

**MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2012/2013**

**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO DE COAGULAÇÃO-  
FLOCULAÇÃO NA ETE DE ICARAÍ, NITERÓI**

**MARIA JOSÉ DE ARAÚJO CALDEIRA RAMALHO**

Dissertação submetida para obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE**

**Presidente do Júri:** Cidália Maria de Sousa Botelho

Professora do Departamento de Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

---

**Orientadora académica na universidade de acolhimento:** Lisiane Heinen Fernandes

Professora do Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente na Universidade Federal Fluminense

**Orientador académico da universidade de acolhimento:** Dario Sousa Ramalho Prata

Professor do Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente da Universidade Federal Fluminense

**Orientador na empresa Águas de Niterói SA:** André Lermontov  
D. Sc Gerente Corporativo de Tecnologia do Grupo Águas do Brasil

*Setembro de 2013*

---



Ao meu pai,



## Agradecimentos

A realização desta Dissertação não teria sido possível sem a participação e contribuição de algumas pessoas que gostaria de mencionar aqui:

Ao Dr. André Lermontov, meu orientador na empresa, pela preocupação, acompanhamento e ajuda durante todo o processo;

À Professora Lisiane Fernandes e Professor Dario Prata pelo suporte e ajuda que foram fundamentais para a minha motivação e desempenho;

À Lais di Santi e ao André Pinheiro, Engenheira e Responsável de Laboratório na Águas de Niterói, respectivamente: sem dúvida que esta tese não teria sido possível sem as suas ajudas. Obrigada por todo o apoio, toda a ajuda dentro da empresa, todo o vosso conhecimento, recursos, boleias necessárias por toda a cidade de Niterói, distrações e carinho incondicional. Se hoje está publicada, não tenho dúvida que terá sido pela vossa contribuição.

Aos Engenheiros Coordenadores e Operacionais da ETE de Icaraí, Philippe Araújo e Márcia Frieberg pela disponibilidade e atenção; a toda a equipe da Águas de Niterói S.A. no geral pela recepção calorosa, ajuda, material e recursos disponibilizados e pela oportunidade de ter integrado um grupo de trabalho como o da Águas de Niterói;

Pela minha recepção na Universidade Federal Fluminense onde sempre dispus de disponibilidade incondicional para procurar apoio no processo geral da dissertação: um muito obrigado ao Professor Osvaldo Quelhas igualmente pela paciência e empenho em garantir o meu percurso no bom caminho e ao Leonardo Bezerra Pimentel, que tanta paciência e carinho teve;

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à AEFEUP por me ensinarem tanto: “da exigência se faz o exemplo”;

A todos os meus amigos, presentes e ausentes no Brasil. Aos mais antigos, aos mais recém-feitos. Obrigada pelo apoio durante toda a minha vida académica, por todos os bons e maus momentos, por ajudarem a ultrapassar todas as dificuldades presentes na vida, na faculdade e com esta tese. Mas especialmente um muito obrigado Ana Margarida Martins, Cátia Ribeiro, Dayane Pereira, Maria José Saganha, Marta Pinheiro, Raquel Alves e Sérgio Cerqueira. Nunca fui boa com as palavras, mas o que fica é o sentimento.

A toda a minha família me apoiarem, resmungarem quando foi preciso e por acreditarem em mim, mas em especial à minha mãe: obrigada Mãe, por toda a compreensão, paciência, força, motivação e apoio incondicional neste último ano;

Ao meu Pai, pela inspiração.



## Resumo

Foi realizado um estudo de otimização de coagulação-floculação na ETE de Icaraí. Inicialmente foi realizada uma pesquisa em literatura com os principais coagulantes que têm sido investigados e publicados recentemente em várias bases de pesquisa e indexação científicas como a Scopus, Science Direct e Taylor&Francis, num total de 31 bases de indexação e de 214 revistas científicas. Dessa pesquisa, os coagulantes citados foram ordenados de acordo com a percentagem (%) de citação, do mais para o menos citado: Policloreto de Alumínio (PAC); Cloreto Férrico; Sulfato de Alumínio; Tanino; Sulfato Férrico; Quitosano; Sulfato Ferroso; Hidróxido de Cálcio. Os coagulantes citados foram comparados com os disponíveis no mercado brasileiro para venda e para testar em Jar-Test. Dessa comparação foram selecionados os quatro mais citados e disponíveis para compra: Cloreto Férrico; Policloreto de alumínio (Panfloc PC15); Sulfato de Alumínio e Tanino (COARG 100). Como ensaio suplementar, foi testado um quinto coagulante, também à base de Tanino (Tanfloc SL), devido à diferença de custo orçamentada entre os dois coagulantes à base de tanino.

As velocidades e tempos de mistura do efluente com o coagulante, nas condições atuais da ETE foram determinadas em 1,21 m/s e 0,84 m/s nas etapas semelhantes à coagulação e floculação, respectivamente, para  $Q_{\text{médio}}=0,952 \text{ m}^3/\text{s}$ . Em ambas as etapas, os tempos de mistura calculados foram de 27 s. O Gradiente de velocidade na caixa de mistura de efluente com cloreto férrico, para o mesmo caudal, foi determinado em  $G=1994 \text{ s}^{-1}$ . Adicionalmente foi determinado nos decantadores o TRH e CHS: TRH=1,05 h e CHS=20  $\text{m}^3/(\text{m}^2/\text{d})$ .

Devido a resultados significativamente diferentes de CQO, entre as coletas de água bruta, as dosagens aplicadas foram normalizadas por tratamento de CQO (mg/L).

Em Jar-Test, foram adotadas velocidades de 116 rpm, durante 27 s e 80 rpm durante 20 min, seguidos de uma sedimentação de 30 min. Todos os ensaios apresentaram bons resultados. As doses ótimas determinadas, para a CQO média de entrada na ETE de Icaraí (CQO=350 mg/L), foram de 196 mg/L (8 L/min) para o cloreto férrico; 135 mg/L (7 L/min) para o Tanfloc SL; 369 mg/L (13,5 L/min) para o sulfato de alumínio; 116 mg/L (6 L/min) COARG100; 120 mg/L (4,8 L/min) na experiência com o Panfloc. Para todos os coagulantes foi efetuada a estimativa de produção de lamas associadas.

Tendo em conta o preço R\$/kg de cada coagulante, o custo económico de tratamento com Cloreto Férrico é de, por dose, 6,14 R\$; COARG100 - 31,75 R\$; Sulfato de alumínio - 12,82 R\$, Panfloc PC 15 - 4,88 R\$ e Tanfloc SL 9,75 R\$. O Panfloc foi determinado como o melhor coagulante para aplicação económica na ETE de Icaraí.





## Abstract

This work is a study for an optimization of a coagulation-floculation process. The first part of this thesis is a research for the most recent coagulants tested and published in scientific publications in several indexing bases of scientific publications such as Scopus, Science Direct and Taylor&Francis, in a total of 31 indexing research bases and 214 scientific magazines. From the research, the cited coagulants were: Panfloc (PAC), Ferric Chloride, Aluminum Sulfate, Tannin, Ferric Sulfate, Chitosan, Ferrous Sulfate and Calcium Hydroxide (from the most to the least cited). These coagulants were compared with those available for sale in the Brazilian market and the tested ones were the four most cited and available: Ferric Chloride, Poly Aluminium (Panfloc PC 15), Aluminium Sulphate and Tannin (COARG 100). As a supplementary trial, a fifth coagulant was tested, also on a tannin basis (Tanfloc SL), due to its cost difference between the two tannin-based coagulants.

The speed and time of mixing of the effluent with the coagulant, under current conditions of the Wastewater Treatment Plant (WWTP) were determined as 1.21 m/s and 0.84 m/s for the rapid and slower mixing, respectively, for  $Q_{\text{médio}}=0.952 \text{ m}^3/\text{s}$ . Both mixing times were established in 27 s. The velocity gradient in the mixing box effluent with ferric chloride, for the same flow rate, was determined as  $G = 1994 \text{ s}^{-1}$ . Additionally, in decanters, was determined its CHS and TRH: TRH= 1,05 h and CHS=20  $\text{m}^3/(\text{m}^2/\text{d})$ .

Owing significantly different results of COD, between collections of raw water, the doses were normalized by COD treatment (mg/L).

On the Jar-Test, the velocity and mixing times were established as: 116 rpm for 27 s, 80 rpm for 20 min, and 30 min for sedimentation. All tests showed good results. The average of COD entrance in the treatment station is 350 mg/L, and for it, the optimal doses were determined as 196 mg/L (8L/min) for ferric chloride, 135 mg/L (7 L/min) for Tanfloc SL; 369 mg/L (13,5 L/min) for aluminum sulfate; 116 mg/L (6 L/min) in COARG100; 120 mg/L (4,8 L/min) on experience with Panfloc. Sludge production was calculated for all coagulants, and so its treatment costs.

Based on the price for each coagulant (R\$/Kg), the economic final cost of treatment, per dose, with Ferric Chloride is 6.14 R\$; COARG100 - 31.75 R\$; Sulfate Aluminium - 12.82 R\$; Panfloc - 4.88 R\$ and Tanfloc SL - 9.75 R\$. As so, Panfloc was determined as the best coagulant for use in the Icaraí wastewater treatment station.



# Índice

<b>Resumo.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Enquadramento e Contextualização da Temática .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Estrutura e e organização da Dissertação .....</b>	<b>2</b>
<b>2 Estado da Arte.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Introdução ao Tratamento de Águas Residuais no Brasil.....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Recursos Hídricos – Águas Superficiais .....	3
2.1.2 Niterói, Rio de Janeiro .....	3
2.1.3 Águas de Niterói, S.A. ....	4
<b>2.2 ETE de Icaraí, Niterói .....</b>	<b>5</b>
2.2.1 Descrição da ETE .....	5
2.2.2 Dados de Funcionamento e Características Gerais de Monitoramento .....	7
2.2.3 Objetivos de Qualidade .....	7
2.2.4 Trabalhos Anteriores Realizados.....	9
<b>2.3 Coagulação-Floculação.....</b>	<b>10</b>
2.3.1 Caracterização do Processo de Coagulação-Floculação e Fatores Intervenientes .....	10
2.3.2 Coagulantes/Floculantes .....	12
2.3.3 Cloreto Férrico .....	14
2.3.4 Policloreto de Alumínio – Panfloc/PAC .....	14
2.3.5 Sulfato de Alumínio.....	16
2.3.6 Taninos - Tanfloc .....	16
<b>2.4 Hidráulica.....</b>	<b>18</b>
2.4.1 Teorema de Bernoulli .....	18
2.4.2 Gradiente de Velocidade .....	18
2.4.3 Carga Hidráulica Superficial (CHS) e Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) .....	19
2.4.4 Condições e Equipamentos de Mistura.....	19
2.4.5 Sedimentação.....	20
2.4.6 Decantadores.....	20

<b>3</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>23</b>
3.1	Recolha e Conservação de Amostras.....	23
3.2	Material e Procedimento de Análise .....	24
<b>4</b>	<b>Resultados – Análise e Discussão.....</b>	<b>27</b>
4.1	Condições de Mistura.....	27
4.2	Decantadores .....	28
4.3	Coagulantes.....	29
4.3.1	Cloreto Férrico .....	29
4.3.2	Sulfato de Alumínio.....	33
4.3.3	Panfloc PC18.....	37
4.3.4	COARG 100.....	41
4.3.5	Comparação dos coagulantes testados, por análise dos parâmetros quantificados .....	44
4.3.6	Ensaio Complementar – Tanfloc SL.....	48
4.3.7	Comparação Final de todos os coagulantes testados .....	51
4.3.8	Análise Económica Final .....	53
<b>5</b>	<b>Conclusões Finais .....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>59</b>
<b>Anexos.....</b>		<b>i</b>
	<b>ANEXO I - Formulário de preenchimento obrigatório por parte do programa PROCON-ÁGUA ....</b>	<b>i</b>
	<b>ANEXO II - Lista de Artigos Consultados na Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>v</b>
	<b>ANEXO III - Métodos Analíticos de Análise .....</b>	<b>ix</b>
	<b>ANEXO IV - Ensaio de Coagulação-Floculação Registado.....</b>	<b>xiii</b>
	<b>ANEXO V - Teste ao Panfloc e Cloreto Férrico realizado em laboratório por Águas de Niterói, S.A. ....</b>	<b>xix</b>

# Índice de Figuras

<i>Figura 1 – Esquema do Processo antigo da ETE de Icaraí.</i> .....	6
<i>Figura 2 – Esquema do Processo Atual da ETE de Icaraí.</i> .....	6
<i>Figura 3 – Esquema Geral do Processo Atual na ETE de Icaraí</i> .....	6
<i>Figura 4 - Água Tratada com Cloreto Férrico (à esquerda) e Panfloc (à direita)</i> .....	15
<i>Figura 5- Estrutura Estimada do Tanfloc</i> .....	17
<i>Figura 6 - Fluxograma do Processo Primário - Pormenor da Caixa de Areia</i> .....	23
<i>Figura 7 – Ponto de recolha das amostras à saída da Caixa de Areia</i> .....	23
<i>Figura 8 – Aspeto final dos frascos das amostras</i> .....	23
<i>Figura 9 - Passagem manual do Esgoto Bruto pelo crivo</i> .....	25
<i>Figura 10 - Jar-Test</i> .....	25
<i>Figura 11 - Cloreto Férrico: Gráfico da evolução da Turvação final (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO</i> .....	30
<i>Figura 12 - Cloreto Férrico: Gráfico da evolução dos SST (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO</i> .....	30
<i>Figura 13 - Cloreto Férrico: Gráfico da evolução da CQO (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO</i> .....	31
<i>Figura 14 – Doses calculadas inicialmente e doses testadas num segundo ensaio</i> .....	33
<i>Figura 15 - Sulfato de Alumínio: Gráfico da evolução da turvação final (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO</i> .....	34
<i>Figura 16 - Sulfato de Alumínio: Gráfico de evolução dos SST (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO</i> .....	34
<i>Figura 17 - Panfloc PC18: Primeiros Resultados da turvação (FAU)</i> .....	37
<i>Figura 18 - Panfloc PC18: Primeiros Resultados de SST (mg/L)</i> .....	37
<i>Figura 19 - Panfloc PC18: Gráfico de Evolução da Turvação (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO</i> ..	38
<i>Figura 20 - Panfloc PC18: Gráfico de evolução dos SST (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO</i> .....	38
<i>Figura 21 – COARG 100: Gráfico da evolução da remoção de Turvação (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO</i> .....	41
<i>Figura 22 - COARG 100: Gráfico da evolução da CQO (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO</i> .....	41
<i>Figura 23 – Exemplo de água tratada com COARG 100</i> .....	42
<i>Figura 24 - Turvação: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO de diferentes coagulantes</i> .....	44

<i>Figura 25 – SST: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO de diferentes coagulantes.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 26 – CQO: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO de diferentes coagulantes.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 27 – Gráfico com a diferença nas dosagens ótimas de cada coagulante ótimas. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 28 – Gráfico com o Custo Económico Total (R\$/CQO) por tratamento de CQO, para todos os coagulantes. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 29 – Gráfico com Custo Económico Total (R\$/dosagem ótima), para todos os coagulantes. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 30 - Tanfloc SL: Gráfico da evolução da turvação (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 31 - Tanfloc SL: Gráfico de evolução da remoção de SST (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 32 - Tanfloc SL: Gráfico da variação da remoção de CQO (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 33 - Turvação: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO para todos os coagulantes.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 34 - SST: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO para todos os coagulantes.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 35 - CQO: Representação gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO aplicada para todos os coagulantes. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 36 – Gráfico com a diferença nas dosagens ótimas, para todos os coagulantes. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 37 – Gráfico do Custo Económico Total (R\$/dosagem ótima), para todos os coagulantes. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 38 – Gráfico do Custo Económico Total (R\$/CQO) por tratamento de CQO, para todos os coagulantes. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 39 - Leitor Múltiplo de vários parâmetros, incluindo a Turvação .....</i>	<i>x</i>
<i>Figura 40 - Caixa com 25 tubos de reagentes de DQO .....</i>	<i>xi</i>
<i>Figura 41 - Digestor de Alta Temperatura para a DQO .....</i>	<i>xi</i>
<i>Figura 42 - Tubo de Reagente de DQO – Aspetto e cor.....</i>	<i>xi</i>
<i>Figura 43 - Fotografia geral do resultado do 2ºensaio com cloreto férrico .....</i>	<i>xiv</i>
<i>Figura 44 – Resultado do ensaio Jar-Test .....</i>	<i>xviii</i>
<i>Figura 45 – Resultados do 2º Ensaio Jar-Test.....</i>	<i>xviii</i>

# Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 - Indicadores da empresa. Fonte:[6]</i> .....	5
<i>Tabela 2 – Valores legislativos estipulados pelas normas NT-202.R-10, NT-215.R-4 e Resolução Nº430..</i> .....	9
<i>Tabela 3 - Coagulantes mais referidos em literatura.</i> .....	13
<i>Tabela 4 - Coagulantes Fornecidos no mercado Brasileiro.</i> .....	13
<i>Tabela 5 – Coagulantes Selecionados para o estudo.</i> .....	13
<i>Tabela 6 – Gradientes de Velocidade para o Processo de Coagulação-floculação e tempos de mistura.</i> <i>Fonte: Adaptado de [3].</i> .....	19
<i>Tabela 7 – Valores de Dimensionamento de Decantadores gravíticos [40].</i> .....	19
<i>Tabela 8 – Calendário de Recolha das Amostras para Laboratório.</i> .....	24
<i>Tabela 9 – Parâmetros e métodos utilizados para análise experimental</i> .....	26
<i>Tabela 10 – Materiais Utilizados</i> .....	26
<i>Tabela 11 – Dados Utilizados para o Cálculo da Equação 2.</i> .....	27
<i>Tabela 12 – Dados utilizados para a Equação 3.</i> .....	27
<i>Tabela 13 – Gradientes de velocidade obtidos.</i> .....	27
<i>Tabela 14 – Velocidades obtidas.</i> .....	28
<i>Tabela 15 – Decantadores: Características Gerais</i> .....	28
<i>Tabela 16 – Decantadores: Carga Hidráulica Superficial.</i> .....	29
<i>Tabela 17 – Decantadores: Tempos de Retenção Hidráulica, horas.</i> .....	29
<i>Tabela 18 - Comparação dos valores obtidos com o efluente da ETE em estudo: resultados publicados em [22]) e obtidos neste estudo.</i> .....	32
<i>Tabela 19 – Cloreto Férrico: produção de lamas e custo associado</i> .....	32
<i>Tabela 20 – Cloreto Férrico: Custo económico total</i> .....	32
<i>Tabela 21 - Panfloc: Características do efluente tratado com dose ótima.</i> .....	35
<i>Tabela 22 – Comparação dos valores obtidos com o efluente da ETE em estudo: resultados publicados em [22] e obtidos neste estudo.</i> .....	36
<i>Tabela 23 – Sulfato: produção de lamas e custo associado</i> .....	36
<i>Tabela 24 – Sulfato: Custo económico total</i> .....	36
<i>Tabela 25 – Panfloc: Resultados da medição da CQO para as doses de 0,16; 0,19 e 0,23 (mg/L)/CQO</i>	39
<i>Tabela 26 – Panfloc: Características do efluente tratado com dose ótima.</i> .....	39

<i>Tabela 27 – Panfloc - Comparação dos valores obtidos com o efluente da ETE em estudo: resultados publicados em [22] e obtidos neste estudo.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 28 - Panfloc: produção de lamas e custo associado.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 29 - Panfloc: Custo económico total.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 30 – COARG 100: Características do efluente tratado com 6L/min. n.a. – número de amostras; d.p. – desvio-padrão;c.v. – coeficiente de variação. ....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 31 – COARG 100: produção de Lamas e Custo Associado .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 32 - COARG 100: Custo económico total .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 33 – Resultados das medições de CBO<sub>5</sub>. ....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 34 – Orçamento de compra dos coagulantes, pelas empresas fornecedoras. ....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 35 – Resultados obtidos dos coagulantes orgânicos testados .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 36 – Características do Efluente Tratado com dosagem ótima de Tanfloc SL (C=305 mg/L). ....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 37 – Produção de Lamas e custo económico associado.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 38 – Custo económico total de consumo .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 39 – Custo do Produto orçamentado pelas empresas fornecedoras.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 40 – Custo Económico Total (R\$/dose ótima) .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 41 – Custo Económico Total (R\$/CQO).....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 42 – Padrões e Critérios de análise das amostras ao efluente tratado: concentração máxima; tipo de amostra e frequência de análise .....</i>	<i>i</i>
<i>Tabela XLIII – Volume de amostra e nº de gotas de EDTA necessárias para proceder à medição da CBO<sub>5</sub>.....</i>	<i>xii</i>
<i>Tabela 44 – Resultados registados do ensaio realizado com cloreto férrico do fornecedor Vittaquímica. ....</i>	<i>xiii</i>
<i>Tabela 45 - dosagens e concentrações do 1º ensaio com cloreto férrico .....</i>	<i>xiv</i>
<i>Tabela 46 - dosagens e concentrações do 2ºensaio com cloreto férrico .....</i>	<i>xiv</i>
<i>Tabela 47 - Resultados registados no ensaio com Cloreto Férrico do fornecedor Allquim .....</i>	<i>xv</i>
<i>Tabela 48 - Resultados registados do 2º ensaio com Panfloc.....</i>	<i>xvi</i>
<i>Tabela 49 – Resultados registados do 2º ensaio com Panfloc.....</i>	<i>xvii</i>



# Índice de Equações

<i>Equação 1 – Potencial Zeta .....</i>	<i>12</i>
<i>Equação 2 – Equação de Bernoulli Simplificada .....</i>	<i>18</i>
<i>Equação 3 – Gradiente de Velocidade de Mistura.....</i>	<i>18</i>
<i>Equação 4 – Fórmula de Cálculo da CHS .....</i>	<i>19</i>
<i>Equação 5 – Fórmula de Cálculo do TRH.....</i>	<i>19</i>
<i>Equação 6 – Extrapolação dos resultados de turvação.....</i>	<i>35</i>
<i>Equação vii – Remoção de SST (mg/L) .....</i>	<i>ix</i>
<i>Equação viii – Remoção de SST (%).....</i>	<i>x</i>



## Abreviaturas e símbolos

CEDAE	Companhia Estadual de Águas e Esgotos	
CHS	Carga Hidráulica Superficial	
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente	
CQO	Carência Química de Oxigênio	
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos	
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente	
INEA	Instituto Estadual do Ambiente	
PAC	Policloreto de Alumínio	
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico	
SAAB	Saneamento Ambiental Águas do Brasil	
SST	Sólidos Suspensos Totais	
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica	
$\Delta H$	Varição da energia total mecânica	m
Z	Cota Topográfica	m
Q	Caudal de escoamento	m <sup>3</sup> /s m <sup>3</sup> /h m <sup>3</sup> /d
g	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
S	Seção molhada do escoamento	m <sup>2</sup>
G	Gradiente de Velocidade	s <sup>-1</sup>
P	Potência do Motor	N/m <sup>2</sup>
V	Volume	m <sup>3</sup>
A	Área Superficial	m <sup>2</sup>
$\zeta$	Potencial zeta	mV
$\epsilon$	Constante dielétrica do meio	s.u.
$\mu$	mobilidade	cm/s
$\gamma$	Altura/profundidade da água na seção	m
$\mu$	Viscosidade Dinâmica	N/s.m <sup>2</sup>



# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e Contextualização da Temática

As águas residuais recolhidas pelo sistema de esgoto sanitário contêm material sólido suspenso que pode sedimentar e/ou outros sólidos que não sedimentam por ação natural. Este material constituinte confere características à água natural que necessitam de ser removidas:

“ por provocarem sabores, cheiros e a própria presença de microorganismos patogénicos à saúde do ser humano” [2].

Existem vários tipos de tratamento possíveis para clarificar e limpar o efluente de acordo com os padrões legislativos de descarga, em qualquer lado no Mundo. Desde o tipo biológico ao quimicamente assistido, existem diferentes opções que são selecionadas para cada estação de tratamento, de acordo com a área disponível e a necessária ao tratamento, caudal de esgoto recebido, necessidades de tratamento dependendo das características de entrada do efluente bruto, e recursos monetários disponíveis [3].

No Brasil, a coleta e tratamento de esgoto coletiva para todas as habitações só agora faz parte de um plano construtivo e estratégico nacional – através do programa legislativo PROCON-ÁGUA. Estima-se que até ao ano de 2011, apenas 30% do número de habitações, em todo o território nacional, possuíam ligação à rede de esgoto coletiva. Em 2007 foi obrigatório por lei fazer medição e controle de um único parâmetro de controlo biológico em esgotos de origem doméstica – a CBO<sub>5</sub>. Estas mudanças obrigaram à atualização de muitas estações, que em grande número, eram registadas como estações elevatórias de esgoto e gradeamento ou fossas sépticas.

