pH inicial igual a 10 com a razão mássica de adjuvante M/ coagulante igual a 0,6 e a razão mássica de adjuvante H/coagulante igual a 0,1 (percentagens de remoção de 98,67%, 98,40% e 99,77% para a CQO, SST e turvação, respetivamente). Para os resultados obtidos é necessário efetuar a correção do pH após o tratamento. Apesar das elevadas percentagens de remoção obtidas, o índice volumétrico de lamas indica fraca qualidade de sedimentação.

O custo final da formulação do produto para o resultado da condição A e B é de 0,3147 €/Kg.

O estudo deste trabalho permitiu verificar interações entre diferentes substâncias com diferentes funções. Os parâmetros considerados mais relevantes para este estudo foram a CQO, a turvação e os SST. Foi também possível obter duas formulações de produto com percentagens diferentes das substâncias que vão depender das condições de agitação.

6.1 Trabalho Futuro

No sentido de continuar a aprofundar e complementar o trabalho desenvolvido na presente dissertação, sugere-se como trabalho futuro, a otimização do IVL devido aos resultados obtidos serem classificados como fraca qualidade de sedimentação.

Neste trabalho apenas se analisou os efeitos finais do tratamento obtendo-se percentagens de remoção dos parâmetros elevadas. Assim, é também sugerido o estudo do mecanismo de reação das substâncias durante o tratamento.

Adicionalmente, sugere-se um estudo aprofundado na possibilidade de reutilização das águas residuais para o seu processo industrial, nomeadamente para a lavagem das embalagens reutilizáveis.

Referências

- Agostinho, A. 2006.** *Ficha de dados de segurança da Bentonite Sódica Natural*. Portugal : s.n., 2006.
- Alves, Amélia Cristina Coelho. 2010.** *Optimização do tratamento de um efluente aquoso resultante da utilização de cola nas máquinas de produção de placas de madeira*. Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia Química. Portugal : s.n., 2010.
- Ambiente, Ministério do. 1998.** Decreto-Lei n.º 236/98 de 1 de agosto. Diário da República, 1ª série A, n.º 176, pp 3676 - 3722. Portugal : Ministério do Ambiente, 1998.
- Ambiente, Ministério do. 2007.** *Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Decreto-Lei n.º 306/2007*. Portugal : s.n., 2007.
- CALCIDRATA. 2011.** *Ficha de dado de segurança da Cal Hidratada*. Santarém : s.n., 2011.
- Chang, Raymond. 2005.** *Chemistry, Eight Edition*. s.l. : McGraw-Hill, 2005.
- Correia, José. 2012.** *Tratamento de efluentes de suinicultura por coagulação/floculação*. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2012.
- Curinha, João. 2008.** *Adição de produtos químicos e ensaios de electro-coagulação e electro-oxidação para o (Pré) Tratamento das águas residuais provenientes dos lagares de azeites*. Lisboa : Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- Derypol. 2007.** *Ficha Técnica de Hyfloc SS120 R*. Espanha : s.n., 2007.
- Fasemore, Olufemi Alexander. 2004.** *The flocculation of paint wastewater using inorganic salts*. University of the Witwatersrand. Johannesburg : s.n., 2004.
- Grassi, Luiz A. T. 2004.** Direito à Água. ABES-RS. [Online] 1 de Março de 2004. [Citação: 1 de Novembro de 2014.] <http://www.abes-rs.org.br/rechid/>.
- Guy, J. Paul. 2011.** *Introduction to Advanced Wastewater Treatment*. Stony Point, NY : CED, 2011.
- Hoekstra, Arjen Y., et al. 2011.** *Manual de Avaliação da Pegada Hídrica*. s.l. : Water Footprint Network, 141pp, 2011. ISBN 978-85-60797-16-5.
- M. Filella, J. Buffle. 1993.** *Factors controlling the stability of submicron colloids in natural waters*. 1993. Volume 73, Pages 255-273.
- Mallebrera, M., Cruz, Francisco. 2011.** *Abastecimiento de aguas*. Espanha : Universidad Politécnica de Cartagena, 2011.
- Martins, Cláudia P. 2009.** *Balanço Hídrico e indicadores de desempenho no subsistema de abastecimento de água de São João de Lobrigos - Santa Marta De Penaguião*. Vila Real : Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. 109pp, 2009.
- Meireles, Maria F. 2011.** *Optimização da Estação de Tratamento de Águas Residuais de Cresuma*. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 84 pp : s.n., 2011.