Em Niterói, verificou-se um elevado crescimento populacional e aumento de densidade populacional, mas especialmente na zona de Icaraí em Niterói: houve um aumento do esgoto recebido na estação que era inicialmente de 320 l/s e passou para 950 l/s, numa média de 35 anos. Este aumento limitou com o tempo as opções de tratamento para o tratamento químico. Por questões também económicas, o tratamento naquela estação em específico, é primário e dá-se por coagulação-floculação.

Atualmente o processo de tratamento por coagulação-floculação tem sido desenvolvido e têm surgido diferentes possibilidades de coagulantes e polímeros catiónicos que podem ser aplicados no processo, como alternativas para um processo mais sustentável e rentável. Os produtos utilizados no processo de coagulação-floculação conferem diferentes resultados, dependendo da natureza do esgoto, das suas condições físicas e químicas, assim como das próprias condições de mistura na estação.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho insere-se nesse contexto, com o objetivo de determinar o melhor coagulante a ser aplicado na ETE de Icaraí, química e economicamente.

Com esse fim, é necessário determinar as condições hidráulicas de mistura do coagulante no processo real, as suas condições de sedimentação nos decantadores, bem como a velocidade de sedimentação; a melhor dosagem de aplicação de cada coagulante; a produção de lamas associada ao tratamento respectivo dos coagulante, e, por fim realizar um estudo econômico de aplicação que permita visualizar o coagulante mais vantajoso de aplicação.

## **1.3 Estrutura e e organização da Dissertação**

A dissertação encontra-se estruturada e dividida da seguinte forma: O primeiro capítulo é referente à contextualização do trabalho e objetivos pretendidos; o segundo capítulo aborda toda a pesquisa realizada de coagulantes para aplicação, caracteriza a cidade de Niterói e a empresa onde o projeto foi realizado, aborda os fundamentos teóricos a ter em conta no desenvolvimento da dissertação e que poderão, ou não, influenciar o resultado; menciona também as fórmulas de cálculo hidráulico das velocidades de mistura; o terceiro capítulo descreve a metodologia nomeadamente a coleta, conservação de amostras e os procedimentos adoptados na média dos parâmetros de avaliação ( Turvação, SST, CQO e CBO<sub>5</sub>); no quarto capítulo são analisados e discutidos os resultados; o quinto e último capítulo apresenta todas as conclusões finais e recomendações futura para a empresa.

## 2 Estado da Arte

### 2.1 Introdução ao Tratamento de Águas Residuais no Brasil

#### 2.1.1 Recursos Hídricos – Águas Superficiais

O Estado do Rio de Janeiro encontra-se inserido na Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste. É caracterizada por ser uma das regiões mais desenvolvidas do país e por isso mesmo é apresentada como uma área de grande potencial de conflito entre a demanda de recursos hídricos e a sua disponibilidade - devido à elevada taxa de poluição das águas superficiais.

A qualidade da água da região hidrográfica apresenta uma variedade de fontes poluidoras que podem ser agrupadas em três, segundo a sua origem: i) esgoto doméstico e outros efluentes urbanos; ii) efluentes e rejeitos industriais; iii) poluição difusa em áreas rurais por agrotóxicos, adubos orgânicos e químicos, etc. Em particular nas regiões metropolitanas que são mais bem desenvolvidas, é evidente a concentração da carga poluidora por esgotos domésticos; os lançamentos industriais são, de forma geral, mais bem controlados.

Nesta região o rio mais fundamental no abastecimento de água é o rio Guandu, e no total, a carga orgânica poluidora de origem doméstica estimada para a Região Hidrográfica Atlântico Sudeste é de 1.271 tonCBO<sub>5</sub>/dia, que representa 17% da carga total do país [4].

Para controle e supervisionamento, foi aprovado em 2000, o sistema e a política Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos que levou à fundação da Agência Nacional de Águas (ANA) – para o desenvolvimento, supervisão e controlo do programa. Depois da ANA as agências de gestão encontram-se divididas segundo cada estado: no caso do Estado do Rio de Janeiro a instituição responsável é o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), do qual para os recursos hídricos, a sua atendente é a Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA). A essa agência responde a Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE) responsável por toda a área metropolitana do Rio de Janeiro. Por sua vez, surge o grupo Águas do Brasil, atualmente subcontratados para supervisão do tratamento na cidade de Niterói [4].

#### 2.1.2 Niterói, Rio de Janeiro

Localizada no Estado do Rio de Janeiro, à margem da Baía de Guanabara, Niterói integra a região metropolitana do Rio de Janeiro e dista 10,9 km da grande cidade. É uma cidade muito conhecida pela proximidade ao Rio de Janeiro, por possuir um grande número de obras do arquiteto Óscar Niemeyer e por ter sido a cidade onde se deu origem ao conhecido lema carioca “Gentileza gera Gentileza”.

Niterói possui 487 582 habitantes, numa área de 134 km<sup>2</sup> e a sua população é maioritariamente jovem, caracterizando-se por uma pirâmide etária de forma pirâmide. A sua evolução populacional entre 1991 e 2010 não foi muito elevada. Sendo uma típica cidade brasileira, as suas maiores formas de

transporte são o automóvel, ônibus e barcas, não existindo uma rede de metro ou comboio implantada na cidade. O seu sistema de saúde é majoritariamente constituído por hospitais e clínicas privadas.

O seu desenvolvimento económico provém majoritariamente da prestação de serviços, possuindo também um peso significativo do setor industrial, no seu PIB final de 9,7 milhões de R\$ (2012). Atualmente é considerado como um forte pólo de negócios – o 12º mais importante do Brasil, tendo recebido um elevado índice de investimentos na cidade na ordem de 1,75 bilhões R\$ no ano de 2012 [5].

O município de Niterói é abastecido de água pelo sistema Imunana-Laranjal, operado pela empresa CEDAE. O sistema bombeia água com origem no Rio Macau até à estação de Tratamento de Água Laranjal, na cidade São Gonçalo. De lá, são encaminhados 1750 litros por segundo, para Niterói. A recolha e tratamento de esgoto são da responsabilidade da empresa Águas de Niterói [5].

### **2.1.3 Águas de Niterói, S.A.**

A Águas de Niterói é uma empresa concessionária do Grupo Águas do Brasil. O Grupo Águas do Brasil – Saneamento Ambiental de Águas do Brasil (SAAB) é líder no setor de concessões privadas prestadoras de serviços de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos no país. A sua missão teve início no ano de 1997, na cidade de Paranaguá (PR), e hoje estende-se a 15 municípios, por meio das suas 13 concessionárias. No total possui cerca de 3 mil colaboradores e atende uma população total superior a 6 milhões de habitantes. O total de produção de água bruta e água residual tratada é de cerca de 12800 l/s divididas por 115 estações de tratamento de esgoto e 55 estações de tratamento de água.

Das concessões nomeiam-se Manaus Ambiental (Amazonas); Águas de Araçoiaba, Águas de Esmeralda, Águas de Votorantim, Sanear, Sanej (São Paulo), Águas das Agulhas Negras, Águas do Imperador, Águas de Juturbanaíba, Águas de Nova Friburgo, Águas do Paraíba, Foz Águas 5 e Águas de Niterói (Rio de Janeiro).

O início de atividade da empresa Águas de Niterói teve início em 1999, com apenas na altura, a ETE de Icaraí em funcionamento. A empresa veio substituir a CEDAE, assumindo os serviços de distribuição de água, coleta e tratamento de esgoto. Quando a tomada de posse da empresa, a população atendida com abastecimento de água era de 72% e com ligação à rede de esgoto para tratamento era cerca de 35%.

Ao longo do seu contrato, foi implantado o sistema de distribuição para toda a região Oceânica, construídos 450 km de redes de distribuição de água, 12 km de adutoras e cerca de 30 mil ligações domiciliares, implantados 280 km de rede e 46 elevatórias de esgoto. Foram construídas mais seis ETE's para o tratamento de esgoto, totalizando um total de sete em funcionamento – ETE de Barreto, Cambinhas, Icaraí, Itaipu, Jurujuba, Mocanguê e Toque-Toque. Também foram realizados outros investimentos em programas socio ambientais para a educação populacional e projetos como o “Lagoa Limpa” e “Santo Antônio” que ajudam a minimizar os impactos nas lagoas ou o projeto “Niterói Águas Limpas” que promove a limpeza da Baía de Guanabara.



A concessionária já atingiu os 100% de população abastecida com água potável e os 90% com domicílios ligados à rede de tratamento de esgoto, prevê-se que seja alcançada a margem percentual completa no ano de 2014. Em 2012 alcançou o top 20 no saneamento básico, segundo o Instituto Trata Brasil [6].

Tabela 1 - Indicadores da empresa. Fonte:[6]

<b>Início da Concessão:</b>	<b>1999</b>
<b>Município:</b>	Niterói, RJ
<b>População Urbana:</b>	491807 habitantes
<b>Ligações de Água:</b>	88929 habitantes
<b>Economias de Água<sup>1</sup>:</b>	195128
<b>Ligações de Esgoto:</b>	56572
<b>Economias de Esgoto<sup>1</sup>:</b>	177059

## 2.2 ETE de Icaraí, Niterói

### 2.2.1 Descrição da ETE

A ETE de Icaraí encontra-se localizada na região de maior densidade populacional e num centro urbano de elevado desenvolvimento, a região<sup>2</sup> de Icaraí. Foi a primeira estação de tratamento de esgoto a ser construída e inaugurada em Niterói, sob concessão da CEDAE, na década de 30.

No início da concessão da Águas de Niterói, a ETE apresentava um tipo de tratamento secundário. O esquema apresentado para tratamento era da passagem pela elevatória inicial, seguido para o gradeamento fino (rotativo - 3mm de espessura) e iam diretamente para o reator biológico. Do reator, o esgoto passava para um decantador único. Na década de 80 pensa-se que já havia o projeto licenciado para a alteração do tratamento biológico para físico-químico<sup>3</sup>. O início de construção desse projeto deu-se ainda com a CEDAE, mas só foi finalizado já com a Águas de Niterói. O caudal estimado de tratamento então era de 320 l/s.

<sup>1</sup> Registo de número de ligações individuais de água e/ou esgoto à rede pública.

<sup>2</sup> Aqui, os municípios encontram-se divididos em regiões, é o equivalente à divisão portuguesa de freguesias.

<sup>3</sup> Grande parte dos documentos, incluindo plantas de projetos e outros documentos sobre o funcionamento da ETE foram destruídos no momento de entrada da empresa Águas de Niterói S.A., pelo que não se tem certeza sobre alguns dados antigos do seu funcionamento.

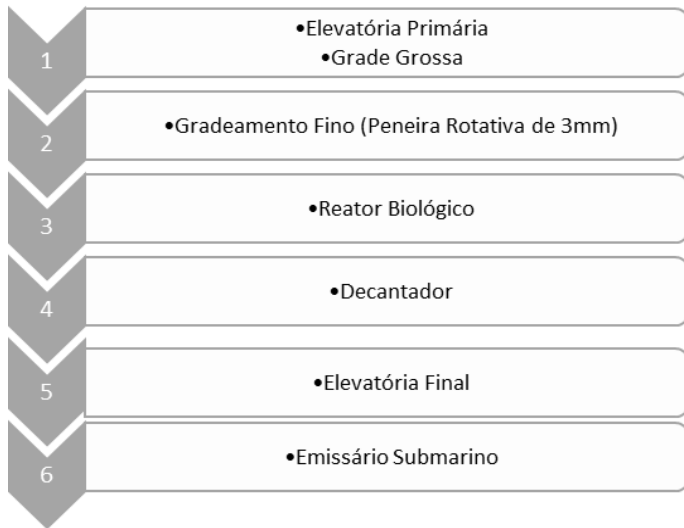


Figura 1 – Esquema do Processo antigo da ETE de Icarai.



Figura 2 – Esquema do Processo Atual da ETE de Icarai.

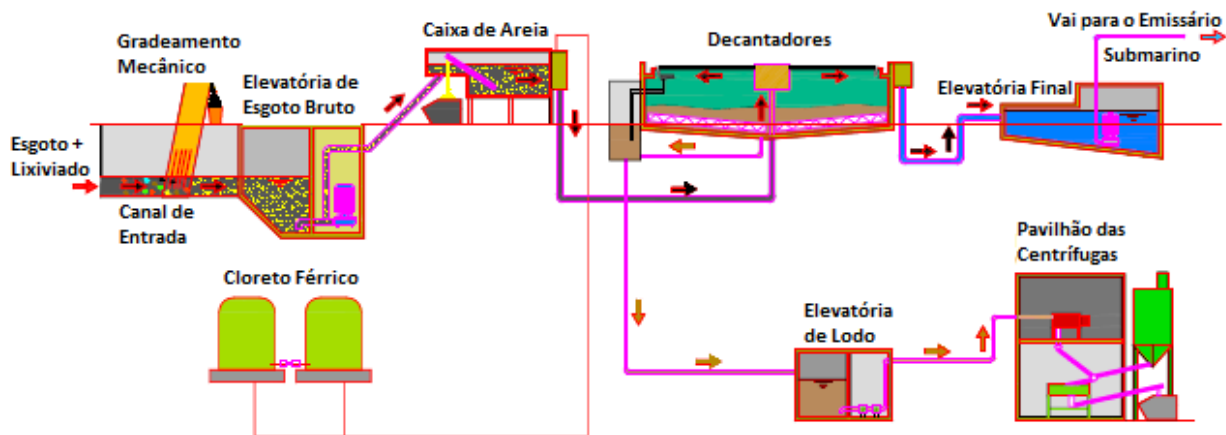


Figura 3 – Esquema Geral do Processo Atual na ETE de Icarai

Hoje em dia o processo geral de tratamento tem início na mesma elevatória inicial, mas segue agora para a caixa de areia para a remoção da areia, passa pela caixa de mistura do coagulante e termina nos decantadores: de acordo com a empresa o tempo de retenção médio na ETE é de 3h [7]. As velocidades e tempos de mistura da fase rápida e lenta, respetivamente, são determinados pela velocidade do escoamento sob pressão desde a caixa de mistura até aos decantadores. O tanque de aeração anteriormente utilizado serve como tanque de horário de ponta e de equalização do caudal doméstico e lixiviado recebido.

A estação foi dimensionada de raiz para funcionar com o coagulante cloreto férrico<sup>4</sup>, havendo a possibilidade de mistura de um polímero para ajuda no processo de tratamento. A estação nunca utilizou polímero, pelo que o processo utilizado até hoje se baseia num processo de fase única: a coagulação química.

A ETE hoje recebe lixiviado proveniente de alguns aterros da localidade, mas passará a funcionar apenas com esgoto doméstico a partir de Janeiro de 2014.

### **2.2.2 Dados de Funcionamento e Características Gerais de Monitoramento**

A ETE foi projetada para uma capacidade máxima de tratamento de 1379 l/s. Durante o ano existe uma variação no caudal recebido na ETE devido à recolha a tempo seco de esgoto<sup>5</sup>. Atualmente a ETE ainda não atingiu a capacidade máxima de funcionamento, sendo que as bombas registam um valor máximo de 1,100 m<sup>3</sup>/s e mínimo de 0,752 m<sup>3</sup>/s. A média é de 0,952 m<sup>3</sup>/s.

Em termos de carga orgânica existem as variações diárias normais ao longo do dia – os picos são atingidos por volta das 9h da manhã e às 21h da noite. A concentração atingida ao longo do dia varia muito de acordo com a época do ano. A maior concentração é atingida na época de menor pluviosidade, ou seja, no inverno (Julho, Agosto, Setembro), e as concentrações mais baixas são atingidas nos meses de verão (Dezembro, Janeiro, Fevereiro), que se caracteriza pela época de chuva tropical no Brasil.

Os decantadores, em alturas de maior pluviosidade, afogam e a água entra para o poço de recolha de gordura superficial e eventualmente para a elevatória de lodo quando estes enchem.

O facto de não haver um tanque de mistura rápida e lenta, assim como a falta de um sistema de alteração de pH previamente dimensionado e instalado, limita a possibilidade de alteração do processo químico. A incerteza do caudal recebido para tratamento, devido à variação causada pela grade fina, poderá alterar o resultado final devido à incerteza da concentração do coagulante na água.

Apesar das limitações, a coagulação química das partículas é a forma mais rápida e eficiente para alcançar os resultados pretendidos e face ao caudal recebido.

### **2.2.3 Objetivos de Qualidade**

A legislação no Brasil que garante padrões mínimos de qualidade dos efluentes lançados é vasta e subdivide-se de acordo com legislação nacional, estadual e municipal. A nível Nacional o país é guiado pela Resolução N<sup>o</sup>357, de 17 de Março de 2005 e Resolução N<sup>o</sup>430, de 13 de Maio de 2011 que é uma atualização e complementa a primeira. Nela são classificadas os corpos de água em três seções, 13

---

<sup>4</sup> O manual de instruções e guia da ETE, enviado pela empresa de consultoria que realizou o seu projeto de construção, especifica sempre o coagulante como “cloreto férrico”.

<sup>5</sup> Recolha a tempo seco de esgoto – tipo de recolha realizada durante os meses do ano sem chuva em Niterói. No Brasil existem conjuntos habitacionais que possuem um tipo de construção que não permite ligação direta à rede de coleção de esgoto (exemplo: favelas). Como forma de tentativa de tratamento desse esgoto, o mesmo é conduzido por vias a céu aberto (impossibilidade de construção subterrânea). Assim, durante a época seca, o esgoto escoado nestes canais referidos dá entrada para tratamento na ETE..

classes (de acordo com a funcionalidade da água) e os respectivos padrões de classificação e emissão de efluentes, respetivamente. É a legislação mínima obrigatória, sendo que todas as outras diretrizes, resoluções ou normas de qualidade, são baseadas nestas duas resoluções, estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

O funcionamento da ETE é regido pela Licença de Operação emitida pelo ENEA. Esta licença habilita a empresa responsável por operar a estação de tratamento de esgotos ETE de Icaraí e lançar seus efluentes em emissário submarino. O seu período de validade abrange cinco anos e a sua emissão garante o cumprimento, por parte da ETE, de todos os decretos-lei obrigatórios federais, estaduais e municipais.

Para a obtenção da licença de operação, é necessário reger-se segundo as seguintes normas e diretrizes de controlo de poluição:

- i. NT-202. R-10 – Critérios e Padrões para lançamento de Efluentes Líquidos
- ii. DZ-215 R-4 – Diretriz de Controlo de Carga Orgânica Biodegradável
- iii. DZ-942.R-7 – Diretriz do programa de Autocontrolo de Efluentes Líquidos PROCON-ÁGUA
- iv. DZ-1310.R-7 – Sistema de Manifesto de Resíduos
- v. Resolução nº001/90 do CONAMA de 08.03.90 (ruído emitido).

Através de i e iii são estabelecidos os critérios e padrões de lançamento de efluentes líquidos, definindo os limites máximos de concentração, tipos e frequência de análise aos efluentes líquidos para concentração de químicos, suspensões físicas e químicas; ii define a necessidade percentual (%) de redução da carência orgânica biodegradável (CBO<sub>5</sub>), de acordo com a contribuição unitária de esgoto (g CBO<sub>5</sub>/dia) e área edificada (m<sup>2</sup>). Os casos iv e v não se aplicam ao projeto em estudo. Todas estas normas baseiam-se na legislação federal – Resoluções N<sup>o</sup>357 e N<sup>o</sup> 430<sup>67</sup>, como foi mencionado anteriormente.

Todos os resultados têm que ser analisados por um laboratório credenciado. No caso da empresa, o único laboratório credenciado que possui fica localizado em Petrópolis, a uma distância de 77 km da ETE. Devido a essa distância, as análises são realizadas por um laboratório externo contratado.

A partir de 2012 este controlo de análises passou a ser realizado online, através da submissão dos resultados das análises – ordem veiculada à diretriz DZ-942.R-7 (PROCON-ÁGUA)<sup>8</sup>. Os critérios avaliados dizem respeito a características físicas e concentrações químicas de compostos, sendo que no total são 21 parâmetros – 17 obrigam a análises mensais e 4 a análises diárias (pH, Temperatura,

---

<sup>6</sup> Apesar da legislação nacional/federal ser mais recente que as outras normativas (a legislação nacional passou a existir mais tarde do que a legislação por estado), a legislação estadual tem que se encontrar sintonizadas com as legislações CONAMA.

<sup>7</sup> Apesar de se localizar nas proximidades da Baía de Guanabara e o efluente ser diretamente lançado nela, não existe legislação específica de supervisionamento ao lançamento de esgoto naquela área.

<sup>8</sup> Até 2012 o registo das análises era realizado em excel e enviado por email.

Materiais sedimentáveis, CBO<sub>5</sub>). Encontra-se disposto em Anexo um formulário completo com os todos os parâmetros avaliados.

Tabela 2 – Valores legislativos estipulados pelas normas NT-202.R-10, NT-215.R-4 e Resolução N°430

Critérios de Controle	Resolução N°430 13 de Maio de 2011	NT-202.R-10	NT-215.R-4
Data	13 de Maio de 2011	12 de dezembro de 1986	8 de novembro de 2007
pH	5 a 9		-
Temperatura (°C)	<40°C		-
Materiais Sedimentáveis	1mL/L <sup>9</sup>		-
Sólidos Grosseiros e Materiais Flutuantes	Ausência		-
Cor	-		-
Óleos	Minerais <20mg/L Vegetais e gorduras animais <50mg/L		-
SST	Remoção mínima de 20%		-
CBO <sub>5</sub> (redução %)	-	10	≥30%

Segundo a Coordenação da ETE foi pedido para os testes efetuados em laboratório procurarem atender a melhor razão eficácia/custo dos coagulantes em teste: a nível de turvação, CQO, SST e CBO<sub>5</sub>. Os parâmetros de avaliação sólidos sedimentáveis, óleos e sólidos grosseiros que são referidos, não necessitam de avaliação pormenorizada por já darem entrada com valores muito baixos ou nulos.

#### 2.2.4 Trabalhos Anteriores Realizados

A ETE de Icaraí participou já num projeto de estudo que foi publicado no livro da coleção Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), volume 3, capítulo 8 – “Tratamento Combinado de Lixiviados de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos com Esgoto Sanitário”. O estudo utilizou esgoto doméstico da ETE de Icaraí (Niterói, RJ) para um estudo de coagulação-floculação,

<sup>9</sup> Na NT-202.R-10 é alegado que o limite para materiais sedimentáveis, em casos de lançamentos subaquáticos em mar aberto ou em rios e estuários, será estabelecido pelo FEEMA.

<sup>10</sup> “Serão estabelecidos pelo FEEMA através de diretrizes específicas” – DZ-215.R-4

utilizando vários coagulantes, com concentrações conhecidas de lixiviado do Aterro Morro do Céu (Niterói, RJ).

Os coagulantes utilizados foram o Cloreto Férrico (Vetec), Policloreto de Alumínio (Panfloc PC 15 – da empresa Pan-americana), Sulfato de Alumínio (Vetec), Tanino SL e Tanino SG (ambos da empresa TANAC). O procedimento de mistura adotado no estudo foi: etapa mistura rápida a 150 rpm (dois minutos); mistura lenta a 30 rpm (20 minutos) e decantação por 30 minutos.

Também foi elaborado um estudo da empresa Águas de Niterói em laboratório de comparação do Cloreto Férrico com Panfloc.

Os resultados são mencionados no capítulo 2.3.2 – Coagulantes/Floculantes.

## 2.3 Coagulação-Floculação

A coagulação-floculação insere-se no processo de tratamento como um dos tipos de tratamento secundário disponíveis para tratamento, do tipo físico-químico. O seu objetivo é a desestabilização das partículas dispersas na água, que de outra forma não sedimentam, e que a sua agregação se dê em moldes tais, que possibilitem a sua máxima sedimentação, dependendo do tipo de efluente [2].

A teoria química deste tipo de processo é bastante complexa e as reações simplificadas que descrevem o processo de agregação e sedimentação das partículas servem apenas como uma aproximação, podendo não acontecer como indicado ou previsto. As reações não são completas, como muitas reações químicas, e o seu rendimento varia ainda com as características da água residual<sup>11</sup>.

No geral, o processo resume-se à adição de um coagulante e um floculante (maioritariamente químicos). O primeiro desestabiliza as partículas e abre oportunidade para novas reações, enquanto o segundo é um produto usualmente orgânico de elevado peso molecular, que atua como um polímero linear, através da desestabilização previamente provocada, promove interações entre estruturas aleatórias de baixo peso molecular, soltas e porosas agregando-as e permitindo que sejam separadas exclusivamente por flutuação ou sedimentação gravítica [8]. Nesta segunda parte do processo, floculação, destacam-se dois tipos de processos: a) a microfloculação (também conhecida como *floculação pericinética*) cuja agregação se dá apenas pelo movimento natural das partículas em suspensão e b) macrofloculação (*floculação ortocinética*) em que os choques entre as partículas são promovidos por variados tipos de agitação artificial (como mecânica ou centrífuga), velocidades e tempos de mistura. Os processos de coagulação-floculação são sequenciais [9].

### 2.3.1 Caracterização do Processo de Coagulação-Floculação e Fatores Intervenientes

#### 2.3.1.1 Partículas em Suspensão – Colóides

As partículas coloidais constituintes possuem tipicamente uma carga superficial negativa em meio aquoso. O seu tamanho específico (entre 0,01 e 1µm) e a sua constituição por dupla camada faz

---

<sup>11</sup> As características de uma água residual variam ao longo do dia, assim como ao longo do ano.

com que as forças atrativas entre elas sejam inferiores às forças repulsivas das respectivas cargas elétricas: resultando na sua suspensão natural ao longo do tempo de uma forma estável e equilibrada, que para serem removidas necessitam da intervenção de um agente externo [9].

A carga externa da camada dos colóides desenvolve-se mais usualmente por: 1) substituição isomorfa de íons metálicos dos minerais por outros que se encontram na solução de valência mais baixa; 2) imperfeições na estrutura superficial que permitem outras formações; 3) adsorção de íons preferenciais de substâncias químicas inertes que se dissolvem na água (como OH<sup>-</sup> e compostos orgânicos contendo COOH (carboxílico) e NH<sub>2</sub> (amina) que se ionizam); 4) ionização (dissociação) de grupos químicos à superfície da partícula [9].

#### 2.3.1.2 pH

O pH é um dos fatores intervenientes mais importantes da otimização do processo de coagulação-floculação. Assim como o coagulante, dosagem, velocidade e tempo de mistura, é usual realizar ensaios de otimização do pH no processo.

É recomendado que o processo de coagulação-floculação decorra na gama ótima de pH do coagulante a ser considerado e o seu ajuste é realizado antes de se dar início à coagulação-floculação. Dependendo do coagulante, efluente a tratar e do próprio fabricante, a gama de pH varia bastante (ver no capítulo 2.3.2).

A sua influência pode ser mais ou menos variável, dependendo muito também da temperatura da água.

#### 2.3.1.3 Alcalinidade Natural

A maioria dos coagulantes provocam uma alteração de pH consequente, atuando como ácidos em solução. A sua influência depende se são aniões ou catiões. Os catiões sódio, cálcio e magnésio, por exemplo, não possuem um efeito muito significativo no processo, já os aniões divalentes, como o anião sulfato, levam a um alargamento da gama de pH ótimo (do coagulante a ser aplicado) para valores de pH mais ácidos. É necessário tomar atenção para que os desvios estequiométricos devido à presença dos catiões e aniões, não interfiram demasiado com a gama de pH ótimo. O aumento da alcalinidade permite determinar o pH ótimo e aplicá-lo no processo; depois de um máximo (dependendo do efluente a ser tratado) o pH deixa de agir como um fator de otimização do processo de tratamento, passando a ser apenas um fator limitativo na legislação, ao qual é obrigatório o seu cumprimento [10].

#### 2.3.1.4 Potencial Zeta ( $\zeta$ )

O potencial zeta traduz o gradiente de concentração que mede a distância desde o início da camada difusa até ao centro puro da solução e é diretamente proporcional à estabilidade dos colóides: quanto maior o potencial zeta em módulo, maior a força de repulsão e mais estável é a partícula em suspensão. A variação deste potencial depende ainda da constituição característica e tamanho da matéria coloidal, pelo que, para matéria particulada de maior tamanho, a curva de variação do potencial zeta diminui com a adição de desestabilizadores (coagulantes) [11]. No processo de coagulação-floculação, o potencial

elétrico é influente porque se traduz pela dosagem ótima de coagulante adicionada ao processo de coagulação-floculação, que permite à matéria coloidal atingir o ponto isoelétrico.

É medido pela equação de Helmholtz (Equação 1) em mV. Os valores típicos em águas residuais variam entre -12 e -40 mV.

$$\zeta = \frac{4\pi\mu}{E\varepsilon} v$$

Equação 1 – Potencial Zeta

Com:  $\zeta$  – potencial zeta (mV);  $\mu$  – viscosidade (poise);  $E$  - gradiente de potencial (V);  $\varepsilon$  – constante dielétrica do meio (água – 80,36 a 20°C);  $v$  - mobilidade (cm/s).

### 2.3.1.5 Temperatura

A temperatura do efluente influencia diretamente a dissolução do coagulante no efluente, velocidade de reação e a sua sedimentação. A diminuição da viscosidade é diretamente proporcional ao aumento de temperatura: a temperatura afeta diretamente a força das ligações na fase aquosa, diminuindo o rendimento do processo de tratamento. A sedimentação dos flocos formados também é dificultada pelo aumento da densidade da água com a diminuição de temperatura.

Apesar dos fatores acima referidos serem intervenientes no processo químico de tratamento por coagulação-floculação, é o coagulante/floculante utilizado (a seguir mencionado em 2.3.2 – Coagulantes/Floculantes) e a sua velocidade e tempo de mistura (2.4 - Hidráulica) que possuem maior influência nos fatores acima mencionados e, conseqüentemente, possuem maior efeito na qualidade do clarificado final [12].

### 2.3.2 Coagulantes/Floculantes

Com a evolução do processo de tratamento químico de coagulação/floculação e a necessidade crescente de novos coagulantes, surgidos pela necessidade de uma demanda mais económica, eficiente e o mais natural possível para o meio ambiente, o número de coagulantes utilizados no mercado tem vindo a aumentar de forma progressiva. Por muitos anos que o único coagulante utilizado era o sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ), até que na década dos anos 60 entraram também em cena os polímeros orgânicos [13].

Num processo de investigação das opções mais modernas que existem como opção para uso, importa saber quais os coagulantes mais investigados e publicados na literatura para serem analisados posteriormente em laboratório. Nesse sentido, entre os coagulantes/floculantes mais mencionados e publicados em literatura nomeiam-se o Quitosano e Tanino - de origem orgânica – e os inorgânicos: sais de ferro (como Cloreto Férrico, Sulfato Férrico e ferroso), sais de alumínio – neste caso Sulfato de Alumínio ou Policloreto de Alumínio (PAC) - ou ainda Hidróxido de Cálcio. Todos são produtos químicos atualmente fabricados e disponíveis no mercado.



Atualmente os coagulantes mais utilizados, em indústria na Europa e América do Norte, nomeiam-se por sais de ferro e de alumínio [14, 15], hidróxido de cálcio [16] e os sulfatos e/ou cloretos de alumínio e/ou ferro. No Brasil os principais coagulantes químicos usados são o cloreto férrico, sulfato ferroso (a mistura dos dois reagentes), eventualmente sulfato de alumínio e começa-se atualmente a testar a aplicação do PAC.

Por uma questão económica, para teste em laboratório, foi definido selecionar quatro coagulantes para análise e a escolha foi feita de acordo com o maior número de artigos e publicações referidas. Comparando e sublinhando nas tabelas respetivas os coagulantes mencionados em literatura (Tabela 3) com os fornecidos no mercado do Brasil (Tabela 4), reduzimos os coagulantes para um conjunto eventualmente mais interessante para testar em laboratório – ver Tabela 5.

Tabela 3 - Coagulantes mais referidos em literatura.

Orgânicos	% de Citações <sup>12</sup>	Inorgânicos	% de Citações <sup>5</sup>
Quitosano	3,77%	<u>Cloreto Férrico</u>	<u>15,09%</u>
		Sulfato Férrico	7,55%
		Sulfato Ferroso	3,77%
<u>Tanino</u>	<u>7,55%</u>	<u>Sulfato de Alumínio</u>	<u>15,09%</u>
		<u>Policloreto de Alumínio (PAC)</u>	<u>22,64%</u>
		Hidróxido de Cálcio	1,89%

Tabela 4 - Coagulantes Fornecidos no mercado Brasileiro.

Orgânicos	Inorgânicos
Tanato Quartenário de Amônio (Taninos) Poliaminas	Aluminato de Sódio Líquido
	<u>Cloreto Férrico Líquido a 40%</u>
	Cloreto de Alumínio
	Cloreto Ferroso
	Silicato de Sódio
	Sulfato férrico
	Sulfato Ferroso
	<u>Policloreto de Alumínio</u>
	<u>Policloreto silicato de Alumínio</u>
	<u>Sulfato de Alumínio</u>

Tabela 5 – Coagulantes Selecionados para o estudo.

<b>Cloreto Férrico</b>
<b>Policloreto de Alumínio (PAC)</b>
<b>Sulfato de Alumínio</b>
<b>Tanino</b>

<sup>12</sup> Num total de 100% equivalente a 51 citações totais dos coagulantes (em 35 artigos).

Entre o Sulfato férrico e o Tanino foi selecionado o tanino por ser um coagulante de base orgânica que poderá ser eventualmente interessante para a empresa, quer pela área natural em que se encontra inserida, quer pela sua política de proteção ambiental. A semelhança química entre o cloreto e o sulfato férrico descarta a necessidade de teste a ambos, quimicamente tão semelhantes.

### 2.3.3 Cloreto Férrico

O cloreto férrico é um coagulante inorgânico comercializado sob a forma líquida, de concentração 40%. A densidade é de 1400 kg/m<sup>3</sup>[17].

Em literatura, e segundo os resultados publicados, coagulantes como o sulfato de alumínio [18, 19] ou o sulfato ferroso [19] permitem obter melhores resultados no tratamento de águas. O cloreto férrico, no entanto, obteve melhores resultados no tratamento de águas face ao tratamento por nanotubos de carvão [20], estudado recentemente na aplicação em tratamento de águas. As condições ótimas determinadas variam entre uma dose de 500-550 mg/L [21], pH no intervalo 5.7-6.6 [21], velocidades e tempos de agitação [21]: rápida de 100-150 rpm (2min) [21, 22]; lenta de 20 rpm (20 min) [22].

Em estudos de laboratório (ver 2.2.4) foi testada a reação do cloreto férrico em esgoto (da ETE de Icarai) misturado com diferentes concentrações de lixiviado (previamente calculadas) – dados de procedimento e fornecedor do coagulante descritos em 2.2.4. A dose testada foi para todas as amostras 20 mg/L e os resultados alcançaram eficiências de remoção de 36-56% na CQO e 24-54% para turvação<sup>13,14</sup> [23]. Os resultados deste estudo que foram publicados não foram concordantes com os artigos em literatura: no estudo, o cloreto férrico foi o que apresentou melhores resultados de clarificação e remoção de CQO, face aos coagulantes de sulfato de alumínio, Tanfloc e Panfloc (ao contrário das publicações referidas).

### 2.3.4 Policloreto de Alumínio – Panfloc/PAC

O Policloreto de Alumínio é um coagulante produzido num processo industrial, de fórmula química geral  $[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$  com  $1 \leq n \leq 5; m \leq 5$  [24]: a fórmula química específica do Policloreto de Alumínio varia entre fornecedores, pelo que é importante ter em atenção os diferentes coagulantes de Policloreto de Alumínio disponíveis no mercado e a variação de cada espécie nos resultados, face à água específica a tratar.

O Panfloc é conhecido pela sua eficiência de remoção no tratamento de águas, em processo de coagulação, na ordem dos 60%/70% [25] na remoção de CQO e de 90%/99% [25] 77,7% [26] na

---

<sup>13</sup> Não foi realizado o ajuste de pH do esgoto e lixiviado (média de 7-8) para a realização do procedimento experimental. Os testes foram realizados com uma velocidade rápida de 150 rpm (durante 2min) e 30 rpm (durante 20 min), seguidos de uma decantação de 30 min.

<sup>14</sup> Nestes testes realizados apenas foram analisados os parâmetros de CQO e turvação. A DBO não foi medida, apesar de ser um parâmetro obrigatório por lei, a CQO apresenta resultados mais rápidos de medição e confiáveis.

turvação e pelas vantagens de ser um coagulante facilmente adaptável às condições de tratamento da água a tratar (pH, temperatura, turvação inicial), conjugado ainda à formação de flocos compactos, pesados e de rápida sedimentação [24, 25, 27] – em [28] o panfloc registou tempos de sedimentação mais demorados do que o cloreto férrico. No geral, o panfloc foi considerado como tendo melhores resultados face ao sulfato de alumínio [25, 27], sulfato ferroso e poliférrico (PFS) [27], cloreto férrico [25] e poliacrilamida (PAM) [27].

Segundo ainda a literatura, os tempos e velocidades de agitação ótimos variam entre: agitação rápida de 200-250 rpm (1 a 5 minutos) [25, 26]; agitação lenta de 50 rpm (15-20 minutos) [25, 26]; sedimentação de 20-30 minutos [25, 26]. Em relação ao pH ótimo foi determinado no intervalo de 6-7 [26, 27] e quanto às doses ótimas verificadas, variam entre 15 mg/L, 60 mg/L [25].

No seguimento da investigação PROSAB [23], já referida em 2.3.3 e 2.2.4, o Panfloc foi testado em águas residuais de origem doméstica da ETE de Icarai e obteve reduções na gama dos 35-74% para a CQO e 28-47% para turvação (dosagem aplicada de 20 mg/L – valor concordante com as restantes publicações). As eficiências apresentadas foram inferiores às dos restantes coagulantes.

Para além deste estudo, a direção da ETE realizou também um teste piloto com o Panfloc e outro em laboratório, utilizando uma amostra regular da ETE de Icarai (de concentração de lixiviado desconhecida). Do teste piloto não foi possível recolher os resultados obtidos<sup>15</sup>. Em laboratório, os resultados não foram medidos, só fotografados e as dosagens de teste aplicadas variaram entre 23-142 mg/L – ver ANEXO V. Como resultado, a clarificação na água comparativamente ao cloreto férrico foi muito inferior, mesmo com a dose de 95 mg/L que obteve os melhores resultados.



Figura 4 - Água Tratada com Cloreto Férrico (à esquerda) e Panfloc (à direita).

---

<sup>15</sup> As análises à qualidade de água na entrada e saída são avaliadas por um laboratório externo contratado e são apenas analisados os parâmetros DBO, CQO, SST e turvação. Como os relatórios do laboratório não identificam o coagulante usado no dia, era necessário conhecer a data exata da realização do teste piloto, que não foi possível.

### 2.3.5 Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio é comumente aplicado e estudado segundo duas fórmulas químicas:  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  [29] e  $Al_2.(SO_4)_3$  [30]. É um coagulante conhecido por bons resultados obtidos quando a sua aplicação no processo de coagulação-floculação mas possui a maior desvantagem de ser conhecido por efeitos adversos para o meio ambiente e para a saúde humana (como o potencial desenvolvimento de doenças cancerígenas ou Alzheimer) com as concentrações de alumínio residual, não degradável, na água tratada. Pelo mesmo motivo, possui também a alta produção de lamas associada [31].

Em relação às suas condições ótimas de procedimento, o seu pH foi determinado em torno dos 6-6,5 e a dose ótima com 60 mg/L ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) [29] e 27.2 mg/L ( $Al_2.(SO_4)_3$ ) [30]. Os resultados obtidos na avaliação dos parâmetros foram sempre elevados, independentemente do tipo de efluente tratado:

- Para  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ : 83-87%, 65-83% e 55-88% respectivamente para SST, CQO e DBO [29, 32].
- Com a utilização de  $Al_2.(SO_4)_3$ : 78% e 75% para a CQO e turvação, por ordem respectiva [30].

Em comparação com outros coagulantes verifica-se que existem casos em que o sulfato de alumínio produz flocos mais fortes e maiores que o cloreto férrico [33] e outros em que são piores [25], assim como os resultados foram mais eficazes na remoção das impurezas.

Quando testado com as amostras da ETE de Icarai, o sulfato de alumínio apresentou eficiências de 30-45% na remoção da CQO e 28-46% para a turvação. Dos coagulantes testados foi o que apresentou resultados menor eficiência para a mesma dosagem de aplicação (20 mg/L) [23].

### 2.3.6 Taninos - Tanfloc

O tanino é um composto que pode ser utilizado como coagulante e floculante. Tem origem no metabolismo secundário de espécies vegetais e é facilmente encontrado em frutas, folhas e sementes de árvores de espécies como *Castanea*, *Quercus* ou árvores tropicais como a *Acacia*, *Schinopsis* [34], [35].

O seu processo de extração e produção para coagulantes à base de tanino diverge de acordo com a fonte produtora e existem diversas famílias químicas associadas resultantes das associações feitas ao tanino original. No Brasil, um dos coagulantes tem por base a lixiviação aquosa da espécie *Acacia mearnsii* e a marca é patenteada pela TANAC. São incluídas na estrutura do tanino sais solúveis, gomas hidrossolúveis e nitrogénio quaternário para conferir uma consistência catiónica [34]. O Tanfloc é considerado o produto bastante económico, apresenta a vantagem de não apresentar vestígios tóxicos após o tratamento, mas é um produto que apresenta restrições quanto ao seu armazenamento [23].

De acordo com as publicações, o produto é considerado um bom agente coagulante e floculante no que toca ao tratamento de águas e pode ser equiparado ao resultado obtido no tratamento à base de alumínio: 90%, 50%, 50% de remoção da turvação, na CQO<sub>5</sub> e DBO<sub>5</sub>, respectivamente com dosagens aplicadas de 40ppm [34]; e, pela mesma ordem de referência, 100%, 40% e 60% com 92,2 mg/L [1]. Outras publicações mais recentes e ensaios mostraram a consistência de bons resultados de outros

floculantes à base de taninos [35, 36] e a sua aplicação na remoção de metais  $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  e  $Cu^{2+}$  aquando o tratamento de águas [37].

No caso do Tanfloc as melhores condições de remoção foram atingidas para uma dosagem de 92,2 mg/L [34] ou 100 ppm [34]; pH entre 6-7<sup>16</sup>; velocidade de agitação de 100 rpm (2min), seguido de 30/40 rpm por 20/30 min e sedimentação por 20/30 min<sup>17</sup> [1, 34].

Mais uma vez, de acordo com 2.2.4, o Tanfloc SG e SL foram igualmente testados. Os resultados obtidos variaram entre 34-51% (Tanfloc SG) e 30-65% (Tanfloc SL) na remoção de CQO e 50-78% para a turvação (Tanfloc SL<sup>18</sup>). O Tanfloc SL foi o coagulante que apresentou os melhores resultados na remoção de turvação, e, considerando os parâmetros de remoção foi o 2º melhor coagulante aplicado [23].

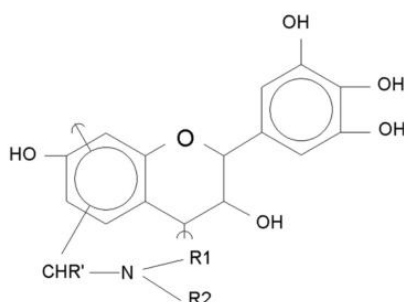


Figura 5- Estrutura Estimada do Tanfloc [1]

Para além destes coagulantes atuais é importante mencionar dois reagentes de futura aplicação com elevado potencial no mercado, dependendo do seu futuro custo económico: o sulfato de titânio e os coagulantes da categoria global “Material Híbrido”. São coagulantes que foram referidos em literatura como coagulantes de elevado potencial. Foi ainda publicado um estudo relevante de comparação de nanotubos microscópicos de carvão mas que provou uma eficiência mais baixa do que a mínima desejável e comparada com os coagulantes atualmente utilizados.

O sulfato de titânio é apresentado como um substituto futuro do sulfato de alumínio. Apresenta características de semelhança estrutural, densidade e tamanho dos flocos em relação ao sulfato de alumínio, sendo que o sulfato de titânio é apresentado com maior eficiência do que o sulfato de alumínio. Possui ainda a vantagem de possuir uma toxicidade muito reduzida, de tal forma que o titânio é raramente referido como parâmetro de controlo de qualidade no tratamento à água. A sua recuperação química das lamas produzidas é uma forte solução aos problemas de disposição de lamas resultantes do tratamento.

<sup>16</sup> No caso da referência, o pH inicial (pH=8) não foi ajustado. 34. J. Beltrán-Heredia and J. Sánchez-Martín, *Municipal wastewater treatment by modified tannin flocculant agent*. Desalination, Elsevier, 2009. **249**: p. 353-358.

<sup>17</sup> Para a precipitação de metais o pH deve ser otimizado na gama 8-9 e deixar sedimentar por 1h.

<sup>18</sup> Não foram realizadas medições para a eficiência de turvação na aplicação de Tanfloc SG.

O material híbrido define-se como material composto alterado a nível micro e/ou macromolecular e com as propriedades físicas/químicas, de dois ou mais componentes independentes, numa só matriz polimérica. Estes coagulantes quimicamente modificados podem ser catalogados de acordo com os diferentes grupos agregados, em conjunto de dois<sup>19</sup>: o objetivo destas modificações realizadas é de aumentar a capacidade de agregação entre as partículas colóides suspensas na água residual e a sua sedimentação, de forma a melhorar o rendimento do processo da coagulação-floculação e juntar todo o processo num processo único, em vez das duas fases tradicionalmente usadas: coagulação e floculação. Os seus produtos resultantes incluem químicos e compostos orgânicos que até agora não tinham sido utilizados para coagulação-floculação, e, coagulantes atuais fortalecidos nas suas vantagens de aplicação pelo novo grupo adicionado.

## 2.4 Hidráulica

### 2.4.1 Teorema de Bernoulli

$$\Delta H = \left( Z_1 + Y_1 + \frac{Q^2}{2gS_1^2} \right) - \left( Z_2 + Y_2 + \frac{Q^2}{2gS_2^2} \right)$$

Equação 2 – Equação de Bernoulli Simplificada

Com:  $\Delta H$  – Energia Total Mecânica (m);  $Z$  – Cota Topográfica, m;  $Y$  – altura/profundidade da água na seção, (m);  $Q$  – Caudal do escoamento na seção ( $m^3$ );  $g$  – aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  $S$  – seção molhada ( $m^2$ ).

Equação simplificada, considerando  $\theta = 0$ ;  $\beta = 1$  e  $\alpha \cong 1$  [38].

### 2.4.2 Gradiente de Velocidade

A mistura é medida pelo Gradiente de Velocidade de Mistura que quantifica a potência dissipada por unidade de volume. A equação define-se em:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

Equação 3 – Gradiente de Velocidade de Mistura

Em que  $G$  ( $s^{-1}$ ) – Gradiente de Velocidade;  $P$  (W) - Potência do motor;  $\mu$  ( $N.s/m^2$ ) – Viscosidade Dinâmica;  $V$  ( $m^3$ ) – Volume [3].

<sup>19</sup> inorgânico/inorgânico; inorgânico/orgânico; inorgânico/polímero natural; inorgânico/ bio polímero natural; orgânico/orgânico; orgânico/ polímero natural

Tabela 6 – Gradientes de Velocidade para o Processo de Coagulação-floculação e tempos de mistura.

Fonte: Adaptado de [3].

	<b>Tempo de Detenção</b>	<b>G, s<sup>-1</sup></b>
<b>Mistura Rápida</b>	5-20 s	250-1500
<b>Mistura Lenta</b>	10-30 min	30-150

### 2.4.3 Carga Hidráulica Superficial (CHS) e Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)

O dimensionamento dos decantadores necessitam de atender a estes dois critérios. O seu cálculo é realizado de acordo com as equações:

$$CHS \left( \frac{m^3}{d} \right) = \frac{Q \left( \frac{m^3}{d} \right)}{A \left( m^2 \right)}$$

Equação 4 – Fórmula de Cálculo da CHS

Em que: Q – Caudal recebido por decantador (unitário) (m<sup>3</sup>/d); A – Área Superficial do Decantador (m<sup>2</sup>).

$$TRH \left( h^{-1} \right) = \frac{V \left( m^3 \right)}{Q \left( \frac{m^3}{h} \right)}$$

Equação 5 – Fórmula de Cálculo do TRH

Em que: V – Volume do Decantador (m<sup>3</sup>); Q – Caudal recebido por Decantador (Unitário) (m<sup>3</sup>/h).

Tabela 7 – Valores de Dimensionamento de Decantadores gravíticos [40].

<b>Parâmetro e unidades</b>	<b>Valor</b>
<b>Carga superficial hidráulica para caudal médio, m<sup>3</sup>/d/m<sup>2</sup></b>	<b>24 – 36</b>
<b>Carga superficial hidráulica para caudal máximo, m<sup>3</sup>/d/m<sup>2</sup></b>	<b>50</b>
<b>Tempo médio de retenção hidráulica, horas</b>	<b>2,5 – 3,5</b>
<b>Tempo mínimo de retenção hidráulica, horas</b>	<b>1,5 – 2,0</b>

### 2.4.4 Condições e Equipamentos de Mistura

Para o processo de mistura é habitual possuir-se duas caixas de mistura com diferentes propriedades e características físicas que permitam a mistura rápida e depois lenta.