- Metcalf, E. 1991.** *Wastewater Engineering - Treatment, Disposal and Reuse, 3th edit.* New York : McGraw-Hill Book Co, 1991.
- Moura, Elisabete M. 2008.** *Descarga de Águas Residuais não Domésticas em Sistemas de Drenagem Urbanos.* s.l. : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 144pp, 2008.
- Packham, R.F. 1962.** *The Coagulation Process. I. Effect of pH and the nature of the turbidity.* Tokyo, Japan : s.n., 1962.
- Perry, Robert H. 1997.** *Perry's Chemical Engineers' Handbook. Seventh Edition.* s.l. : McGraw-Hill, 1997.
- Pinto, Gilberto. 2011.** *Planeamento Fatorial - Introdução.* Instituto Superior de Engenharia do Porto : s.n., 2011.
- PNPRI. 2000.** *VII.4 - Sector das Tintas, Vernizes e Colas.* s.l. : Plano Nacional de Prevenção dos Resíduos Industriais, 2000.
- Ruas, Filipe A. 2010.** *Relatório de projeto, Licenciatura em Engenharia do Ambiente.* Instituto Politécnico da Guarda. 57 pp : s.n., 2010.
- Silva, Maria MArgarida Mota da. 2010.** *Ensaio de coagulação floculação da água residual afluente à Etar de Avis.* Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa : s.n., 2010.
- Soares, Tânia Filipa Lopes. 2009.** *Remoção da carga orgânica afluente à ETAR de Tolosa por coagulação-floculação química.* Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Universidade Nova de Lisboa. 2009.
- Vaz, Luiz. 2009.** *Performance do processo de coagulação/floculação no tratamento do efluente líquido gerado na galvanoplastia.* Toledo : Universidade Estadual Oeste do Paraná, 2009.
- Vianna, Regina C., Junior, Claudio C. e Vianna, Rafael M. 2005.** *Os Recursos de Água Doce no Mundo - Situação, normatização e perspectiva.* Rio Grande : Edição comemorativa, 45 anos Direito/FURG, 2005.

Anexo A - Procedimento para análise de parâmetros

A.1. Procedimento de análise da carência química de oxigênio (CQO)

- Equipamento:
 - digestor HACH;
 - espectrofotômetro de Leitura Direta HACH DR/2000.
- Soluções:
 - digestão com solução digestora ($K_2Cr_2O_7$)
 - solução catalisadora (H_2SO_4)
- Procedimento:
 - a) Pré-aquecer o digestor a 150° C.
 - b) Medir 2,50 mL de amostra, previamente filtrada, para um tubo de vidro adequado a temperaturas altas e com tampa. Adicionar 2,00 mL da solução digestora e 3,00 mL da solução catalisadora.
 - c) Colocar o tubo de vidro fechado no digestor durante 2 horas.
 - d) Após arrefecimento, efetuar a leitura do valor da CQO no espectrofotômetro de leitura direta. Repetir a leitura mais duas vezes.

A.2. Procedimento de análise da Turvação

A turvação resulta na dispersão e absorção da luz pelas partículas na amostra. A turvação medida vai depender do tamanho, forma, cor e propriedades de refração das partículas.

- Equipamento:
 - espectrofotômetro de Leitura Direta HACH DR/2000
- Procedimento:
 - selecionar o programa de turvação e efetuar leitura direta. Repetir a leitura mais duas vezes.

A.3. Procedimento para determinação de Sólidos Suspensos totais (SST)

- Equipamento:
 - espectrofotômetro de Leitura Direta HACH DR/2000

A determinação SST pelo HACH DR/2000 não necessita de filtração nem dos passos de pesagem gravimétrica.

- Procedimento:
 - agitar a amostra durante dois minutos. Após agitação, efetuar leitura direta no equipamento HACH DR/2000. Repetir a leitura mais duas vezes.

A.4. Procedimento para determinação do índice volumétrico de lamas (IVL)

- Numa proveta de 250 mL colocar a amostra do efluente após agitação vigorosa prévia;
- Deixar repousar durante 30 minutos;
- Ler o volume de lamas sedimentado pela escala graduada da proveta;
- Calcular o índice volumétrico de lamas:

$$IVL = \frac{V_{30} \cdot 1000}{SST} \quad (D.1)$$

Anexo B - Análise de parâmetros ao efluente bruto para diferentes diluições

Na Tabela B.1 são apresentados os resultados obtidos para diferentes diluições efetuadas ao efluente bruto.