Existe uma variedade de equipamentos distintos que variam da fase coagulação para floculação, mas em ambas se subdividem por do tipo hidráulico ou mecânico:

- ❖ Hidráulicos - geram uma variação hidráulica suficientemente grande que garanta uma mudança brusca do nível da água para um nível que lhe confira as características hidráulicas desejadas. Ex: Calha parshall, descarregador triangular.
- ❖ Mecânicos - com motor. Em caixas de mistura para o efeito, são colocados agitadores mecânicos do tipo axial (movem o líquido paralelamente ao eixo) ou radial (movimento perpendicular ao eixo). De acordo com o número de rotações (rpm) existem diferentes disponibilidades [10, 12, 39]:
  - Pás – correntes axiais e tangenciais – 2 a 15 rpm
  - Turbinas – correntes radiais e tangenciais – 10 a 150rpm
  - Propulsores – Correntes Axiais – 150 a 1500rpm [12]

#### **2.4.5 Sedimentação**

O processo de sedimentação é o processo utilizado após o tratamento do efluente, para garantir a maximização de uma separação líquido-sólido, clarificando o sobrenadante tratado. O seu princípio baseia-se na separação gravitacional de partículas cuja densidade seja superior à da água.

De acordo da concentração e da tendência entre as partículas a remover é possível definir três tipos de sedimentação: sedimentação discreta, sedimentação floculenta ou sedimentação de zona ou em “manto”<sup>20</sup>. Na sedimentação discreta as partículas não interagem entre elas, as partículas permanecem com dimensões e, por consequência, as velocidades são constantes ao longo de todo o processo; a sedimentação do tipo floculenta é caracterizada pela alteração das partículas ao longo da sedimentação, no qual elas se agregam e a velocidade aumenta; a sedimentação de zona ou em “manto” é caracterizada pela ocorrência da separação das lamas biológicas no tratamento secundário [12].

#### **2.4.6 Decantadores**

No dimensionamento de decantadores é necessário ter em conta principalmente a Carga Hidráulica Superficial. É necessário também admitir uma razão de altura/largura do decantador e considerar o caudal recebido para determinar o número de decantadores necessários.

- ❖ Tradicionalmente podemos subdividir os tipos de decantadores possíveis de acordo com a direcção do escoamento da água:
  - Decantadores do tipo Horizontal – o movimento da água tem direcção longitudinal; o decantador é caracterizado por, na generalidade dos casos, um comprimento muito elevado e uma velocidade horizontal lenta;

---

<sup>20</sup> Existem ainda alguns autores que definem um quarto tipo de sedimentação, a sedimentação por compressão como um tipo de decantação complementar às outras três, decorrente no fundo do decantador, por densificação resultante das camadas depositadas no fundo dos decantadores.



- Decantadores do tipo Vertical – a entrada da água dá-se pelo fundo do tanque de sedimentação, ascendendo até ao seu topo, altura em que começa a sedimentação; a velocidade de ascensão da água é limitada para evitar o arrastamento de partículas; são caracterizados por uma profundidade elevada;
- ❖ Classificam-se ainda dependendo das condições de funcionamento:
  - Decantador do tipo Clássico ou Convencional – apenas com objetivo de se dar a sedimentação, já após ocorrer a floculação;
  - Floco-decantadores – composto por unidades complementares mecânicas que permitem promover simultaneamente a floculação e a sedimentação [12].



## 3 Metodologia

### 3.1 Recolha e Conservação de Amostras

No que se refere ao item mencionado da ETE em 2.2 ETE de Icaraí, Niterói, a água residual foi recolhida para amostra na saída de caixa de areia, como se demonstra na Figura 6 e Figura 7, e colocada em frascos de 5 L<sup>21</sup> (Figura 8). Após a recolha, as amostras foram diretamente encaminhadas para o laboratório, localizado na ETE de Itaipu e conservadas à temperatura de 4°C.

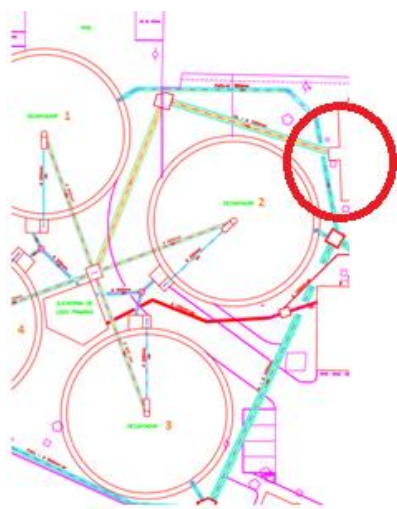


Figura 6 - Fluxograma do Processo Primário  
- Pormenor da Caixa de Areia.



Figura 7 – Ponto de recolha das amostras à  
saída da Caixa de Areia.



Figura 8 – Aspetto final dos frascos das amostras

<sup>21</sup> Os frascos de conservação das amostras não eram de polietileno, como sugere o Standard Methods. No entanto não se verificou qualquer reação do efluente com o material, como é sugerido pela Figura 8.

Foram realizadas cinco recolhas (pontuais) independentes para o procedimento experimental, mas apenas a terceira, quarta e quinta foram utilizadas para análise em laboratório:

- i. A primeira recolha foi realizada em dois bidões de 50 L. Por motivos de espaço no frigorífico, o esgoto teve que ser transferido para bidões de 5 L e durante essa transferência deu-se conta que um dos bidões apresentava vários papéis na amostra. Por ser impossível retirar da amostra manualmente e por interferirem claramente nos resultados, a amostra teve que ser descartada. Não foram tiradas fotos no momento.
- ii. A segunda foi tratada primeiramente com Cloreto Férrico, usando a dosagem habitual na ETE de Icaraí para um termo comparativo entre os resultados de laboratório e os reais da empresa. Aquando a aplicação de cloreto férrico, por motivo desconhecido na altura, o efluente não apresentou quaisquer resultados de tratamento.
- iii. A terceira amostra, de apenas esgoto doméstico, foi recolhida sem qualquer problema e transferida para o laboratório. Foram realizadas os ensaios normais, apresentados no Capítulo 4.
- iv. Foram realizadas mais duas recolhas, também de esgoto doméstico, para realizar os últimos ensaios complementares de coagulação-floculação.

Tabela 8 – Calendário de Recolha das Amostras para Laboratório.

1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
21/05/2013	10/07/2013	07/08/2013	09/08/2013	10/08/2013
9:35h	9:35h	16:14h	08:15h	8:05h

### 3.2 Material e Procedimento de Análise

As características iniciais do esgoto bruto foram todas medidas em laboratório por impossibilidade de transferência do equipamento até ao local de recolha. A temperatura, pH e condutividade foram medidos no momento de chegada ao laboratório.

A quantidade necessária de esgoto para análise era retirada do frigorífico e, ocorrendo um período de espera até que se atingisse a temperatura normal ( $T \approx 22^{\circ}\text{C}$ ), iniciava-se o procedimento laboratorial agendado.

Ainda antes de ser efetuado qualquer tipo de análise, o esgoto (depois de homogeneizado dentro do frasco) era passado por um crivo de 7 mm manualmente, como demonstra a Figura 9: o gradeamento fino localizado na ETE de Icaraí teve que ser retirado para manutenção em meados de

junho, mas por problemas comerciais da empresa responsável pela reparação, não houve previsão da data de conclusão dos trabalhos<sup>22</sup>.

No laboratório os ensaios foram realizados em Jar-Test (Figura 10): foi adotada uma velocidade de 116 rpm durante 27 s para a mistura rápida; uma velocidade de 15 rpm durante 20 min (mistura lenta) e um tempo de sedimentação de 30 min. O tempo adotado para a mistura lenta (de 20 min) não coincide com o estimado real na ETE de Icaraí (de 27 s como na mistura rápida) por se terem efetuado inicialmente ensaios preliminares e não se verificar a floculação devida do coagulante – o efluente tratado apresentou índices muito altos de turvação (ensaio descartado para os resultados).

As marcas e modelos dos materiais utilizados referidos na Tabela 10. Os Procedimentos de análise encontram-se descritos no ANEXO III – Métodos Analíticos de Análise.



Figura 9 - Passagem manual do Esgoto Bruto pelo crivo.



Figura 10 - Jar-Test.

---

<sup>22</sup> Na realidade, até à data de momento de entrega da dissertação o crivo ainda se encontrava para reparação.

Após os ensaios de coagulação-floculação respectivos, as condições finais do sobrenadante foram avaliadas pelos métodos citados na Tabela 9 e descritos no ANEXO III.

Tabela 9 – Parâmetros e métodos utilizados para análise experimental

<b>Parâmetro Analisado</b>	<b>Método de Análise Utilizado</b>	<b>Equipamento</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	Eletrometria	Thermo Scientific - ORION STAR A211
<b>pH</b>	Eletrometria	
<b>Condutividade (µS/cm)</b>	Eletrometria	
<b>Turvação (FAU)</b>	Nefelometria	HACH DR/890 colorimeter
<b>SST (mg/L)</b>	Gravimetria	Balança
<b>CQO (mg/L)</b>	Refluxo Fechado	HACH DR/890 colorimeter (reagente) HACH DRB 200 (digestor)

De produtos químicos necessários às análises, só foi utilizado o reagente de CQO no trabalho – Reagente CQO 20-1500 mg/L, da marca HACH<sup>23</sup>. Como as experiências realizadas não foram complementadas com o acerto de pH, as soluções tampão de Hidróxido de Sódio (NaOH) e Ácido Clorídrico (HCl) foram utilizadas no acerto e na calibração do medidor de pH. O material relevante usado, tais como *gobelés, pipetas graduadas e pipetas volumétricas*, encontra-se igualmente citado em anexo (ANEXO III).

Tabela 10 – Materiais Utilizados

<b>Filtro/membrana SST 1,2 µm</b>	<b>Sartorius</b>
<b>Jar-Test</b>	Ethik Technology – LBC 218/LDB
<b>Digestor CQO</b>	HACH – DRB 200
<b>Leitor Final de CQO</b>	Thermo Scientific - ORION STAR A211
<b>Balança</b>	CHAUS – Adventurer
<b>Estufa</b>	Ethik Technology - Estufa
<b>Bomba de Vácuo</b>	Edwards

<sup>23</sup> Materiais que tiveram de ser comprados para a realização deste estudo.

## 4 Resultados – Análise e Discussão

### 4.1 Condições de Mistura

Foi determinado o gradiente de velocidade do efluente na caixa de mistura a partir das Equações 2 e 3. Os dados utilizados e os resultados encontram-se nas Tabelas respectivas.

Primeiramente foi calculada a variação da energia mecânica dentro da caixa de mistura com base na diferença do nível da água, já que a cota topográfica de referência era a mesma. A variação obtida encontra-se na Tabela 11. Com o resultado da Tabela 11 e os dados da Tabela 12, chegou-se ao gradiente de velocidade, calculado para todos os caudais.

Para uma ideia da influência da variação da temperatura anual na água, foi efetuado um cálculo suplementar com base nas temperaturas de 30° e 15°, respectivamente – temperatura média do efluente no verão e temperatura média no inverno (temperaturas admitidas). A variação obtida é significativa.

Tabela 11 – Dados Utilizados para o Cálculo da Equação 2.

	Z1=Z2=0		
Q (m <sup>3</sup> /s)	0,952	1,379	0,752
Y <sub>1</sub> (m)	5,854	6,254	5,454
Y <sub>2</sub> (m)	0	0	0
S <sub>1</sub> e S <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> )	1,69		
$\Delta H$	5,854	6,254	5,454

Tabela 12 – Dados utilizados para a Equação 3.

	T=20°C	T=30°C	T=16°C
$\gamma$ (P=1 atm)	9790,4	9767,4	9799,2
$\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	1,00E-3	7,98E-4	1,14E-3
	Médio	Máximo	Mínimo
Q (m <sup>3</sup> /s)	0,952	1,379	0,752
V (m <sup>3</sup> )	13,68		

Tabela 13 – Gradientes de velocidade obtidos.

Q (m <sup>3</sup> /s)	0,952	1,379	0,752
G (s <sup>-1</sup> )	1994	2400	1711
G (s <sup>-1</sup> ) T=30°C	2233	2778	1916
G (s <sup>-1</sup> ) T=15°C	1872	2329	1606
G (s <sup>-1</sup> ) máximo recomendado		≤1500	

Pela Tabela 13 verifica-se que os gradientes de velocidade, independentemente da temperatura ou do caudal, são todos superiores ao máximo recomendado, o que não deveria acontecer.

Após a determinação do gradiente de velocidade, foram calculadas as velocidades no interior da tubagem que estabelece a ligação entre a caixa de mistura e os decantadores primários. As condutas foram divididas em duas partes: a primeira parte inclui as duas condutas, ligadas por um joelho de 90°, que estabelece conexão entre a caixa de mistura e a caixa de distribuição (simulação da coagulação); a segunda parte diz respeito às quatro condutas que saem da caixa de distribuição e transportam a água

até ao seu decantador respetivo (floculação). Por fim, foi calculada a velocidade média da água no decantador. Todas as velocidades foram convertidas para rotações por minuto (rpm).

Tabela 14 – Velocidades obtidas.

Q (m <sup>3</sup> /s)	1ª Parte			2ª Parte			Decantador	
	V <sub>1</sub> (m/s)	V <sub>1</sub> (rpm)	t (s)	V <sub>2</sub> (m/s)	V <sub>2</sub> (rpm)	t (s)	V <sub>f</sub> (m/s)	V <sub>f</sub> (rpm)
<b>0,952</b>	1,21	257	27	0,84	179	27	1,35E-03	0
<b>1,379</b>	1,76	373	19	1,22	259	18	1,95E-03	0
<b>0,752</b>	0,96	203	34	0,66	141	34	1,06E-03	0

Assim como na caixa de mistura se verifica um gradiente de velocidade superior ao recomendado, as velocidades em todo o escoamento sob pressão obtidas são demasiado elevadas. Para Q=0,952 m<sup>3</sup>/s e Q=0,1,379 m<sup>3</sup>/s todas as velocidades, excepto a Velocidade 2 para o caudal médio (Q=0,952 m<sup>3</sup>/s), alcançam o dobro de 150 rpm, normalmente utilizado na fase de coagulação e velocidade máxima possível de programar no Jar-test comprado. A velocidade mais baixa que se poderá verificar é a do caudal baixo (Q=0,752 m<sup>3</sup>/s), na 2ª parte do segmento de ligação ao decantador: V<sub>2</sub>=141 rpm.

Todos os tempos de mistura encontram-se longe dos tempos requeridos para as etapas de coagulação e floculação. O mínimo de 1 ou 2 min necessários para a coagulação não são atingidos (o tempo mais elevado é de 34 s (para Q=0,752 m<sup>3</sup>/s). No caso da floculação, o cenário piora: o maior tempo estipulado, também para o caudal mais baixo de entrada, é de 34 s (igual ao tempo de coagulação).

As velocidades nos decantadores, a princípio, são suficientemente baixas para promover a sedimentação dos flocos.

## 4.2 Decantadores

Após as condições de mistura é necessário ter conhecimento acerca das condições de sedimentação e verificar que a separação dos flocos e do clarificado é eficaz. É portanto importante dimensionar os decantadores e verificar o tempo de retenção hidráulica do efluente.

Como já foi referenciado, a estação possui quatro decantadores, do tipo circular. A sedimentação ocorrente é a sedimentação do tipo floculenta. Em AutoCAD, a partir das plantas do projeto, foram obtidas as dimensões usadas no cálculo do TRH e CHS. Os cálculos foram efetuados para os caudais mínimo, médio e máximo registados na ETE.

Tabela 15 – Decantadores: Características Gerais

<b>Número de Decantadores</b>	<b>4</b>
<b>Diâmetro (m)</b>	<b>36</b>
<b>Área Superficial (m<sup>2</sup>)</b>	1018
<b>Altura útil (m)</b>	<b>3,54</b>
<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	3603



Tabela 16 – Decantadores: Carga Hidráulica Superficial.

<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>0,750</b>	<b>0,952</b>	<b>1,379</b>
<b>CHS (m<sup>3</sup>/d/m<sup>2</sup>)</b>	16	20	29
<b>CHS Recomendada (m<sup>3</sup>/d/m<sup>2</sup>)</b>	24-36		50

Tabela 17 – Decantadores: Tempos de Retenção Hidráulica, horas.

<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>0,750</b>	<b>0,950</b>	<b>1,379</b>
<b>TRH (h)</b>	1,33	1,05	0,73
<b>TRH recomendado (h)</b>	1,5-2,0	2,5-3,5	

Analisando as Tabelas Tabela 16Tabela 17 verificamos que tanto a CHS como o TRH possuem valores inferiores aos recomendados, o que pode comprometer a decantação dos flocos resultantes de tratamento.

## 4.3 Coagulantes

### 4.3.1 Cloreto Férrico

Pelo facto do cloreto férrico ser o coagulante em uso na ETE de Icaraí, foi decidido realizar um ensaio em Jar-Test mais abrangente que incluísse as concentrações aplicadas na ETE de Icaraí (de 146 a 196 mg/L. Com uma amostra do cloreto férrico colhido diretamente do ponto de mistura (mistura dos fornecedores Allquim e Vittaquímica). Com esse fim realizaram-se dois ensaios completos (total de 13 gobelés), abrangendo concentrações entre 25 e 245 mg/L, e três suplementares de 22, 466 e 686 mg/L. Não se verificou um clarificado limpo com concentrações até a 245 mg/L mas sim apenas com aplicação dos dois últimos testes suplementares de concentrações mais elevadas. Tal fato deve-se ao efluente fazer parte da última coleta que possui um elevado teor de CQO (CQO=768 mg/L) e que contrasta em alta com o valor médio encontrado na ETE, de 350 mg/L. Os resultados desse teste encontram-se apresentados no ANEXO IV.

Os ensaios foram novamente repetidos entre concentrações de 147 e 294 mg/L<sup>24</sup>: normalizando por CQO (entre 0,42 e 0,83 (mg/L)/CQO). Os resultados são apresentados de seguida:

<sup>24</sup> Estas concentrações contêm as dosagens utilizadas habitualmente na estação de tratamento (6 a 12 L/min de cloreto férrico).

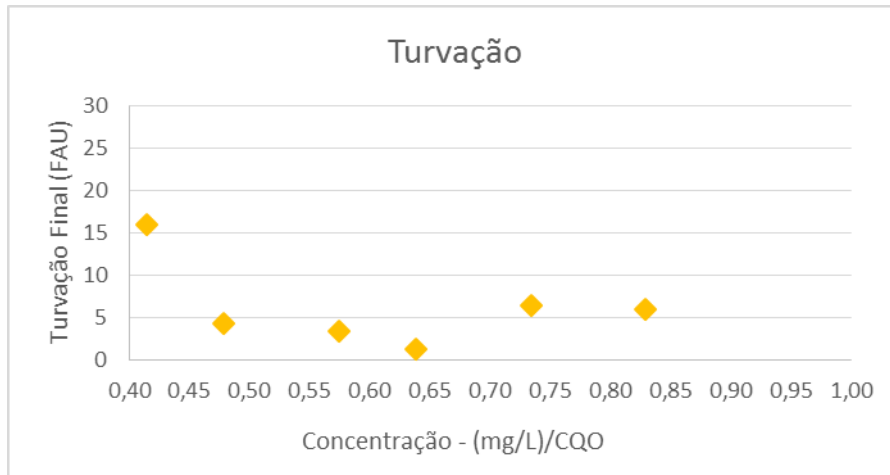


Figura 11 - Cloreto Férrico: Gráfico da evolução da Turvação final (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

Como se pode observar pela Figura 11 existe uma grande diferença (em cerca de 10 FAU) da concentração 0,415 (mg/L)/CQO para diante, de fato, parece que 0,638 (mg/L)/CQO é a concentração a partir da qual os resultados aumentam bastante de eficácia. Em todas as outras dosagens aplicadas, os resultados possuem pouca diferença entre eles, estabilizando.

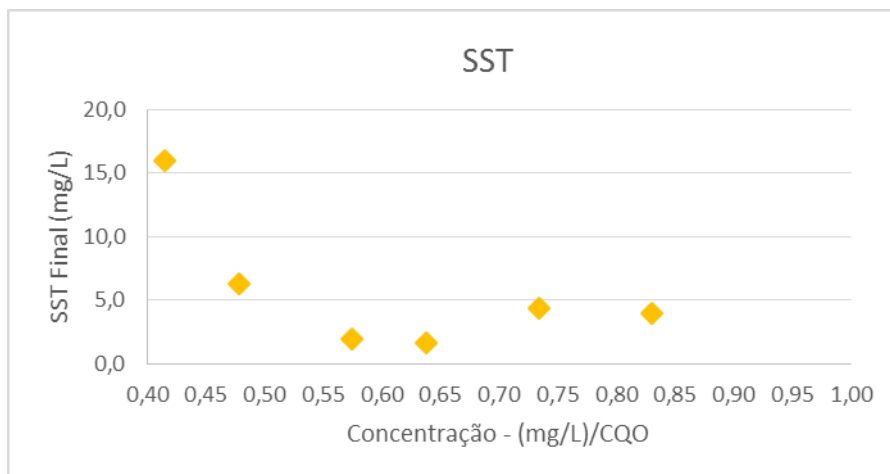


Figura 12 - Cloreto Férrico: Gráfico da evolução dos SST (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

Tal como na Figura 11, a Figura 12 também apresenta uma diferença elevada entre o resultado da dose de 0,415 (mg/L)/CQO para todas as outras, em cerca de 8 mg/L sólidos removidos, no total. Nota-se uma tendência para a descida, até chegar a 0,638 (mg/L)/CQO e voltar a aumentar a quantidade final de sólidos no efluente, limitando a dose ótima entre os pontos 0,574 e 0,638 (mg/L)/CQO.

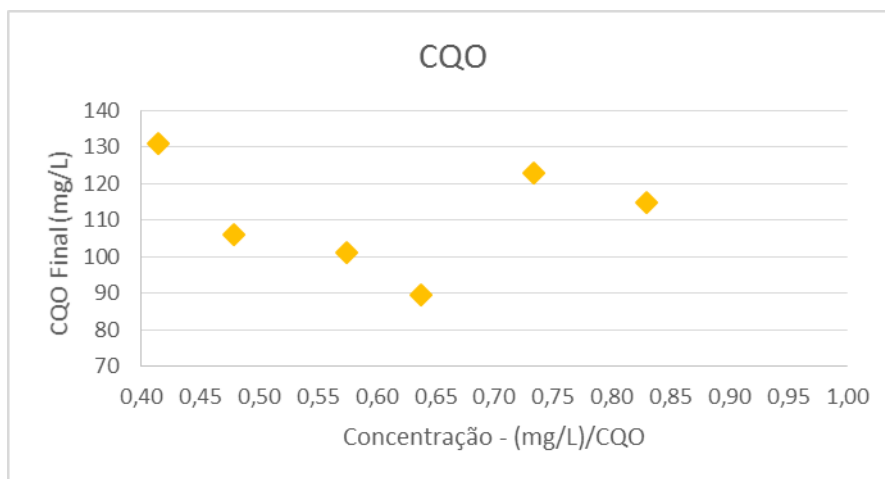


Figura 13 - Cloreto Férrico: Gráfico da evolução da CQO (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

A Figura 13 apoia os resultados anteriores: a dose ótima encontra-se algures entre 0,479 e 0,638 (mg/L)/CQO, sendo que a última apresenta maior quantidade de redução de CQO e por isso, a mais favorável na escolha da dose ótima.

Todos os resultados apresentaram temperaturas inferiores a 40°C e pH's entre 5-9. A média obtida foi de 26,5 °C e 5,17. Foi o coagulante que registou pH's mais baixos no efluente tratado.

Em relação ao tempo de formação e fisionomia dos flocos formados durante o teste em laboratório, os flocos possuíam uma dimensão média, mas foram rápidos a formar e a sedimentar (cerca de 15 min). No entanto, verificou-se que com o tempo de floculação, os flocos tinham tendência para partir e no final do tempo de sedimentação eram mais pequenos dos que se tinham formado inicialmente. Verificou-se ao longo do processo uma diferença nos flocos formados das concentrações 0,479 e 0,574 para 0,638 mg/L: as primeiras duas dosagens foram as que formaram mais rapidamente flocos e de maiores dimensões, enquanto na concentração de 0,638 mg/L apesar de que levou mais tempo para se ver visivelmente a agregação dos flocos, estes eram consideravelmente maiores.

Tendo em consideração as condições de mistura na ETE de Icaraí (tempos de mistura de 27 s), a dose ótima então será a que forma os flocos mais rápidos e por isso corresponderá a uma das concentrações de 0,479 e 0,574 mg/L. Para os cálculos económicos foi considerada a dose de 0,479 mg/L (Tabela 16 e Tabela 20).

Tabela 18 - Comparação dos valores obtidos com o efluente da ETE em estudo: resultados publicados em [22]) e obtidos neste estudo. \*testes não realizados.

	Concentração de Cloreto Férrico (mg/L)	Remoção de Turvação (%)	Remoção de SST (%)	Remoção de CQO (%)
<b>PROSAB</b>	20	59	*	55,6
<b>Em laboratório</b>	20	*25	58,3	55,9

Pela Tabela 18 observamos que os resultados obtidos são consistentes com os realizados anteriormente, com uma redução de CQO muito semelhante. Não foi realizada comparação com os resultados de literatura utilizados na revisão bibliográfica.