Tabela B.1 - Resultados obtidos para efluente bruto para diferentes diluições

<i>Diluição</i>	<i>pH</i>	<i>Temp.</i> (°C)	<i>CQO</i> (mgO ₂ /L)	<i>Cor aparente</i> (PtCo)	<i>Turbidez</i> (FTU)	<i>Sólidos Susp.</i> (mg/L)	<i>Nitratos</i> (mg/L NO ₃ ⁻)
20 X	6,3	20,5	1103	> 550	> 450	> 750	> 30
50 X	6,4	20,5	555	> 550	> 450	> 750	> 30
100 X	6,75	20,6	203	> 550	225,7	231,7	20,4

Anexo C – Quantidades e razão das substâncias

Nas tabelas C.1, C.2 e C.3 apresenta-se as quantidades e as razões de adjuvantes em função do coagulante para cada subgrupo de ensaio.

Tabela C.1 -Quantidade e a razão de adjuvante para ensaios do 1º grupo

Ensaio	% (m/m)				Razão do Adjuvante/coagulante	
	Coagulante	Adjuvante H	Adjuvante M	Floculante	Adjuvante H	Adjuvante M
1º grupo						
1.1	49,95	19,98	29,97	0,1	0,4	0,6
1.2	35,69	42,83	21,41	0,07	1,2	0,6
1.3	27,76	55,52	16,66	0,06	2	0,6

Tabela C.2 - Quantidade e a razão de adjuvante para ensaios do 2º grupo

Ensaio	% (m/m)				Razão do Adjuvante/coagulante	
	Coagulante	Adjuvante H	Adjuvante M	Floculante	Adjuvante H	Adjuvante M
2º grupo						
2.1	77,74	8,88	13,33	0,04	0,1	0,2
2.2	66,01	22,63	11,32	0,04	0,4	0,2
2.3	57,36	32,78	9,83	0,03	0,6	0,2

Tabela C.3 - Quantidade e a razão de adjuvante para ensaios do 3º grupo

Ensaio	% (m/m)				Razão do Adjuvante/coagulante	
	Coagulante	Adjuvante H	Adjuvante M	Floculante	Adjuvante H	Adjuvante M
3º grupo						
3.1	85,69	5,71	8,57	0,03	0,1	0,1
3.2	76,90	15,3	7,69	0,03	0,2	0,1
3.3	69,75	23,23	6,98	0,02	0,3	0,1

Anexo D - Informação do custo dos constituintes da formulação

Neste estudo pretendeu-se determinar a quantidade ótima de cada constituinte na formulação usada nos ensaios experimentais de tratamento do efluente. Assim foi avaliado o custo de cada matéria-prima, considerando sempre uma margem de segurança de 0,8.

Na Tabela D.1 mostra-se o preço por quilo de cada substância.

Tabela D.1 - Preço por substância

Produto	Preço* (€/kg)
Sulfato de alumínio	0,33
Hidróxido de cálcio	0,101
Montmorillonite	0,29
Poliacrilamida aniónica	2,92

*Preço dado pelo departamento de compras da empresa.

Anexo E – Resultados obtidos para CQO

Nas tabelas E.1, E.2 e E.3 apresentam-se os resultados de CQO para pH 10, 8,1 e 6,2, respectivamente.

A condição de agitação (A) promoveu 150 rpm durante 2 minutos, seguidamente reduziu-se para 60 rpm durante 15 minutos, por fim diminui-se para 30 rpm durante 5 minutos. A condição de agitação (B) foi constante, com 90 rpm durante 22 minutos.

Tabela E.1 - Resultados da CQO para condição de agitação A e B para pH = 10

Ensaio	CQO (mg/L)		Remoção de CQO (%)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	1119	1201	94,93	94,56
1.2	961	784	95,64	96,45
1.3	1230	265	94,42	98,80
2.1	1059	1064	95,20	95,18
2.2	990	986	95,51	95,53
2.3	915	1277	95,85	94,21
3.1	1244	1264	94,36	94,27
3.2	482	1048	97,82	95,25
3.3	1200	1180	94,56	94,65

Tabela E.2 - Resultados da CQO para condição de agitação A e B para pH = 8,1

Ensaio	CQO (mg/L)		Remoção de CQO (%)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	1402	1166	93,64	94,71
1.2	947	1114	95,71	94,95
1.3	647	306	97,07	98,61
2.1	856	969	96,12	95,61
2.2	1080	891	95,10	95,96
2.3	1263	1130	94,27	94,88
3.1	439	293	98,01	98,67
3.2	948	984	95,70	95,54
3.3	556	547	97,48	97,52

Tabela E.3 - Resultados da CQO para condição de agitação A e B para pH = 6,2

Ensaio	CQO (mg/L)		Remoção de CQO (%)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	221	176	99,00	99,20
1.2	1323	1452	94,00	93,42
1.3	1086	148	95,08	99,33
2.1	552	983	97,50	95,54
2.2	996	972	95,49	95,59
2.3	565	1356	97,44	93,85
3.1	236	278	98,93	98,74
3.2	1078	989	95,11	95,52
3.3	383	260	98,26	98,82

Anexo F – Resultados obtidos para pH final

Nas tabelas F.1, F.2 e F.3 apresentam-se os resultados de pH final para pH 10, 8,1 e 6,2, respetivamente.