Tabela 19 – Cloreto Férrico: produção de lamas e custo associado

<b>SST removidos (mg/L)</b>	<b>328</b>
<b>SST removidos (g/m<sup>3</sup>)</b>	328
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/d)</b>	1371
<b>Remoção (%) de sólidos por decantação gravítica</b>	80%
<b>Produção de Lamas (kg/d)</b>	<b>8633</b>
<b>Custo tratamento de lamas (R\$/ton)</b>	70
<b>Custo de Tratamento de Lamas (R\$/dose ótima)</b>	<b>0,420</b>
<b>Custo de Tratamento de Lamas (R\$/CQO)</b>	<b>5,46E-04</b>

Tabela 20 – Cloreto Férrico: Custo económico total


<b>Concentração Ótima (mg/L)/CQO</b>	<b>0,574</b>
<b>Dosagem Ótima (L/min)/CQO</b>	<b>0,026</b>
<b>Custo (R\$/Kg)</b>	0,65
<b>Custo (R\$/L)</b>	0,91
<b>Custo (R\$/dose ótima)</b>	<b>7,280</b>
<b>Custo (R\$/CQO)</b>	2,4E-2
<b>Custo Total (R\$/dose ótima)</b>	<b>7,70</b>
<b>Custo Total (R\$/CQO)</b>	<b>2,4E-02</b>

<sup>25</sup> Devido aos valores obtidos, a única função matemática que se assemelha ao comportamento da evolução dos resultados é a função exponencial, que se assemelha sob a forma da equação  $y=0,0082*x^2-3,3137+336,01$  ( $R^2=0,9447$ ). O resultado é de 27,4% de remoção, que possui uma diferença significativa do resultado obtido no Prosab.

#### 4.3.2 Sulfato de Alumínio

Para teste em laboratório foi pré-definido utilizar concentrações entre os 60-160 mg/L. Os resultados obtidos, especialmente das concentrações mais elevadas, não foram consistentes, acusando um aumento nos valores finais de CQO, turvação e sólidos. Foi verificado que o problema teve origem nas fórmulas utilizadas em excel e que as concentrações utilizadas afinal, correspondiam a concentrações na ordem de 123-1352 mg/L, o que explica os valores inicialmente obtidos de aumento nas quantidades de matéria em suspensão pela concentração do alumínio residual em suspensão. Encontrado o problema, os resultados foram todos descartados para os resultados (exceto as duas concentrações mais pequenas) e procedeu-se a um novo ensaio com novas concentrações. Os valores obtidos de concentração e dosagens equivalentes não possuem um intervalo bem definido (valores certos) porque a re-adaptação foi realizada ao volume de coagulante realizado. Não foi realizado nenhum teste com concentrações inferiores a 123 mg/L por se considerar que a dose ótima estaria acima dessa concentração.

Dosagem (L/min)	Q (mg/L)
5,40	123
12,15	277
24,30	553
35,10	799
47,25	1075
59,40	1352



Dosagem (L/min)	Q (mg/L)
14,04	320
16,20	369
18,9	430
21,60	492

Figura 14 – Doses calculadas inicialmente e doses testadas num segundo ensaio.

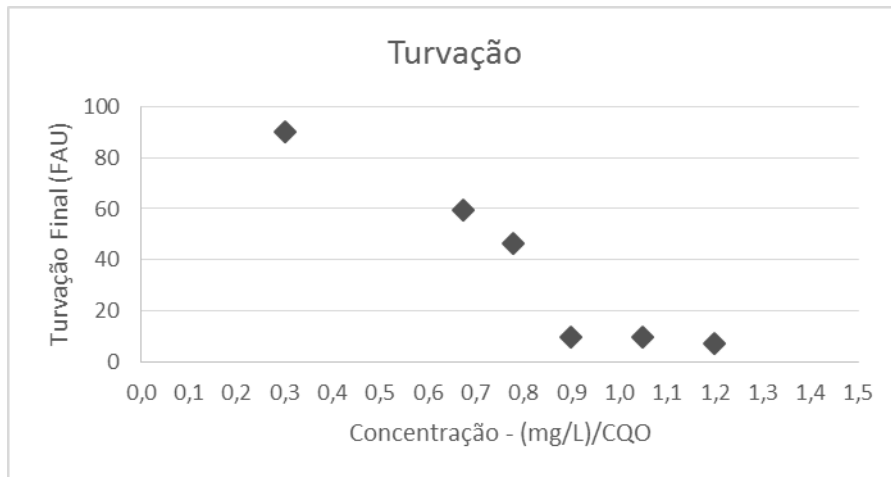


Figura 15 - Sulfato de Alumínio: Gráfico da evolução da turvação final (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

Verifica-se uma diminuição acentuada da dose de 0,78 (mg/L)/CQO para 0,90 (mg/L)/CQO. Após essa maior diferença por adição de dose, não existe muita variação no resultado obtido. Não foram tidos em consideração mais dados por corresponderem a valores muito elevados de dosagem que não compensam economicamente. Mesmo assim, para uma CQO admitida de 350 mg/L, a dose ótima de tratamento equivale a 369 mg/L, o que é bastante elevado para o normal utilizado. Pela elevada concentração de sulfato necessária para obter resultados satisfatórios, conclui-se que o sulfato de alumínio não é uma boa alternativa para uso na estação de tratamento.

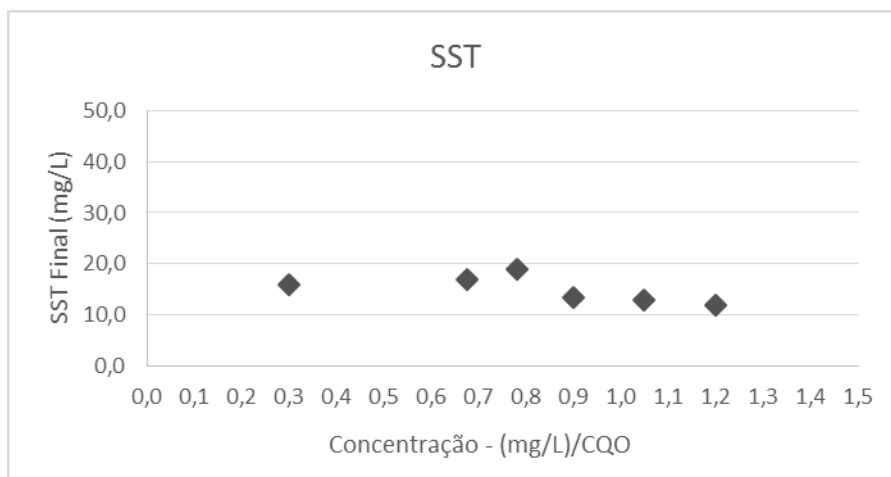


Figura 16 - Sulfato de Alumínio: Gráfico de evolução dos SST (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

A tendência para a quantidade de material suspenso em solução diminuir é mais difícil de notar nesta curva. A melhor dose para remoção dos sólidos é a de (mg/L)/CQO.

Considerando os parâmetros da turvação e da remoção de SST, a dose ótima é de nos (mg/L)/CQO. Por uma questão de certeza, visto as doses aplicadas serem muito elevadas e não ser habitual, foi realizado um triplicado do ensaio. Os resultados apresentam-se a seguir:

Tabela 21 - Panfloc: Características do efluente tratado com dose ótima. n.a. – número de amostras; d.p. – desvio-padrão; c.v. – coeficiente de variação.

n.a.	Turvação Final (FAU)	Remoção de Turvação (%)	d.p.	c.v.	SST (mg/L)	Remoção de SST (%)	d.p.	c.v.	CQO Final (mg/L)	Remoção de CQO (%)	d.p.	c.v.
3	18	90%	7,37	0,40	13	82%	0,61	0,05	82	72	14,54	0,18

Os níveis alcançados com a dose ótima de sulfato também são bons: atingiram-se valores de 90% de eficiência de remoção na turvação, 82%, 72% e 65% nos SST, CQO e CBO, respetivamente. O coeficiente de variação associado ao triplicado da amostra no ensaio é baixo, embora possua um desvio padrão significativo com um máximo de 14,5 na variação da CQO.

A temperatura em todas as amostras de ensaio (incluindo o triplicado de ensaio com (mg/L)/CQO) nunca atingiu valores superiores a 24°C, sendo que a média permaneceu em 21,6°C. O pH também não variou muito e a média foi de 6,17. Os parâmetros físicos de temperatura e pH encontram-se dentro do estabelecido pelas normas que obrigam ao seu cumprimento (ver 2.2.3).

Em paralelo com os valores de literatura, as concentrações utilizadas ótimas são muito inferiores à determinada aqui experimentalmente (cerca de 6x superior). O livro da PROSAB ([23]) por si também publicou valores de remoção muito inferiores aos referidos na literatura o que sugere que este coagulante não é um bom coagulante para aplicar no tratamento a este efluente. Para fazer um paralelismo entre os resultados de laboratório com os obtidos em [22], foi realizada uma extrapolação, de equação:

$$\text{Remoção (\%)} = 0,0016 * \text{Concentração} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) + 0,2737$$

Equação 6 – Extrapolação dos resultados de turvação

Apesar de só ser possível a comparação com o parâmetro da turvação<sup>26</sup>, o resultado é de 30,6% de remoção para a turvação, o que nos permite concluir que os valores encontrados com o efluente da ETE de Icarai são semelhantes.

<sup>26</sup> Em relação aos SST não é possível proceder à comparação com o livro da Prosab porque nele não foi realizado essa análise; em relação à CQO não é possível realizar uma extrapolação dos resultados obtidos porque só existe uma dose avaliada (como já foi referido em cima, por falta de material na altura em que esta análise foi realizada, apenas foi medida a CQO da dose ótima).

Tabela 22 – Comparação dos valores obtidos com o efluente da ETE em estudo: resultados publicados em [22] e obtidos neste estudo. \*(testes não realizados).

	Concentração de Sulfato de Alumínio (mg/L)	Remoção de Turvação (%)	Remoção de SST (%)	Remoção de CQO (%)
<b>PROSAB</b>	20	28	*	30
<b>Em laboratório</b>	20	30,6	*	*

Tabela 23 – Sulfato: produção de lamas e custo associado

<b>SST removidos (mg/L)</b>	<b>60,8</b>
<b>SST removidos (g/m<sup>3</sup>)</b>	60,8
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/d)</b>	<b>1371</b>
<b>Remoção (%) de sólidos por decantação gravítica</b>	80%
<b>Produção de Lamas (kg/d)</b>	<b>1600</b>
<b>Custo tratamento de lamas (R\$/ton)</b>	70
<b>Custo de Tratamento de Lamas (R\$/ dose ótima)</b>	<b>0,078</b>
<b>Custo de Tratamento de Lamas (R\$/CQO)</b>	<b>2,65E-04</b>

Tabela 24 – Sulfato: Custo económico total

<b>Concentração Ótima (mg/L)/CQO</b>	<b>0,90</b>
<b>Dosagem Ótima (L/min)/CQO</b>	<b>0,0544</b>
<b>Custo (R\$/Kg)</b>	0,724
<b>Custo (R\$/L)</b>	0,94
<b>Custo (R\$/dose ótima)</b>	<b>15,059</b>
<b>Custo (R\$/CQO)</b>	5,1E-2
<b>Custo Total (R\$/dose ótima)</b>	<b>15,14</b>
<b>Custo Total (R\$/CQO)</b>	<b>5,1E-02</b>



### 4.3.3 Panfloc PC18

O Panfloc foi testado nas gamas de concentração 40-140mg/L: normalizando as concentrações pela CQO inicial da água bruta, correspondem as concentrações representadas nos gráficos, de dosagens de 0,10 a 0,23 (mg/L)/CQO. Os resultados da leitura da turvação e da pesagem dos sólidos filtrados (SST) são apresentados nas Figura 17 e Figura 18. A turvação apresenta uma descida acentuada que parece estabilizar na dose mais elevada testada, por volta dos 10 FAU. No caso da leitura dos sólidos representados, a curva não apresenta a mesma forma, mas verifica-se igualmente uma grande descida nos resultados apresentados, que parece sugerir que não termina na dosagem de 0,23 (mg/L)/CQO.

Para garantir que não haveria um ponto de dose ótima de dosagem acima destas aplicadas, foi realizada uma amplificação da dose. O Panfloc foi aplicado nas doses de respetivamente, 0,30; 0,37 e 0,45 (mg/L)/CQO. Os resultados globais dos dois ensaios encontram-se a seguir:

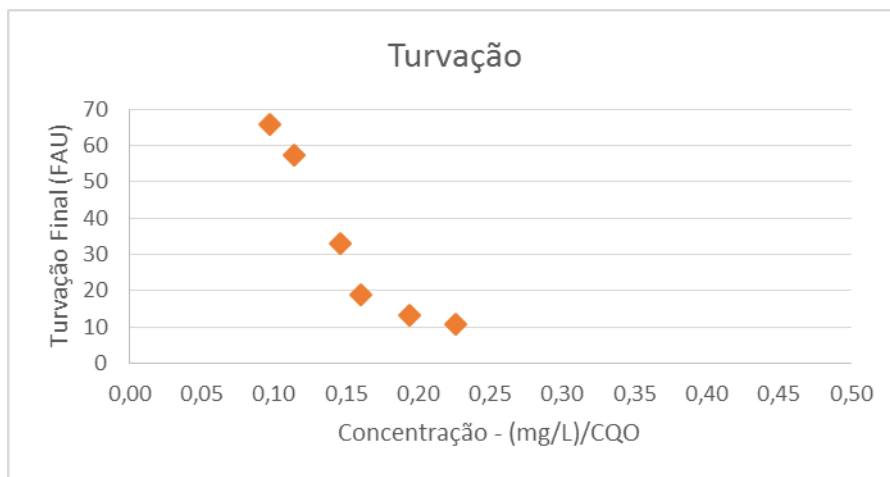


Figura 17 - Panfloc PC18: Primeiros Resultados da turvação (FAU).

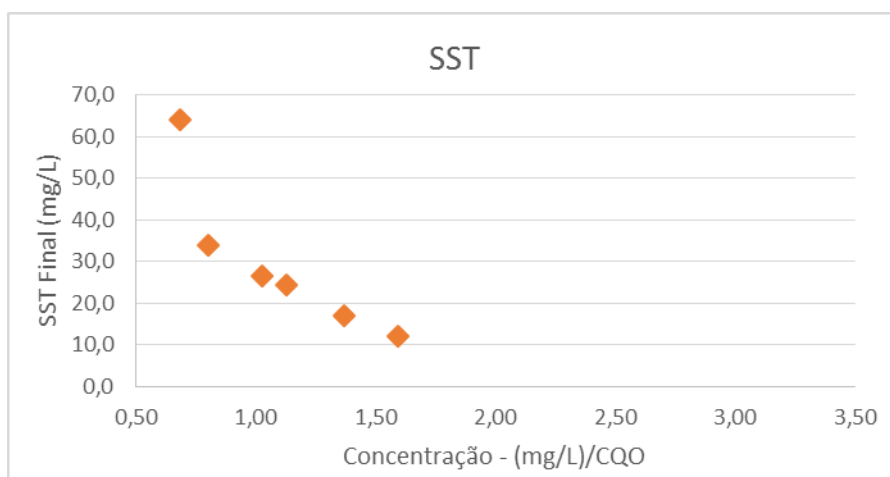


Figura 18 - Panfloc PC18: Primeiros Resultados de SST (mg/L).

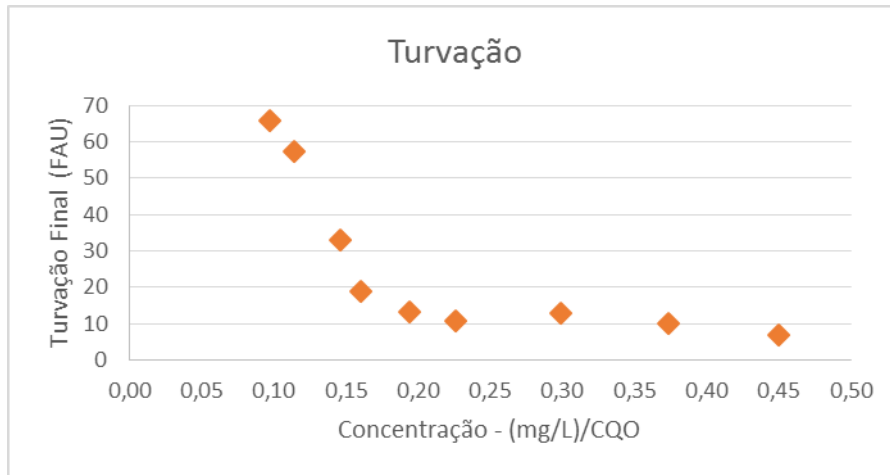


Figura 19 - Panfloc PC18: Gráfico de Evolução da Turvação (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

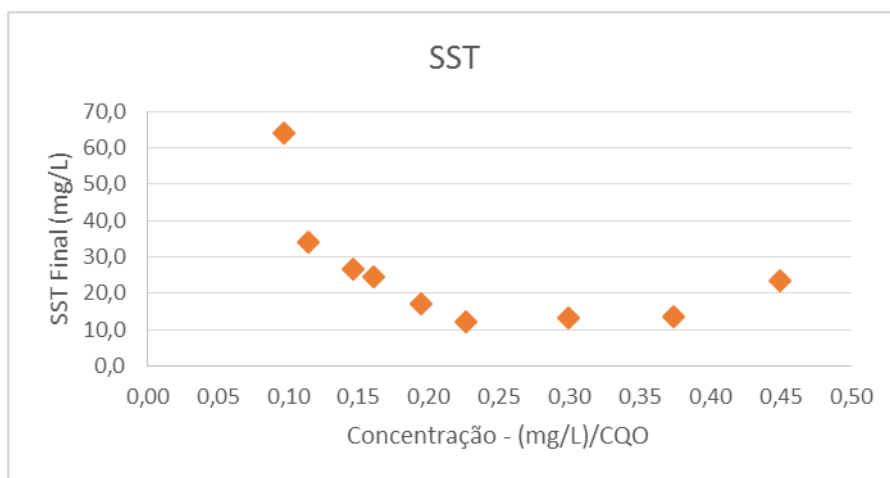


Figura 20 - Panfloc PC18: Gráfico de evolução dos SST (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

Com a expansão das últimas três doses testadas na turvação verifica-se que a curva estabiliza por volta de 10 FAU. Tendo isso em consideração, a dose ótima parece encontrar-se em 0,19 (mg/L)/CQO.

Na figura relativas aos SST (Figura 20) a continuidade da série testada anteriormente parece inverter a tendência da descida e a curva parece-se adaptar à forma de uma hipérbole pouco acentuada, com as últimas doses a contribuírem novamente para o aumento dos SST filtrados. Apesar dos valores apresentados pelas doses 0,23 e 0,30 (mg/L)/CQO apresentarem valores semelhantes ou relativamente mais baixos, a diferença numérica é muito reduzida no resultado e é preferível a seleção de uma dose mais baixa, tanto quanto possível. Por esse motivo neste caso de seleção da dose ótima, o aspeto visual dos flocos e tempo de formação/sedimentação respetivo de cada dose são decisivos para a escolha técnica da dose.

Por volta da data de realização deste teste havia já uma quantidade limitada de reagente para medição de CQO, pelo que não foi realizada a medição em todos os Gobelés. Assim que foi realizado o teste e observando a evolução do processo, estabeleceu-se uma dúvida entre três dosagens (0,16; 0,19

e 0,23 (mg/L)/CQO) que foram as únicas às quais se procedeu a uma leitura de CQO. As três leituras efetuadas obtiveram valores semelhantes:

Tabela 25 – Panfloc: Resultados da medição da CQO para as doses de 0,16; 0,19 e 0,23 (mg/L)/CQO

CQO Final (mg/L)	Remoção de CQO (%)
182	52%
180	53%
176	54%

Confrontando as duas doses ótimas selecionadas com os parâmetros acima, é selecionada a dose de 0,19 (mg/L)/CQO como dose ótima final pela evolução do processo qualitativo que foi registado: foi a que formou os flocos num menor espaço de tempo, de maiores dimensões e que sedimentaram mais rápido, apesar do valor de remoção da CQO não ser o mais elevado, mas a diferença para a dose de 0,23 (mg/L)/CQO de 1% não foi considerada relevante.

Os parâmetros físicos de temperatura e pH mantiveram-se sempre dentro do estipulado, com médias de 22,4°C e 6,4, respetivamente.

Procedeu-se à triplicação da amostra com a dosagem ideal para confirmar os valores obtidos (Tabela 26).

Tabela 26 – Panfloc: Características do efluente tratado com dose ótima. n.a. – número de amostras; d.p. – desvio-padrão; c.v. – coeficiente de variação.

n.a.	Turvação Final (FAU)	Remoção de Turvação (%)	d.p.	c.v.	SST (mg/L)	Remoção de SST (%)	d.p.	c.v.	CQO Final (mg/L)	Remoção de CQO (%)	d.p.	c.v.
3	13	93%	0,2	0	27	64%	1,80	0,07	180	53	1,20	0,01

O PAC teve uma remoção de CQO inferior às remoções dos sólidos e da turvação e seria de esperar remoções de ordem mais elevada. Para todos os parâmetros medidos as eficiências de remoção foram bastante elevadas, mesmo com dosagens muito pequenas (exceto SST); a Tabela 27 demonstra que os resultados da CQO são consistentes, mas que a remoção da turvação deveria ter sido maior, assim como os sólidos apresentam uma discrepância muito grande em relação aos valores de literatura.

Tabela 27 – Panfloc - Comparação dos valores obtidos com o efluente da ETE em estudo: resultados publicados em [22] e obtidos neste estudo. \*(testes não realizados).

	Concentração de Panfloc (mg/L)	Remoção de Turvação (%)	Remoção de SST (%)	Remoção de CQO (%)
Literatura	20	90	78	70
PROSAB	20	*	*	73,6
Resultados atuais (R.A.)	60	64	13	60

Tabela 28 - Panfloc: produção de lamas e custo associado

SST removidos (mg/L)	<b>248,50</b>
SST removidos (g/m <sup>3</sup> )	248,50
Vazão (m <sup>3</sup> /d)	1371
Remoção (%) de sólidos por decantação gravítica	80%
<b>Produção de Lamas (kg/d)</b>	<b>6541</b>
Custo tratamento de lamas (R\$/ton)	70
Custo de Tratamento de Lamas (R\$/min)	<b>0,318</b>
Custo de Tratamento de Lamas (R\$/CQO)	<b>8,37E-04</b>

Tabela 29 - Panfloc: Custo económico total

CQO inicial (mg/L)	<b>380</b>
Dosagem (L.min.CQO)	1,4E-02
Custo (R\$/Kg)	0,865
Custo (R\$/L)	1,17
<b>Custo (R\$/min)</b>	<b>5,622</b>
Custo (R\$/CQO)	1,6E-2
<b>Custo Total (R\$/min)</b>	<b>5,94</b>
<b>Custo Total (R\$/CQO)</b>	<b>1,7E-02</b>

Pela Tabela 28 a produção de lamas associadas é mais baixa e o custo consequente também. O valor final associado está dentro da média. A média de custo total do tratamento com Panfloc é de 5,94R\$/min ou  $1,7 \cdot 10^{-2}$  R\$/CQO.

#### 4.3.4 COARG 100

O único coagulante orgânico selecionado foi testado nas gamas de dosagens 0,15 a 1,52 (mg/L)/CQO respectivamente.

Os sólidos suspensos totais não foi possível de apresentar devido à queima de várias membranas na estufa. Apesar das outras membranas terem sido pesadas, todas elas possuíam peso inferior ao inicial, o que sugere que tenha sido queimada matéria orgânica excessiva.

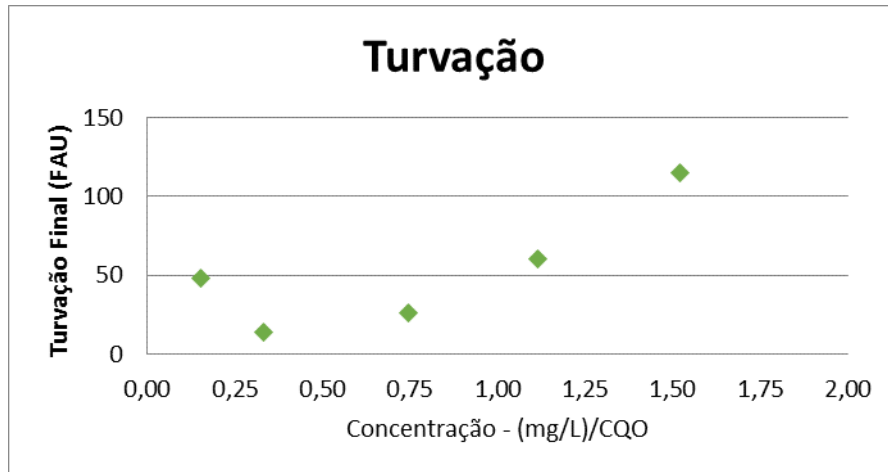


Figura 21 – COARG 100: Gráfico da evolução da remoção de Turvação (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

O gráfico representa uma parábola invertida. É possível verificar a diminuição da turvação, sugerindo um aumento de eficácia do processo, e um aumento progressivo, após atingir um ponto de turvação mínima. Esse ponto, para uma dosagem de 0,33 (mg/L)/CQO, define-se como o ponto de dosagem ótima para a remoção de turvação, atingindo um nível máximo de 92% de eficiência de eliminação.