A condição de agitação (A) promoveu 150 rpm durante 2 minutos, seguidamente reduziu-se para 60 rpm durante 15 minutos, por fim diminui-se para 30 rpm durante 5 minutos. A condição de agitação (B) foi constante, com 90 rpm durante 22 minutos.

Tabela F.1 - Resultados do pH final para condição de agitação A e B para pH = 10

Ensaio	pH final	
	Condição A	Condição B
1.1	4,26	4,26
1.2	11,65	12,15
1.3	5,87	4,43
2.1	4,45	4,88
2.2	6,77	7,15
2.3	7,84	9,6
3.1	8,02	5,07
3.2	5,59	6,1
3.3	7,75	12,17

Tabela F.2 - Resultados do pH final para condição de agitação A e B para pH = 8,1

Ensaio	pH final	
	Condição A	Condição B
1.1	6,38	6,88
1.2	7,05	11,6
1.3	12,48	12,55
2.1	7,03	6,51
2.2	11,58	7,12
2.3	6,05	12,08
3.1	4,05	4,2
3.2	11,13	7,35
3.3	5,2	6,33

Tabela F.3 - Resultados do pH final para condição de agitação A e B para pH = 6,2

Ensaio	pH final	
	Condição A	Condição B
1.1	7,62	8,32
1.2	9,7	10,5
1.3	6,11	6,8
2.1	4,01	4,15
2.2	5,61	7,22
2.3	6,09	6,98
3.1	12,27	12,23
3.2	4,21	4,33
3.3	4,38	4,66

Anexo G – Resultados obtidos para a Turvação e Clarificação

Nas tabelas G.1, G.2 e G.3 apresentam-se os resultados de Turvação para pH 10, 8,1 e 6,2, respetivamente.

A condição de agitação (A) promoveu 150 rpm durante 2 minutos, seguidamente reduziu-se para 60 rpm durante 15 minutos, por fim diminui-se para 30 rpm durante 5 minutos. A condição de agitação (B) foi constante, com 90 rpm durante 22 minutos.

Tabela G.1 - Resultados da Turvação para condição de agitação A e B para pH = 10

Ensaio	Turvação (FTU)		Remoção de Turvação (%)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	121	126	99,47	99,44
1.2	553	459	97,55	97,97
1.3	221	540	99,02	97,61
2.1	352	251	98,44	98,89
2.2	143	176	99,37	99,22
2.3	104	207	99,54	99,08
3.1	338	240	98,50	98,94
3.2	269	338	98,81	98,50
3.3	59	85	99,74	99,62

Tabela G.2 - Resultados da Turvação para condição de agitação A e B para pH = 8,1

Ensaio	Turvação (FTU)		Remoção de Turvação (%)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	91	116	99,60	99,49
1.2	202	230	99,11	98,98
1.3	107	59	99,52	99,74
2.1	667	81	97,05	99,64
2.2	99	155	99,56	99,31
2.3	565	408	97,50	98,19
3.1	89	52	99,60	99,77
3.2	446	188	98,02	99,17
3.3	91	116	99,60	99,49

Tabela G.3 - Resultados da Turvação para condição de agitação A e B para pH = 6,2

Ensaio	Turvação (FTU)		Remoção de Turvação (%)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	523	513	97,68	97,73
1.2	135	392	99,40	98,26
1.3	255	413	98,87	98,17
2.1	592	623	97,38	97,24
2.2	103	55	99,55	99,75
2.3	147	100	99,35	99,56
3.1	190	245	99,16	98,91
3.2	218	550	99,03	97,56
3.3	424	260	98,12	98,85

Nas tabelas G.4, G.5 e G.6 apresentam-se os resultados de Clarificação para pH 10, 8,1 e 6,2, respectivamente.

Tabela G.4 - Resultados da clarificação para condição de agitação A e B para pH = 10

Ensaio	Clarificação	
	Condição A	Condição B
1.1	3	1
1.2	0	4
1.3	3	3
2.1	4	5
2.2	0	5
2.3	5	4
3.1	0	1
3.2	5	5
3.3	1	4

Tabela G.5 - Resultados da clarificação para condição de agitação A e B para pH = 8,1

Ensaio	Clarificação	
	Condição A	Condição B
1.1	5	4
1.2	3	3
1.3	4	5
2.1	0	5
2.2	5	4
2.3	0	1
3.1	5	4
3.2	0	4
3.3	5	4

Tabela G.6 - Resultados da clarificação para condição de agitação A e B para pH = 6,2

Ensaio	Clarificação	
	Condição A	Condição B
1.1	0	0
1.2	4	1
1.3	3	1
2.1	0	0
2.2	4	5
2.3	4	5
3.1	4	3
3.2	3	0
3.3	1	3

Anexo H – Resultados obtidos para os SST

Nas tabelas H.1, H.2 e H.3 apresentam-se os resultados de Turvação para pH 10, 8,1 e 6,2, respetivamente.

A condição de agitação (A) promoveu 150 rpm durante 2 minutos, seguidamente reduziu-se para 60 rpm durante 15 minutos, por fim diminui-se para 30 rpm durante 5 minutos. A condição de agitação (B) foi constante, com 90 rpm durante 22 minutos.

Tabela H.1 - Resultados de SST para condição de agitação A e B para pH = 10

Ensaio	SST (mg/L)		Remoção de SST (%)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	122	141	99,47	99,39
1.2	168	421	99,27	98,18
1.3	208	112	99,10	99,52
2.1	450	460	98,06	98,01
2.2	104	170	99,55	99,26
2.3	78	148	99,66	99,36
3.1	448	297	98,07	98,72
3.2	166	362	99,28	98,44
3.3	76	82	99,67	99,65

Tabela H.2 - Resultados de SST para condição de agitação A e B para pH = 8,1

Ensaio	SST (mg/L)		Remoção de SST (%)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	414	248	98,21	98,93
1.2	72	439	99,69	98,11
1.3	271	270	98,83	98,83
2.1	80	50	99,65	99,78
2.2	451	76	98,05	99,67
2.3	90	147	99,61	99,37
3.1	131	370	99,43	98,40
3.2	82	52	99,64	99,78
3.3	349	290	98,50	98,75

Tabela H.3 - Resultados de SST para condição de agitação A e B para pH = 6,2

Ensaio	SST (mg/L)		Remoção de SST (%)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	104	102	99,55	99,56
1.2	80	374	99,66	98,39
1.3	223	18	99,04	99,92
2.1	130	294	99,44	98,73
2.2	119	47	99,49	99,80
2.3	175	71	99,24	99,70
3.1	160	225	99,31	99,03
3.2	325	288	98,60	98,76
3.3	348	260	98,50	98,88

Anexo I – Resultados obtidos para IVL

Nas tabelas I.1, I.2 e I.3 apresentam-se os resultados de IVL para pH 10, 8,1 e 6,2, respetivamente.

A condição de agitação (A) promoveu 150 rpm durante 2 minutos, seguidamente reduziu-se para 60 rpm durante 15 minutos, por fim diminui-se para 30 rpm durante 5 minutos. A condição de agitação (B) foi constante, com 90 rpm durante 22 minutos.

Tabela I.1 - Resultados do IVL para condição de agitação A e B para pH = 10

Ensaio	Volume de lamas (mL/ L)		IVL (mL/g)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	320	296	2630	2094
1.2	944	1000	5608	2375
1.3	184	200	885	1791
2.1	600	320	1333	695
2.2	248	352	2377	2067
2.3	480	264	6180	1784
3.1	80	264	178	890
3.2	576	352	3463	971
3.3	100	100	1310	1220

Tabela I.2 - Resultados do IVL para condição de agitação A e B para pH = 8,1

Ensaio	Volume de lamas (mL/ L)		IVL (mL/g)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	1000	232	2415	937
1.2	952	1000	13222	2278
1.3	1000	1000	3695	3704
2.1	736	704	9162	14080
2.2	280	848	621	11207
2.3	232	1000	2568	6803
3.1	352	856	2680	2314
3.2	792	448	9619	8671
3.3	528	440	1514	1515

Tabela I.3 - Resultados da clarificação para condição de agitação A e B para pH = 6,2

Ensaio	Volume de lamas (mL/ L)		IVL (mL/g)	
	Condição A	Condição B	Condição A	Condição B
1.1	328	272	3164	2667
1.2	240	232	3013	620
1.3	1000	440	4484	24444
2.1	376	824	2900	2806
2.2	920	616	7753	13106
2.3	712	512	4061	7245
3.1	1000	1000	6250	4451
3.2	200	856	615	2976
3.3	1000	816	2876	3142