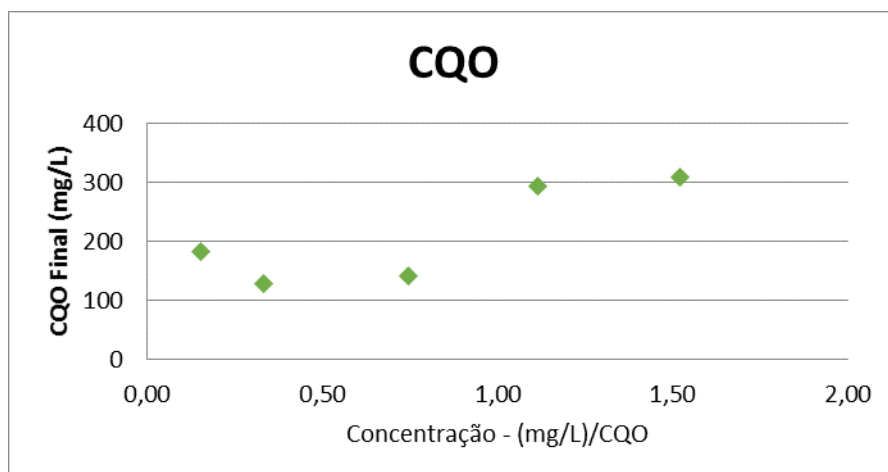


Figura 22 - COARG 100: Gráfico da evolução da CQO (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

No Figura 22 verifica-se igualmente a diminuição desejada de carência química, o mínimo atingido no tratamento e a subida seguinte do nível de carência. Também por este gráfico facilmente se define a dose de 0,33 (mg/L)/CQO como a melhor dosagem para tratamento do efluente.

A nível visual os resultados obtidos foram melhores do que os restantes coagulantes: a formação dos flocos foi quase instantânea (20 s na dose ótima), os flocos formados foram os maiores dos coagulantes em teste e a sedimentação também foi a mais rápida (1,5 min para a dose ótima). Todas as dosagens apresentaram água completamente clarificada e com sedimentos sempre de grandes dimensões.

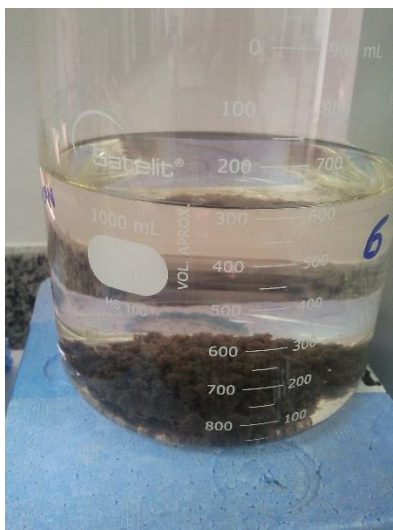


Figura 23 – Exemplo de água tratada com COARG 100

Os resultados obtidos em [23] foram efetuados com uma concentração de 20 mg/L. Como a dosagem testada teve início numa concentração 62 mg/L, essa comparação direta não é possível. No entanto com o Tanfloc SL, e 20 mg/L, foi alcançada uma CQO mínima de 118 mg/L, enquanto 0,15 (mg/L)/CQO (62 mg/L sem a normalização por CQO inicial da água bruta) de COARG 100 apenas alcançaram 182 mg/L na CQO. Na turvação a leitura foi realizada com sistemas diferentes, o que não permite a comparação de 69 NTU (do livro PROSAB) com os 48 FAU determinados experimentalmente. No entanto, a comparação da CQO sugere que o produto COARG 100 é menos eficiente que o Tanfloc SL.

No caso dos sólidos suspensos a sua comparação não foi possível devido a uma queima dos filtros que se encontravam nesse dia na estufa. Quando se procedeu à retirada das membranas, após as 2h de secagem, verificou-se que algumas delas tinham sido queimadas. Procedeu-se à pesagem das que não apresentavam vestígios, mas todas elas acusaram uma diferença de peso negativo e não foram consideradas para os resultados. Como se definiu a dosagem ótima em 0,33 (mg/L)/CQO, procedeu-se à realização de mais três amostras com essa mesma dose para proceder à pesagem das membranas e estimar a produção de lamas associada, assim como efetuar uma leitura da CBO<sub>5</sub> (mg/L).

Tabela 30 – COARG 100: Características do efluente tratado com 6L/min. n.a. – número de amostras; d.p. – desvio-padrão;c.v. – coeficiente de variação.

n.a.	Turvação Final (FAU)	Remoção de Turvação (%)	d.p.	c.v.	SST (mg/L)	Remoção de SST (%)	d.p.	c.v.	CQO Final (mg/L)	Remoção de CQO (%)	d.p.	c.v.
3	8	98%	1,33	16,0	17,8	93,5%	4,34	24,4	128	68,8	1,10	0,9

Tabela 31 – COARG 100: produção de Lamas e Custo Associado

<b>SST removidos (mg/L)</b>	<b>257,20</b>
<b>SST removidos (g/m<sup>3</sup>)</b>	257,20
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/d)</b>	1371
<b>Remoção (%) de sólidos por decantação gravítica</b>	80%
<b>Produção de Lamas (kg/d)</b>	<b>6770</b>
<b>Custo tratamento de lamas (R\$/ton)</b>	70
<b>Custo de Tratamento de Lamas (R\$/dose ótima)</b>	0,3291
<b>Custo de Tratamento de Lamas (R\$/CQO)</b>	8,03E-04

Tabela 32 - COARG 100: Custo económico total

<b>Concentração Ótima (mg/L)/CQO</b>	<b>0,33</b>
<b>Dosagem Ótima (L/min)/CQO</b>	<b>0,017</b>
<b>Custo (R\$/Kg)</b>	4,76
<b>Custo (R\$/L)</b>	5,236
<b>Custo (R\$/dose ótima)</b>	<b>31,416</b>
<b>Custo (R\$/CQO)</b>	4,77E-2
<b>Custo Total (R\$/dose ótima)</b>	<b>31,75</b>
<b>Custo Total (R\$/CQO)</b>	<b>4,85E-2</b>

A produção de lamas está dentro da média, assim como o preço de tratamento (R\$/min). No entanto, devido ao preço do produto comercializado ser excessivamente caro (4,76R\$/kg), o custo total sobe exponencialmente, totalizando 0,0485\$/CQO. É o produto mais caro para aplicar na ETE, apesar de ser o coagulante com a dosagem ótima mais baixa.

#### 4.3.5 Comparação dos coagulantes testados, por análise dos parâmetros quantificados

Depois de uma comparação com dosagem (mg/L)/CQO é realizada agora uma comparação com base na dosagem de todos os coagulantes para CQO=350 mg/L (o valor de CQO foi estipulado pela empresa).

Todos os gráficos foram representados nos mesmos intervalos de Remoção (%), para uma melhor comparação entre os parâmetros. O eixo horizontal foi adaptado para as dosagens respectivas e intervalos melhor adaptados à visualização das dosagens aplicadas dos coagulantes.

##### 4.3.5.1 Turvação

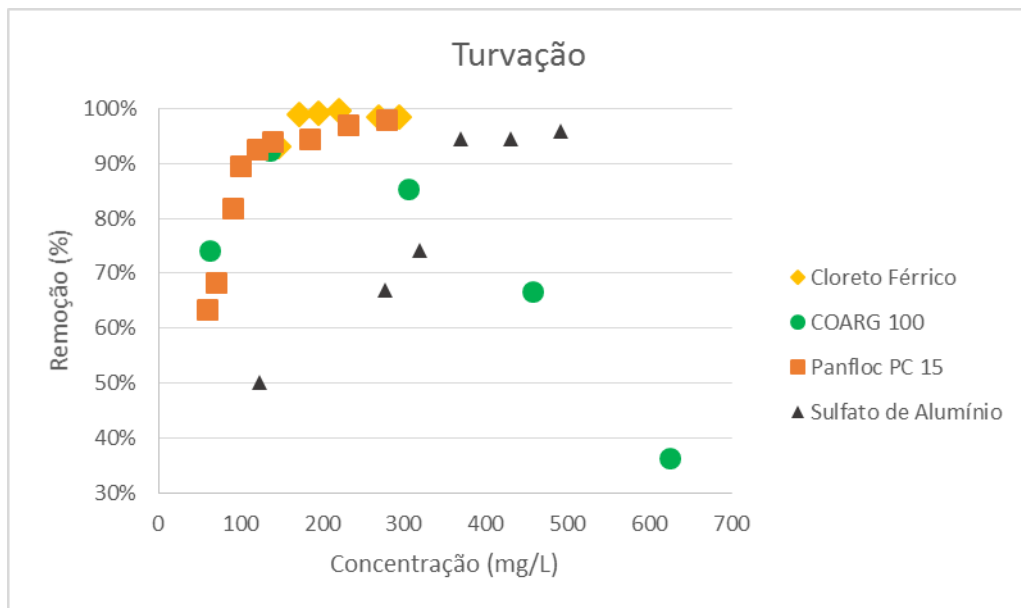


Figura 24 - Turvação: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO de diferentes coagulantes.

Este gráfico geral com os resultados dos coagulantes testados e referidos anteriormente neste capítulo, apresenta o Panfloc, Cloreto Férrico e o COARG 100 como os melhores coagulantes. O Sulfato de Alumínio é o coagulante que obtém piores resultados visivelmente: apenas com concentrações a partir de 369 mg/L (13,5 L/min) atinge resultados superiores a 90% de remoção.

O COARG 100 e o Panfloc apresentam bons resultados para dosagens pequenas (concentrações inferiores a 120 mg/L), e para a mesma dosagem de  $\approx 70$  mg/L, o COARG 100 apresenta melhor resultado de remoção (de 68% para 74%). O Cloreto Férrico apresenta melhores remoções de eficiência do que o Panfloc na mesma gama dosagens e para todos os outros coagulantes.

No geral, o COARG 100 apresenta uma hipérbole mais definida, que o traduz como o coagulante com mais sensibilidade face à dosagem adicionada. O Panfloc apresenta uma curva bem definida e um rápido aumento de eficiência para uma reduzida diferença de dosagem aplicada. O Cloreto parece ser o coagulante que menos varia com a dosagem, e por isso menos sensível, apesar da gama reduzida de teste representado.



## 4.3.5.2 SST

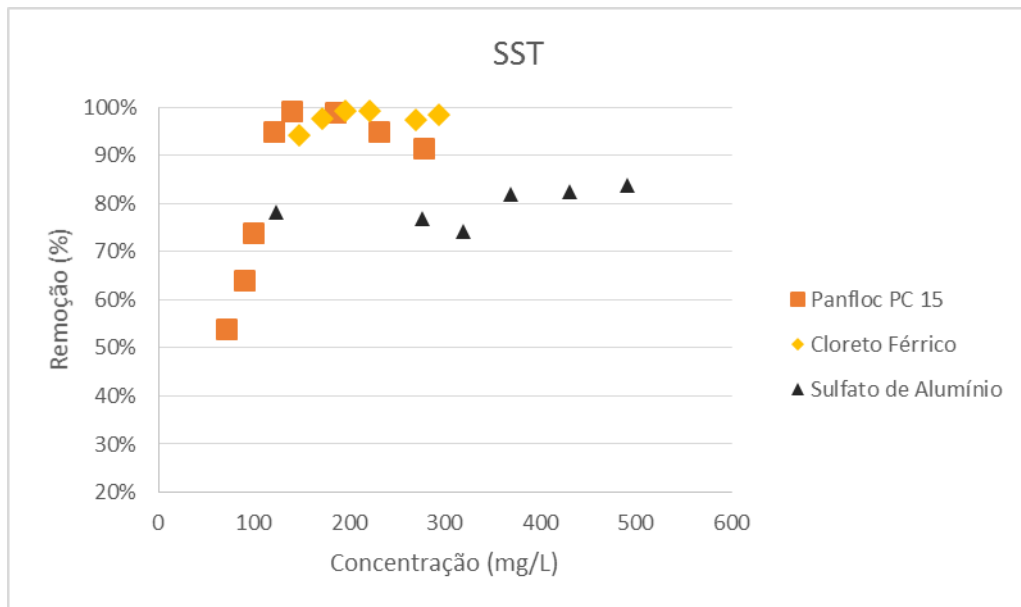


Figura 25 – SST: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO de diferentes coagulantes.

A Figura 25 apresenta o resultado de todos os coagulantes testados menos o COARG 100 pelo problema já referido em 4.3.4 COARG 100.

O sulfato de alumínio apresenta uma eficiência à volta dos 80/85%, muito aquém dos outros coagulantes, mas ao mesmo tempo apresenta-se com uma estabilidade bastante divergente da evolução verificada durante a turvação.

O Panfloc, Tanfloc e o Cloreto apresentam curvas bastante similares às representadas em Figura 33. Entre o Panfloc e o cloreto verifica-se que o cloreto atinge as maiores eficiências de remoção para dosagens mais elevadas do que o Panfloc, apesar da diferença ser pouca: o Panfloc atinge muito rapidamente a sua eficiência máxima em 120 mg/L (5 L/min) e o Cloreto em 196 mg/L (8 L/min). O Sulfato de Alumínio continua a apresentar eficiências muito aquém dos outros.

4.3.5.3 CQO

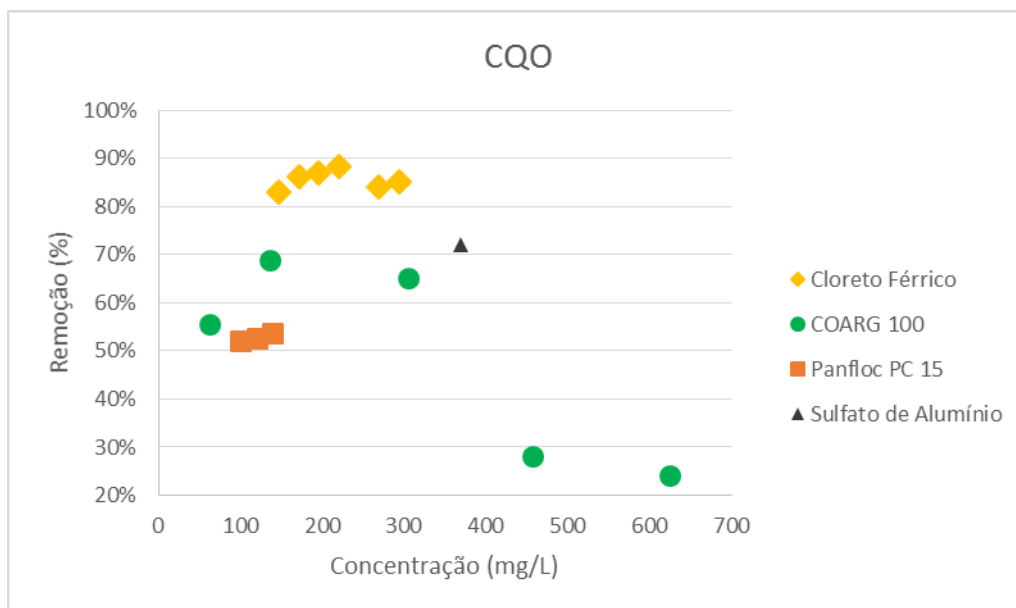


Figura 26 – CQO: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO de diferentes coagulantes.

Os comportamentos dos coagulantes são equivalentes aos comentários já realizados na turvação e SST: O Sulfato de Alumínio apresenta uma eficiência mais baixa para a sua dosagem ótima. Para os pontos representados o Cloreto permanece mais estável do que todos os outros coagulantes testados.

O Panfloc apresenta uma remoção inferior às dos restantes coagulantes, inclusive do sulfato de alumínio, alcançando uma eficiência máxima na ordem dos 53/54%. É a diferença mais relevante, quando comparado com os outros parâmetros de avaliação (SST e turvação). O COARG 100, no seu ponto mais alto, apresenta uma eficiência semelhante à obtida pelo Panfloc.

4.3.5.4 CBO<sub>5</sub>

Tabela 33 – Resultados das medições de CBO<sub>5</sub>.

	CBO <sub>5</sub> Inicial (mg/L)	CBO <sub>5</sub> Final (mg/L)	Remoção de CBO <sub>5</sub> Final (%)
<b>Sulfato</b>	98	34	55
<b>Panfloc</b>	98	*	-
<b>COARG 100</b>	98	217	-121

Os resultados da CBO<sub>5</sub> acabaram por ser todos desprezados. Inicialmente foram realizadas medições aos efluentes tratados com as doses ótimas dos coagulantes sulfato de alumínio, COARG 100 e Panfloc. No entanto os valores obtidos (com excepção do sulfato) demonstraram valores superiores aos valores iniciais e não foram considerados para o tratamento de resultados. O único aumento que

poderia ser esperado seria do coagulante orgânico COARG 100, mas nesse caso o valor final de CQO diminuiu (ver Figura 22 e Tabela 30), pelo que também não seria consistente ter em consideração. Deu-se prosseguimento aos ensaios com o último coagulante (Tanfloc) e face à data de término dos ensaios todos, não houve tempo para realizar as medições de CBO<sub>5</sub>.

A colocação do frasco da CBO<sub>5</sub> no equipamento de leitura é bastante complicado devido ao nível em que se encontra colocado e ao próprio encaixe. Ocorre por vezes, ao encaixar a garrafa para a leitura da CBO<sub>5</sub>, o agitador magnético não ficar bem colocado e não agitar o efluente tratado, pelo que a leitura não se dá corretamente. Creio que tenha sido esse o erro ocorrido na medição da CBO<sub>5</sub>.

4.3.5.5 Custo Económico dos Coagulantes Testados

Tabela 34 – Orçamento de compra dos coagulantes, pelas empresas fornecedoras.

	Custo (R\$/Kg)
<b>COARG 100</b>	4,76
<b>Sulfato de Alumínio</b>	0,724
<b>Panfloc - PC18</b>	0,865
<b>Cloreto Férrico</b>	0,65

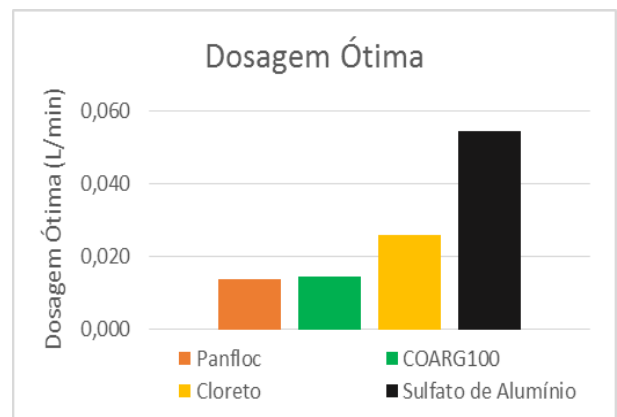


Figura 27 – Gráfico com a diferença nas dosagens ótimas de cada coagulante ótimas.

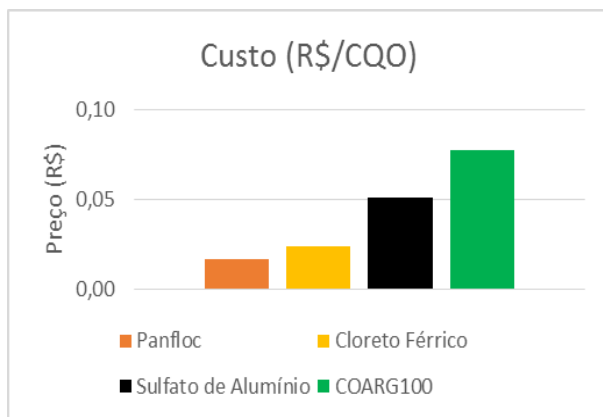


Figura 28 – Gráfico com o Custo Económico Total (R\$/CQO) por tratamento de CQO, para todos os coagulantes.

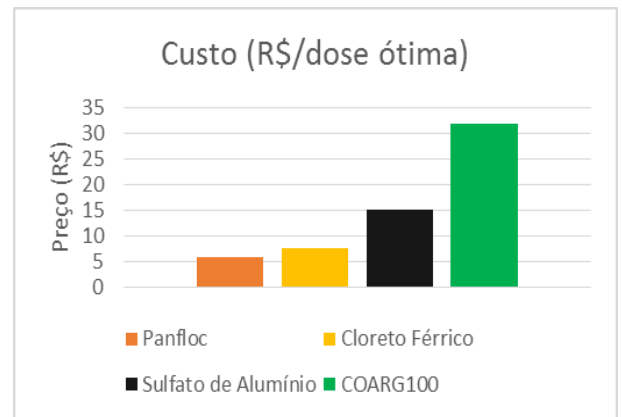


Figura 29 – Gráfico com Custo Económico Total (R\$/dosagem ótima), para todos os coagulantes.

O Panfloc e o COARG 100 possuem uma dose ótima semelhante mas o preço de compra de ambos difere muito, resultando num preço de custo de tratamento para o COARG 100 demasiado elevado. Pelo gráfico da Figura 28 e Figura 29 o Panfloc é o coagulante com um menor custo de tratamento associado, seguido do Cloreto Férrico.

#### 4.3.6 Ensaio Complementar – Tanfloc SL

Devido aos bons resultados do COARG 100, foi pedido pela empresa que se realizassem novos testes, desta vez com o Tanfloc fornecido pela TANAC, S.A., por apresentar um custo muito inferior ao coagulante orgânico testado. Entre o Tanfloc SG e SL foi selecionado o Tanfloc SL por ser o produto com melhores resultados quando aplicado ao efluente da ETE de Icaraí [23].

Os resultados foram realizados nas mesmas condições de mistura e as concentrações selecionadas foram de 62 a 910 mg/L, normalizadas pela CQO inicial: entre 0,08 e 1,18 (mg/L)/CQO.

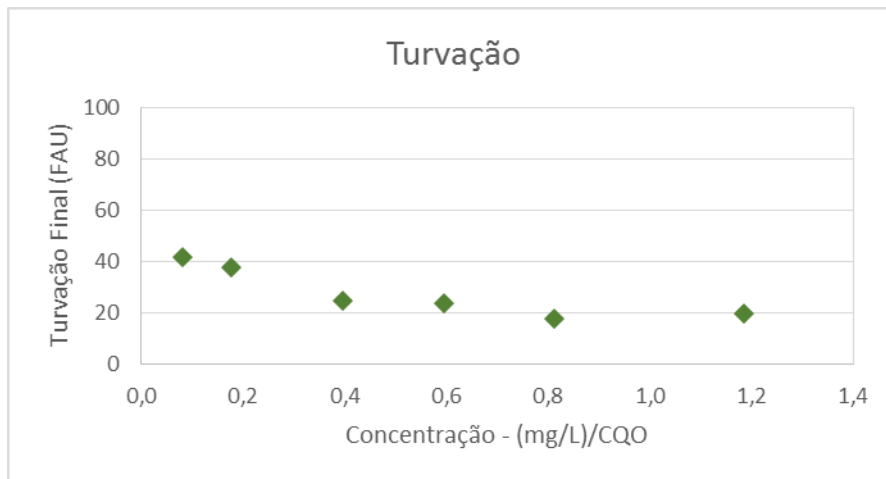


Figura 30 - Tanfloc SL: Gráfico da evolução da turvação (FAU) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

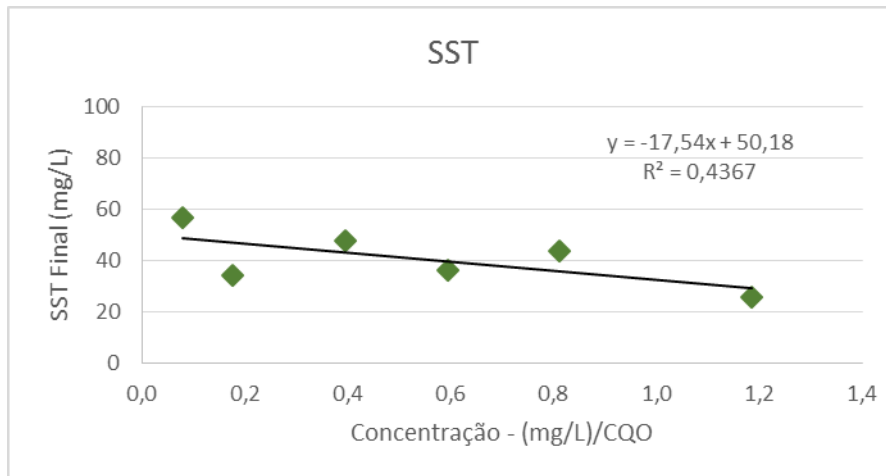


Figura 31 - Tanfloc SL: Gráfico de evolução da remoção de SST (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

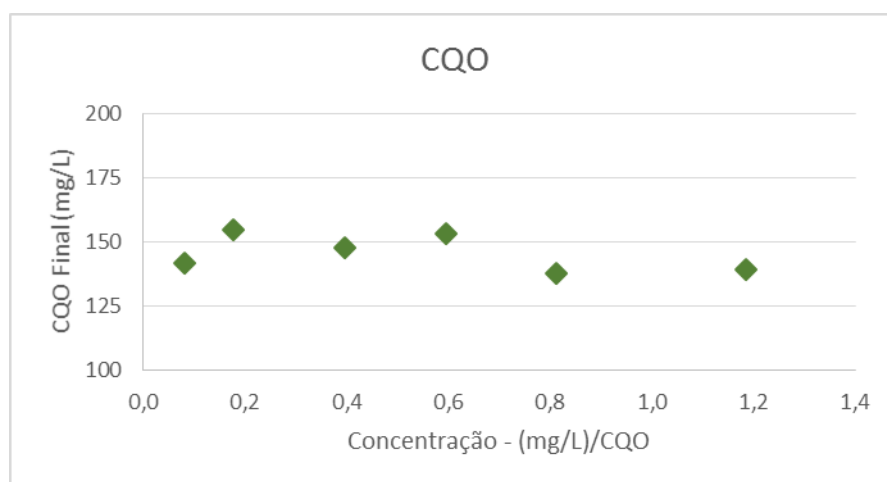


Figura 32 - Tanfloc SL: Gráfico da variação da remoção de CQO (mg/L) com a dose aplicada (mg/L)/CQO.

Observa-se um bom resultado no geral, apesar de se notar que os melhores resultados representados não igualam os resultados obtidos por alguns coagulantes inorgânicos como o Cloreto Férrico e o Panfloc, para a dose ótima respectiva de cada um. No entanto para todas as doses alcançou-se uma redução significativa, em todos os parâmetros: na turvação existe um declive discreto e os valores não variam muito à volta de 20 FAU; na Figura 31 os SST representados apresentam algum desvio entre eles mas no geral observa-se uma ligeira diminuição até à última dose testada (representava pela linha de tendência no gráfico); no caso da CQO, assim como se verifica no gráfico dos SST, os pontos não apresentam grande variação e mantêm-se à volta de uma CQO final entre 135/160 mg/L.

No geral, o Tanfloc foi muito rápido a atuar e possibilitou a formação de flocos grandes e pesados, semelhantes aos formados com o COARG 100: após os 30 min de sedimentação se caracterizaram por não desfazer, mesmo com um agitar de leve no copo.

A seleção da dosagem ótima é complicada precisamente pela pouca variação obtida nos resultados em todos os parâmetros. Em relação à fisionomia dos flocos e da evolução registadas ao longo do ensaio (tempo de formação dos flocos, tamanho, tempo de sedimentação), as doses 0,18 e 0,175 (mg/L)/CQO foram as que formaram os flocos mais rapidamente, em maior número e de maior dimensão – análise visual. Devido aos resultados relativamente mais baixos na Turvação e SST, a dose ótima considerada é 0,175 (mg/L)/CQO. As suas características finais encontram-se na Tabela 36 – Características do Efluente Tratado com dosagem ótima de Tanfloc SL.

Comparando o resultado obtido com o Efluente COARG 100, verificamos que ambos são muito similares mas que, apesar de pouca diferença, o Tanfloc SL acaba por apresentar melhores resultados. A dose ótima que foi considerada é mais elevada que a do COARG 100.

Tabela 35 – Resultados obtidos dos coagulantes orgânicos testados

	Dose (L/min.CQO)	Concentração (mg/L)	Remoção de Turvação (%)	Remoção de SST (%)	Remoção de CQO (%)
<b>COARG 100</b>	0,015	116	74	93,5	69
<b>Tanfloc SL</b>	0,021	135	93	85,5	81

Tabela 36 – Características do Efluente Tratado com dosagem ótima de Tanfloc SL (C=305 mg/L).<sup>27</sup>

Turvação Inicial (FAU)	Turvação Final (FAU)	Remoção de Turvação (%)	Cor Inicial (FAU)	Cor Final (FAU)	Remoção de Cor (%)	SST Inicial (mg/L)	SST Final (mg/L)	Remoção de SST (%)	CQO Inicial (mg/L)	CQO Final (mg/L)	Remoção de CQO (%)
<b>376</b>	36	90%	2200	23	94%	330	57,7	82,5	678	148	81

Após a determinação da dosagem ótima, tal como os testes definitivos realizados, foi efetuada uma análise à formação de lamas, com base na % de SST removidos.

Tabela 37 – Produção de Lamas e custo económico associado

<b>SST removidos (mg/L)</b>	<b>276</b>
<b>SST removidos (g/m<sup>3</sup>)</b>	276
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/d)</b>	1371
<b>Remoção (%) de sólidos por decantação gravítica</b>	80%
<b>Produção de Lamas (kg/d)</b>	<b>7265</b>
<b>Custo tratamento de lamas (R\$/ton)</b>	70
<b>Custo de Tratamento de Lamas (R\$/dosagem ótima)</b>	0,353

Tabela 38 – Custo económico total de consumo

<b>Concentração Ótima (mg/L)/CQO</b>	<b>0,175</b>
<b>Dosagem Ótima (L/min)/CQO</b>	<b>0,021</b>
<b>Custo (R\$/Kg)</b>	1,22
<b>Custo (R\$/L)</b>	1,342
<b>Custo (R\$/dose ótima)</b>	<b>9,394</b>
<b>Custo (R\$/CQO)</b>	2,8E-02
<b>Custo Total (R\$/dose ótima)</b>	<b>9,75</b>
<b>Custo Total (R\$/CQO)</b>	2,8E-02

<sup>27</sup> Neste teste suplementar não foi realizada análise de CBO<sub>5</sub> por falta de tempo.

#### 4.3.7 Comparação Final de todos os coagulantes testados

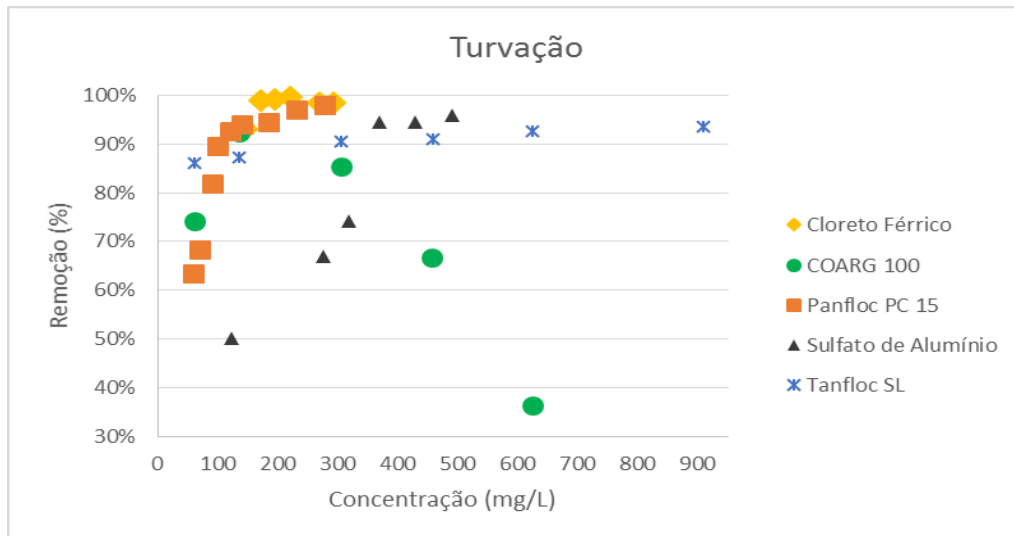


Figura 33 - Turvação: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO para todos os coagulantes.

Na análise da turvação o Tanfloc SL apresenta uma evolução quase linear, distinguindo-se juntamente com o cloreto férrico, pela pouca variação ao longo da adição de produto, o que se revela uma vantagem em relação aos outros coagulantes por não necessitar de uma vigilância constante e muito ajuste à dosagem aplicada. O Cloreto Férrico apresenta uma gama de testes mais concentrada, o que não permite verificar se o Tanfloc é efetivamente mais estável ou não.

O Panfloc atinge rapidamente valores acima de 90%, mais do que o cloreto férrico, e estabiliza até à última dose representada (278 mg/L). O sulfato de alumínio é o coagulante que obtém piores resultados visivelmente: apenas com dosagens a partir de 369 mg/L atinge resultados com 69% de remoção. Existe uma diferença visível entre os coagulantes orgânicos: o COARG 100 apenas apresentar um resultado com eficiência equivalente ao Tanfloc e todos os outros resultados apresentam eficiências muito inferiores às do Tanfloc.

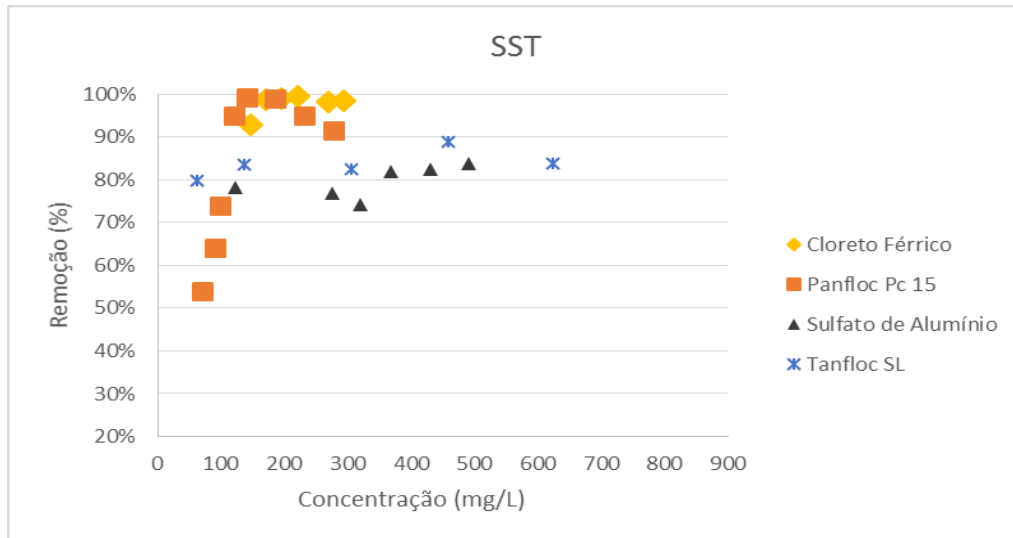


Figura 34 - SST: Representação Gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO para todos os coagulantes.

Em relação à evolução dos SST existem algumas diferenças a realçar, face aos resultados da turvação, e a maior diferença é o caso do sulfato de alumínio: apresenta eficiência em torno dos 80/85%, mais baixa do que os outros coagulantes, mas ao mesmo tempo apresenta-se com uma estabilidade bastante diferente da evolução verificada durante a turvação. O Panfloc, Tanfloc e o Cloreto apresentam curvas bastante similares às apresentadas na Figura 33: o Tanfloc apresenta-se igualmente estável com uma gama de remoção entre os 80/90% e apresenta eficiências mais reduzidas do que o Panfloc e o Cloreto férrico.

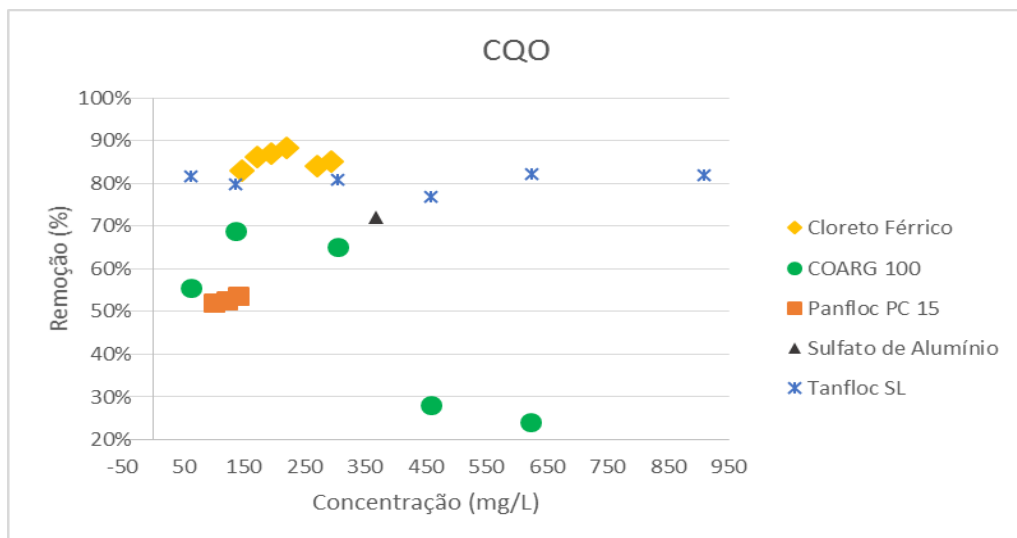


Figura 35<sup>28</sup> - CQO: Representação gráfica do comportamento do efluente com a dose aplicada (mg/L)/CQO aplicada para todos os coagulantes.

<sup>28</sup> O eixo vertical não foi formatado para iniciar a partir dos 70% para ser mais fácil comparar na leitura com os gráficos anteriores da turvação e SST.



A Figura 35 não apresenta as mesmas gamas de teste que os parâmetros de avaliação anteriores, pelos motivos que foram já mencionados anteriormente na discussão de resultados de cada coagulante em específico (ver 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.6). No entanto, e como pelo menos todos os coagulantes têm a dose ótima representada no gráfico é possível afirmar que o Panfloc continua a ser o coagulante com um resultado menos eficiente, seguido do sulfato de alumínio; o cloreto é o coagulante que apresenta maior eficiência de remoção, seguido do tanfloc.

O Tanfloc mantém a eficiência à volta de 80% de remoção ao longo de toda a gama testada e em todas as concentrações testadas, verifica-se que o Tanfloc obteve resultados de eficiência de remoção sempre superiores aos do COARG 100.

Para uma concentração de 150 mg/L de coagulante (dosagem ≈6L/min) as melhores eficiências de remoção correspondem, respetivamente e por ordem, ao Cloreto Férrico, Tanfloc, COARG 100 e Panfloc.

#### 4.3.8 Análise Económica Final

Comparando os três parâmetros, verifica-se que todos os coagulantes apresentam vantagens e desvantagens em relação aos outros para aplicação num sistema real de tratamento, exceto o sulfato de alumínio que em todas as comparações realizadas ficou aquém das expectativas. Para tomar então uma decisão final, é preciso analisar o custo económico da aplicação de cada um destes produtos.

A análise económica foi feita na moeda nacional brasileira – o Real (R\$) – e com base no preço orçamentado pelas empresas que forneceram as amostras para ensaio em laboratório (já referidas anteriormente).

Tabela 39 – Custo do Produto orçamentado pelas empresas fornecedoras

	<b>Custo (R\$/Kg)</b>
<b>Cloreto</b>	0,65
<b>Sulfato de Alumínio</b>	0,724
<b>Panfloc - PC18</b>	0,865
<b>Tanfloc SL</b>	1,22
<b>COARG 100</b>	4,76

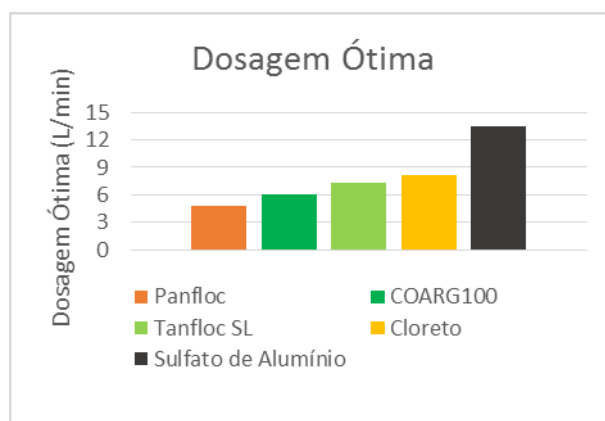


Figura 36 – Gráfico com a diferença nas dosagens ótimas, para todos os coagulantes.

Multiplicando o preço da dose (R\$/L)<sup>29</sup> de coagulante pela dose ótima de aplicação, obtemos o preço de custo de aplicação por dose de tratamento (R\$/dose ótima). Se procedermos à mesma análise, mas agora por custo de tratamento de CQO de entrada, obtemos a mesma ordem de custo (Figura 38).

Tabela 40 – Custo Económico Total (R\$/dose)

Coagulante	Custo (R\$/dose)
Panfloc - PC18	5,94
Cloreto	7,70
Tanfloc SL	9,75
Sulfato de Alumínio	15,14
COARG 100	31,75

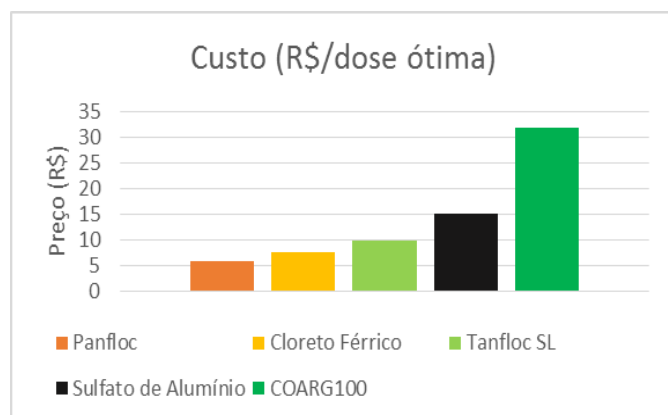


Figura 37 – Gráfico do Custo Económico Total (R\$/dosagem ótima), para todos os coagulantes.

Tabela 41 – Custo Económico Total (R\$/CQO)

Coagulante	Custo (R\$/CQO)
Panfloc - PC18	1,7E-02
Cloreto	2,4E-02
Tanfloc SL	2,8E-02
Sulfato de Alumínio	5,1E-02
COARG 100	7,7E-02

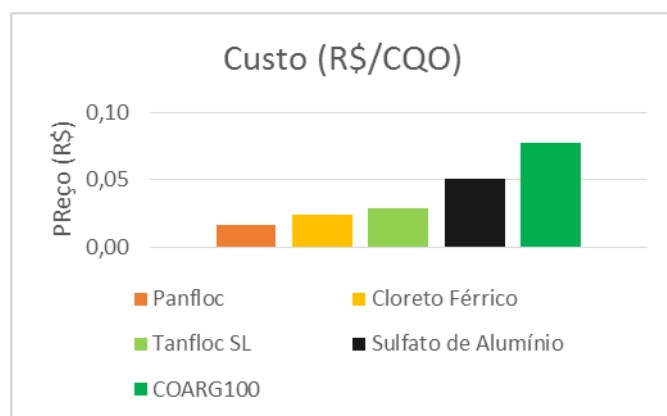


Figura 38 – Gráfico do Custo Económico Total (R\$/CQO) por tratamento de CQO, para todos os coagulantes.

Depois desta análise e por observação das respetivas tabelas e gráficos verifica-se que o coagulante com um custo de aplicação mais económico para a ETE é o Panfloc (Figura 37 e Figura 38). A ordem crescente de aplicação mais económica para a menos económica é: Panfloc PC 15, Cloreto Férrico, Tanfloc SL, Sulfato de Alumínio.

<sup>29</sup> O preço da dose (R\$/L) é o resultado do preço (R\$/Kg) orçamentado pela densidade de cada coagulante (kg/m<sup>3</sup>).

## 5 Conclusões Finais

No presente estudo concluiu-se que a energia correspondente ao gradiente de velocidade, na caixa de mistura, é demasiado elevada para os máximos estabelecidos na etapa de coagulação (até  $1500 \text{ s}^{-1}$ ). Para uma temperatura média de  $20^\circ\text{C}$ , o valor ultrapassa em  $900 \text{ s}^{-1}$  o valor máximo recomendado para esta etapa, sendo que com o aumento da temperatura registado nos meses de verão ( $T=30^\circ\text{C}$ ), o valor chega a atingir uma diferença de  $1278 \text{ s}^{-1}$ .

Tendo em conta as possibilidades limitadas de alteração na construção da ETE de momento e o reduzido espaço disponível para obras e manobras no interior da ETE, seria recomendável pensar numa alteração das dimensões da caixa de mistura, tendo em conta o caudal máximo para o projeto da ETE. Em caso de projeto de ampliação, as obras devem ter estes dados em consideração.

Neste projeto não foram realizados testes à velocidade e tempo ótimo de mistura para o cloreto férrico, mas na literatura é referida a velocidade ótima como 100-150 rpm (durante 2 min de mistura) e 20 rpm (durante 20 min). Estes valores são muito inferiores obtidos aos do escoamento do efluente sob pressão nas condutas até ao decantador e dos próprios tempos e velocidades admitidos nos ensaios realizados em Jar-Test (116 rpm durante 27 s e 15 rpm durante 20 min), e estão longe de promoverem uma mistura correta para a formação dos flocos. Apesar da velocidade e tempo de mistura não serem os principais fatores de estudo num processo de coagulação-floculação, são fatores importantes de estudo e influenciam os resultados obtidos. Não são decisivos na seleção do tipo de coagulante que melhor reage com o efluente, mas podem fazer variar a dose ótima selecionada, para dosagens inferiores às atuais, tendo em conta o excesso de energia difundido e velocidades excessivas de mistura. A velocidade e tempo de mistura podem ainda comparar-se aos resultados obtidos atualmente na ETE: para 172 e 196 mg/L (7 e 8 L/min) de cloreto férrico, normalmente aplicados na ETE, obtiveram-se no ensaio Jar-Test remoções de 86%/87%, para a CQO; nos relatórios mensais enviados *online* para cumprimento do programa legislativo PROCON-ÁGUA, a remoção para a mesma média de dose de aplicação (média utilizada de 7,5 L/min) é de 39,1%.

Existe uma diferença percentual significativa entre os ensaios realizados em laboratório para os resultados reais mas esta comparação, com a descrição anterior das condições hidráulicas, sugere que existem muitas componentes que escapam ao controlo operacional do processo químico que ocorre na ETE.

A nível dos decantadores, os tempos de retenção hidráulica variam entre 1,33 e 0,73 h para os caudais mínimos e máximos do projeto – o TRH para  $Q=0,952 \text{ m}^3/\text{s}$  é de 1,05 h. A carga hidráulica superficial é sempre inferior ao valor mínimo de projeto de  $24 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ : para o caudal mínimo e médio as cargas respetivas atingem valores de 16 e  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ ; para o caudal máximo o valor da carga superficial é quase metade do valor recomendado ( $29$  para  $50 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ , respetivamente). Com estes resultados verifica-se que as condições em que se dá a sedimentação floculenta não são as apropriadas para o

efeito, contribuindo também para a diferença percentual (%) entre os resultados obtidos em laboratório e os reais, mencionados já anteriormente.

Assim, para qualquer modificação realizada a nível operacional na ETE sugere-se a realização de um estudo de otimização da velocidade e tempo de mistura para o coagulante aplicado na ETE e a sua viabilização económica de aplicação.

Os coagulantes testados apresentaram todos, boas eficácias de remoção, para todas as doses testadas. O Tanfloc é o coagulante que apresenta melhores resultados para doses mais baixas; o Cloreto Férrico e o Panfloc foram os que apresentaram melhores resultados a nível de eficiências alcançadas e o sulfato de alumínio foi o coagulante com eficiências de remoção mais baixas (e com dosagens de aplicação mais altas).

Entre o Tanfloc e o COARG 100, o Tanfloc apresentou-se mais vantajoso no geral, pelo preço de compra ser mais baixo e por se apresentar com eficiências muito elevadas de remoção, mesmo para as doses mais baixas testadas. Num caso prático em que existem muitos fatores que fazem com que a própria dosagem ótima encontrada seja diferente da testada em laboratório, o Tanfloc é mais facilmente aplicado, e com melhores resultados, porque não necessita de encontrar a dose ótima equivalente à do laboratório para obter resultados satisfatórios. A própria diferença reduzida entre as remoções máximas e mínimas obtidas garantem que num processo real os resultados do efluente à saída sejam semelhantes com os registados em laboratório.

O melhor coagulante a aplicar na ETE é o Panfloc (a nível económico), com uma distinção de 1,76 R\$/dose ótima de diferença no custo final. A ordem completa dos coagulantes a aplicar, do mais para o menos económico é: Panfloc, Cloreto Férrico, Tanfloc SL, Sulfato de Alumínio e COARG 100. Apesar do Panfloc ser o coagulante que mais compensa a nível económico, é necessário ter em atenção a diferença de resultados encontrada na remoção da CQO que é muito inferior à do cloreto férrico, atualmente utilizado. Verificando-se uma diferença acentuada entre o processo real e os resultados em laboratório (como se verifica no processo atual com o cloreto férrico), é de esperar que a eficiência de tratamento obtida com este coagulante não alcance os resultados mínimos desejados de tratamento para a CBO<sub>5</sub>.

Todos os coagulantes apresentaram resultados concordantes com os resultados apresentados na publicação do livro PROSAB [23], que realizou ensaios de coagulação-floculação com efluente da ETE de Icarai. O teste efetuado em laboratório pela empresa (ver 2.3.4 Policloreto de Alumínio – Panfloc/PAC) não coincide com as conclusões aqui encontradas e da publicação referida [23] mas não é possível concluir o motivo por falta de registo dos resultados.

É possível entender o motivo pelo qual o manual de instruções da ETE de Icarai que acompanhou a compra do projeto, apresenta o cloreto férrico como o coagulante previamente selecionado para dosagem na ETE. O cloreto férrico foi dos coagulantes testados que apresentou melhores resultados e

seria provavelmente dos poucos disponíveis no mercado (só recentemente é que o Panfloc entrou no mercado, assim como o Tanino).

Como trabalhos futuros para a ETE de Icaraí seria interessante testar novamente o Tanfloc SL entre os intervalos de concentrações 62-136 mg/L (dosagens 3-7 L/min e para uma CQO=350 mg/L). Caso a dose ótima do Tanfloc seja considerada até 80 mg/L (dosagem de 4,15 L/min), o Tanfloc SL passa a ser considerado como o coagulante mais económico para aplicação (em relação a todos os outros coagulantes); se a dose ótima for determinada entre 80 a 105 mg/L (dosagem de 5,475 L/min), o tanino é considerado mais económico do que a aplicação do que o cloreto férrico. Aconselha-se também a realizar um teste de  $CBO_5$  final para testar a diferença de  $CBO_5$  da inicial.

Apesar de não ter sido pedido, para ter mais garantias, seria interessante realizar um ensaio de otimização do pH na ETE de Icaraí. Em princípio, com a temperatura da água média ( $T=25^{\circ}C$ ) as diferenças não serão economicamente viáveis com o produto gasto para correção de pH. No entanto, como foi um estudo nunca realizado, traz mais garantias ao processo utilizado atualmente e pode ter influência na dose ótima final utilizada.

Por último, para complementar o dimensionamento dos decantadores, poderia ser realizado um estudo à velocidade de sedimentação atual.



## 6 Revisão Bibliográfica

1. Sánchez-Martín, J., J. Beltrán-Heredia, and C. Solera-Hernández, *Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials*. Journal of Environmental Management 2010. **91**: p. 2051-2058.
2. Chia-Yau, C., *Ensaio de tratamento físico-químico de água potável por coagulação – floculação e decantação – Jar Test*, 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
3. Editions, M.-H.I., *Wastewater Engineering - Treatment, Disposal, Reuse*. Third Edition ed.
4. Águas, A.N.d., *Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no BRASIL*. Vol. 1 - Caderno de Recursos Hídricos. 2005, Brasil.
5. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Consultado em Maio, 2010; Available from: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=330330>.
6. SAAB, *Grupo Águas do Brasil*, 2010.
7. *Manual de Operação da ETE de Icaraí*.
8. Samuel D. Faust and O.M. Aly, *Removal of Particulate Matter by Coagulation*, in *Chemistry Of Water Treatment*, C.P. LLC, Editor. 1998: United States of America.
9. Eddy, M., *Fundamentals Of Chemical Coagulation*, in *Wastewater Engineering - Treatment and Reuse*. 2003, McGraw-Hill Companies, Inc.: United States of America.
10. SILVA, M.M.M.d., *Ensaio de Coagulação Floculação da Água Residual Afluente à Etar de Avis*, in *Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente* Lisboa, Universidade Nova de Lisboa.
11. Han Yun, et al., *The effect of dissolved organic matter on Zeta potential during the coagulation process in 2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring* 2011, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China: China.
12. Netto, J.M.A. and C.A. Richter, *Tratamento de Água - Tecnologia Utilizada*. 1991, Brasil: Edgard Blucher LTDA.
13. Association, A.W.W., *Coagulation and Flocculation*, in *Water Quality & Treatment*, I. McGraw-Hill, Editor. 1999: United States of America.
14. Y. Zhou, Z. Liang, and Y. Wang, *Decolorization and COD removal of secondary yeast wastewater effluents by coagulation using aluminium sulfate*. Desalination, 2008. **225**: p. 301-311.
15. M. Karthik, et al., *Biodegradability enhancement of purified terephthalic acid wastewater by coagulation-flocculation process as pretreatment*. J. Hazard Matter, 2008. **154**: p. 721-730.
16. A. Ginos, T. Manios, and D. Mantzavinos, *Treatment of olive mill effluents by coagulation-flocculation-hydrogen peroxide oxidation and effect on phytotoxicity* J. Hazard Matter, 2006. **133**: p. 135-142.
17. *Cloreto Férrico - Solução*, in *Ficha Química*, A.-I. química, Editor.
18. AlMubaddal, F., K. AlRumaihi, and A. Ajbar, *Performance optimization of coagulation/flocculation in the treatment of wastewater from a polyvinyl chloride plant*. Journal of Hazardous Materials, 2008. **161**: p. 431–438.

19. O.S. Amuda and A. Alade, *Coagulation/flocculation process in the treatment of abattoir wastewater*. Desalination, 2006. **196**: p. 22–31.
20. Geoffrey S. Simate, et al., *The heterogeneous coagulation and flocculation of brewery wastewater using carbon nanotubes*. water research 46 (2012) 1185e1197, 2012. **46**: p. 1185-1197
21. Pervissian, A., et al., *Combined MBBR-MF for Industrial Wastewater Treatment*. Environmental Progress & Sustainable Energy - Wiley Online Library 2011. **31**(2).
22. JAVIER RIVAS, et al., *Treatment of Cheese Whey Wastewater: Combined Coagulation-Flocculation and Aerobic Biodegradation*. Journal of Agricultural and Food Chemistry Article, 2010. **58**: p. 7871–7877
23. básico, P.-P.d.p.e.s., *Estudos de Caracterização e Trata-bilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras.*, P.-E. 5, Editor 2012.
24. Tania Chatterjee, et al., *Coagulation of soil suspensions containing nonionic or anionic surfactants using chitosan, polyacrylamide, and polyaluminium chloride*. Chemosphere, Elsevier, 2009. **75**.
25. Zuxin XU, et al., *Optimization of coagulation-flocculation conditions for the treatment of combined sewer overflow wastewater in Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT), 2010 International Conference on 2010*: Wuhan, China.
26. Yufeng Wang, et al., *Optimization of coagulation-flocculation process for papermaking-reconstituted tobacco slice wastewater treatment using response surface methodology*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013.
27. Zou, Y., W. Zhang, and W. Zhou, *An Experimental Study on Choosing Coagulant and Determining Optimum Coagulation Conditions for Treating Wastewater from Regenerate Paper Industries*, in *Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on 2010*: Chengdu, China.
28. Ruth Ordonez, et al., *Combining coagulation, softening and flocculation to dispose reverse osmosis retentates*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2012. **18**: p. 926–933.
29. Aguiar, M.I., et al., *Improvement of coagulation-flocculation process using anionic polyacrylamide as coagulant aid*. Chemosphere, Elsevier, 2005. **58**: p. 47-56.
30. Carlos E. Santo, et al., *Optimization of coagulation–flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant*. Chemical Engineering Journal, Elsevier, 2012. **183**: p. 117-123.
31. *Coagulation Flocculation Test of Keddara's Water Dam Using Chitosan and Sulfate Aluminium*. Procedia Engineering, Science Direct, 2012. **33**: p. 254 – 260.
32. Ibrahim M. Ismail, et al., *Combined coagulation flocculation pre treatment unit for municipal wastewater*. Journal of Advanced Research 2012. **3**: p. 331–336.
33. F. Xiao, et al., *PIV characterisation of flocculation dynamics and floc structure in water treatment*. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, Elsevier, 2011. **379**: p. 27–35.
34. J. Beltrán-Heredia and J. Sánchez-Martín, *Municipal wastewater treatment by modified tannin flocculant agent*. Desalination, Elsevier, 2009. **249**: p. 353-358.
35. Sánchez-Martín, J., M. González-Velasco, and J. Beltrán-Heredia, *Surface water treatment with tannin-based coagulants from Quebracho (Schinopsis balansae)*. Chemical Engineering Journal, Elsevier, 2010. **165**: p. 851-858.



36. SILVA, M.M.M.d., *ENSAIOS DE COAGULAÇÃO FLOCULAÇÃO DA ÁGUA RESIDUAL AFLUENTE À ETAR DE AVIS*, in *Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente* 2010, Universidade Nova de Lisboa Lisboa.
37. Heredia, J.B. and J.S. Martín, *Removing heavy metals from polluted surface water with a tannin-based flocculant agent*. *Journal of Hazardous Materials* 2009. **165**: p. 1215–1218.
38. Figueiredo, M.M.P., *Mecânica dos Fluidos II - escoamentos em Superfície Livre*, in *Departamento de Engenharia Civil* 2011, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
39. Botelho, C., *Coagulação-Floculação*, in *Tecnologias e Sistemas de Tratamento de Águas II*. 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
40. Yau, C.C., *Tratamento Primário por Decantação Gravítica*, 2013, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



# Anexos

## ANEXO I - Formulário de preenchimento obrigatório por parte do programa PROCON-ÁGUA

Tabela 42 – Padrões e Critérios de análise das amostras ao efluente tratado: concentração máxima; tipo de amostra e frequência de análise<sup>30</sup>

<b>inea</b>	GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO URBANO INSTITUTO ESTADUAL DE AMBIENTE
	Nº - 419.035
Comprovante de Entrega do Relatório de Acompanhamento de Efluentes - RAE	
Data de entrega: 20/03/2013	
Empresa: ÁGUAS DE NITERÓI S/A Logradouro: RUA LEMOS CUNHA, 510 Bairro: ICARAÍ Município: NITERÓI Cep: 24230-136 CNPJ: 02.160.336/0001-66 Processo: E-07/202325/2003 Saída: ETE Referente ao Período: De: 01/01/2013 Até: 31/01/2013	

<b>inea</b>	RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO DE EFLUENTES - RAE		Processo: Rubrica: Folha: (Page N of N)					
	Empresa: ÁGUAS DE NITERÓI S/A		Município: NITERÓI					
Logradouro: RUA LEMOS CUNHA, 510		CEP: 24230-136		Telefone(DDD):				
Bairro/Localidade: ICARAÍ		Código da Empresa: 4197		Cargo Recebtor: SAA DE GUANDARA				
Código da Empresa: 4197		Per. do Relatório: 01/01/2013 - 31/01/2013		Tratamento: Biológico				
LO. Nº:	Unidade: ETE							
Ordem	Vazio	DBO (x) - mg/L	DBO (y) - mg/L	DBO (z) - mg/L	ODM (x) - mg/L	ODM (y) - mg/L	pH (x) - Valor	pH (y) - Valor
1	0,00							
2	0,00							
3	0,00							
4	0,00							
5	0,00							
6	0,00							
7	0,00							
8	0,00							
9	0,00							
10	0,00							
11	0,00							
12	0,00							
13	0,00							
14	0,00							
15	0,00							
16	0,00							
17	0,00							
18	0,00							
19	0,00							
20	0,00							
21	0,00							
22	0,00							
23	0,00							
24	0,00							
25	0,00							
26	0,00							
27	0,00							
28	0,00							
29	0,00							
30	0,00							
31	0,00							
FAZENDA		96,87	92	80,00	20	10	6,96	6,75
T. AMOSTRA		COMPOSTO	COMPOSTO	COMPOSTO	COMPOSTO	COMPOSTO	COMPOSTO	COMPOSTO
FREQUÊNCIA		1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30
MÉDIA MENSAL	00,00	96,87	92,00	80,00	20,00	10,00	6,96	6,75
Data: _____ Nome: ÁGUAS DE NITERÓI S/A								
Endereço: _____								
Declaro serem verdadeiras, completas e precisas as informações prestadas neste relatório ratificando os dados expressamente justificados no campo 10.								
Assinatura: _____				Data: _____				
Nome: _____				Nome: _____				
Cargo: _____				Responsável Pela Atividade				

<sup>30</sup> Os critérios que não apresentam valores máximos não possuem limite legislativo. No entanto, é obrigatória a sua medição.



# Otimização de um Processo de Coagulação-Floculação na ETE de Icaraí

<b>inea</b>	RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO DE EFLUENTES - RAE	Processo:	
		Substância:	Folha: (Page # of #)
Caracterização do volume de efluente lançado no período de:			
Volume de efluentes líquidos lançados no período coberto por este relatório: <b>2196289,00</b>			
Este volume foi lançado da seguinte forma:			
Cobertura 21 dias ou por batelada 0,00 m <sup>3</sup> @ horas 0 min.			
Tempo de operação do sistema de tratamento: 24/dia			
0			
Caso a empresa não seja vinculada ao sistema de medição de resíduos industriais do Inea indicar o destino de cada tipo de resíduo gerado no processamento industrial e / ou no tratamento de efluentes líquidos, anexando comprovante de venda ou disposição em aterro.			
0			
Outros poluentes que possam ser gerados no processo industrial			
0			



## ANEXO II - Lista de Artigos Consultados na Revisão Bibliográfica

✓ Cloreto Férrico

- 1 Pervissian, A., et al. (2011). "Combined MBBR-MF for Industrial Wastewater Treatment." Environmental Progress & Sustainable Energy - Wiley Online Library **31**(2).
- 2 JAVIER RIVAS, et al. (2010). "Treatment of Cheese Whey Wastewater: Combined Coagulation-Flocculation and Aerobic Biodegradation." Journal of Agricultural and Food Chemistry Article **58**: 7871–7877
- 3 Geoffrey S. Simate, et al. (2012). "The heterogeneous coagulation and flocculation of brewery wastewater using carbon nanotubes." water research **46** (2012) 1185e1197 **46**: 1185-1197
- 4 O.S. Amuda and A. Alade (2006). "Coagulation/flocculation process in the treatment of abattoir wastewater." Desalination **196**: 22–31.

✓ PAC

- 5 Tania Chatterjee, et al. (2009). "Coagulation of soil suspensions containing nonionic or anionic surfactants using chitosan, polyacrylamide, and polyaluminium chloride." Chemosphere, Elsevier **75**.
- 6 Zuxin XU, et al. (2010). Optimization of coagulation-flocculation conditions for the treatment of combined sewer overflow wastewater Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT), 2010 International Conference on. Wuhan, China.
- 7 Zou, Y., et al. (2010). An Experimental Study on Choosing Coagulant and Determining Optimum Coagulation Conditions for Treating Wastewater from Regenerate Paper Industries. Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on. Chengdu, China.
- 8 Yufeng Wang, et al. (2013). "Optimization of coagulation-flocculation process for papermaking-reconstituted tobacco slice wastewater treatment using response surface methodology." Journal of Industrial and Engineering Chemistry **ainda a ser publicado**.
- 9 Zhang, Z., et al. (2009). "Study on Industrial Synthesis of Poly Aluminum Chloride and Coagulation Effect with Different Basicities " IEEE Explore.
- 10 Han Yun, et al. (2011). The effect of dissolved organic matter on Zeta potential during the coagulation process 2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring. China, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China.
- 11 Ruth Ordonez, et al. (2012). "Combining coagulation, softening and flocculation to dispose reverse osmosis retentates." Journal of Industrial and Engineering Chemistry **18**: 926–933.
- 12 Sulfato de alumínio
- 13 Zheng, H., et al. (2011). "Investigations of coagulation–flocculation process by performance optimization, model prediction and fractal structure of flocs." Desalination **269**: 148-156.
- 14 F. Xiao, et al. (2011). "PIV characterisation of flocculation dynamics and floc structure in water treatment." Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, Elsevier **379**: 27–35.
- 15 , M., et al. (2007). "Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater." Desalination: 113–127.
- 16 AIMubaddal, F., et al. (2008). "Performance optimization of coagulation/flocculation in the treatment of wastewater from a polyvinyl chloride plant." Journal of Hazardous Materials **161**: 431–438.
- 17 Carlos E. Santo, et al. (2012). "Optimization of coagulation–flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant." Chemical Engineering Journal, Elsevier **183**: 117-123.
- 18 Aguiar, M. I., et al. (2005). "Improvement of coagulation-flocculation process using anionic polycrylamide as coagulant aid." Chemosphere, Elsevier **58**: 47-56.

- 19 Ibrahim M. Ismail, et al., Combined coagulation flocculation pre treatment unit for municipal wastewater. *Journal of Advanced Research* 2012. **3**: p. 331–336.
- 20 Coagulation Flocculation Test of Keddara's Water Dam Using Chitosan and Sulfate Aluminium. *Procedia Engineering, Science Direct*, 2012. **33**: p. 254 – 260.
- ✓ Tanino
- 21 Sánchez-Martín, J., et al. (2010). "Surface water treatment with tannin-based coagulants from Quebracho (*Schinopsis balansae*)." *Chemical Engineering Journal, Elsevier* **165**: 851-858.
- 22 Sánchez-Martín, J., et al. (2010). "Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials." *Journal of Environmental Management* **91**: 2051-2058.
- 23 Heredia, J. B. and J. S. Martín (2009). "Removing heavy metals from polluted surface water with a tannin-based flocculant agent." *Journal of Hazardous Materials* **165**: 1215–1218.
- 24 J. Beltrán-Heredia and J. Sánchez-Martín, *Municipal wastewater treatment by modified tannin flocculant agent*. Desalination, Elsevier, 2009. **249**: p. 353-358.
- ✓ Coagulação/Floculação
- 25 ROSSINI, M., et al. (1999). "Optimization of the Coagulation/Flocculation Treatment: Influence of Rapid Mix Parameters." *Wat. Res.* **33**(8): 1817±1826.
- 26 Rivas, F. J., et al. (2004). "Stabilized leachates: sequential coagulation–flocculation + chemical oxidation process." *Journal of Hazardous Materials* **116**: 95–102.
- 27 Ntampou, X., et al. (2006). "Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates." *Chemosphere* **62**: 722–730.
- 28 Wei Li a, T. H., et al. (2010). "Treatment of stabilized landfill leachate by the combined process of coagulation/flocculation and powder activated carbon adsorption." *Desalination* **256**: 56–62.
- 29 Ghafari, S., et al. (2010). "The use of poly-aluminum chloride and alum for the treatment of partially stabilized leachate: A comparative study." *Desalination* **257**: 110–116.
- 30 Khai Ern Lee, et al. (2012). "Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review." *Chemical Engineering Journal, Elsevier* **203**: 370–386.
- 31 Yi-Fan Wu, et al. (2011). "A study of titanium sulfate flocculation for water treatment." *Water Research - ScienceDirect* **45**: 3704-3711.
- ✓ Outros Gerais
- 32 básico, P.-P. d. p. e. s. (2012). Estudos de Caracterização e Trata-bilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras. P.-E. 5. **3**.
- 33 SILVA, M. M. M. d. (Lisboa). Ensaio de Coagulação Floculação da Água Residual Afluente à Etar de Avis. *Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Universidade Nova de Lisboa. Mestrado*.
- 34 Ribeiro, A. T. A. (2010). Aplicação da Moringa Oleifera no Tratamento de Água para Consumo Humano. *Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado*.
- 35 Costa, J. F. P. G. d. (2002). Análise e optimização do processo de coagulação/floculação química na ETAR de Barcelos. *Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado*.
- 36 Soares, T. F. L. (2009). Remoção da carga orgânica afluente à ETAR de Tolosa por coagulação-floculação química. *Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado*.
- 37 Caldeira, A. C. L. (2008). Estudo da Problemática da Presença de Alumínio na Linha de Tratamento de Água para Consumo Humano, na ETA da Póvoa. *Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Mestrado*.
- 38 Alves, R. C. d. R. (2001). Tratamento físico-químico (adsorção e coagulação/floculação química) de efluentes líquidos de cabines de pinturas de empresas do sector da madeira e imobiliário, Faculdade de Engenharia da



- Universidade do Porto.
- 39 Correia, J. C. P. (2012). Tratamento de Efluentes de Suinicultura por Coagulação/Floculação - Estudo Comparativo da Utilização de Biopolímeros versus Coagulantes convencionais, Instituto Superior de Agronomia - Universidade Técnica de Lisboa. **Mestrado.**



## ANEXO III - Métodos Analíticos de Análise

### ✓ Método de Determinação do pH

O pH foi medido em todas as amostras, brutas e já clarificadas.

O princípio do método é a quantificação da concentração dos íons H<sup>+</sup> presentes na amostra, através de um eletrodo medidor de pH.

Os valores obtidos vêm em escala de *Sorensen* e a classificação da água é feita consoante os resultados dos intervalos obtidos:

≤7 – Solução Ácida

=7 – Solução Neutra

≥7 – Solução Alcalina

### ✓ Método de Determinação de Condutividade

A medição da Condutividade foi igualmente quantificada em todas as amostras. A Condutividade quantifica a capacidade de indução da corrente elétrica, que depende da concentração dos íões minerais dissolvidos (como o Sódio ou Cloreto), que têm origem na quantidade de sólidos suspensos e dissolvidos na amostra.

A unidade é expressam em microSiemens por centímetro (μS/cm).

### ✓ Método de Determinação de Sólidos Suspensos Totais

É importante tomar conhecimento da quantidade de sólidos em suspensão na amostra para quantificar a sua eficiência de remoção, face à quantidade inicial – medições em todos os sobrenadantes e diferentes recipientes de águas brutas.

Procede-se à filtração de um determinado volume (fixo) de solução por um filtro de membrana, previamente preparado, seco e pesado. Após a filtração, o filtro é novamente seco em estufa a uma temperatura de 105°C durante um período de 2h e depois retirado e colocado no exsicador até atingir a temperatura ambiente. A sua pesagem final é realizada na balança analítica, e apresentada sobre a forma final de mg/L.

Os cálculos realizados para expressar q quantidade de sólidos sob a forma de mg/L e sob a forma de eficiência de remoção recorreram às seguintes equações:

$$SST \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(a-b)(mg)}{V_{filtrado}(L)}$$

Equação vii – Remoção de SST (mg/L)

$$SST (\% \text{ de remoção}) = \frac{SST_{\text{Água Bruta}} - \frac{SST_1 + SST_2 + SST_3}{3}}{SST_{\text{Água Bruta}}} * 100\%$$

Equação viii – Remoção de SST (%)

✓ Método de Medição da Turvação (NAU)

A turvação foi medida em todas as amostras finais e na amostra homogeneizada inicial.

A turvação caracteriza a dispersão da radiação luminosa da sua transmissão em linha reta, que aconteceria com água 100% ausente de matéria em suspensão. Assim, quantos mais sólidos ou substâncias se encontrarem presentes, maior será o valor medido. O seu método de leitura pode ser por turbidimetria ou nefelométrico e, dependendo do método e aparelho de leitura, as unidades são expressas na sua grande parte em NTU ou FAU.

Para a sua leitura são estabelecidas duas amostras (uma de padrão de referência como água destilada e outra com um volume de amostra que se pretende avaliar), nas mesmas condições referidas. A leitura é efetuada pelo aparelho legendado na Figura 39, que expressa a leitura sob Unidade de Atenuação de Formazina (FAU) – unidade utilizada no Brasil.



Figura 39 - Leitor Múltiplo de vários parâmetros, incluindo a Turvação<sup>31</sup>

---

<sup>31</sup> Aparelho Múltiplo de tarefas portáteis. Possui ao todo 95 programas de leitura, pelo que para cada opção é necessário selecionar o programa indicado para leitura do parâmetro desejado e calibrar com água destilada.

✓ Método de Determinação da Cor

A cor está também associada à presença de componentes presentes na solução tais como iões metálicos ou partículas coloidais. A determinação da cor é igualmente medida pelo aparelho ilustrado na Figura 39. Expressa em FAU.

✓ Método de Determinação da Carência Química de Oxigénio (CQO)

A carência química de oxigénio mede a matéria orgânica suspensa em amostra, suscetível de ser oxidada, via meio químico.



Figura 40 - Caixa com 25 tubos de reagentes de DQO



Figura 41 - Digestor de Alta Temperatura para a DQO



Figura 42 - Tubo de Reagente de DQO – Aspeto e cor

De modo a ser avaliada são inseridos 2 mL de solução nos reagentes prontos de DQO (Figura 40 e Figura 42) agitados, e seguidamente inseridos no digestor a uma temperatura de 150°C, durante 2h (120 min). Este digestor a alta temperatura (Figura 41) garante a oxidação de todos os componentes possíveis de degradar quimicamente. Após a digestão, os tubos de

reagente são arrefecidos e depois os resultados finais lidos pelo leitor da Figura 39 (Programa 17 – CQO), que expressa as unidades de leitura em mg/L.

Para a sua calibração é efetuada a digestão de um tubo de reagente com água destilada.

✓ Método de Determinação da Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO<sub>5</sub>)

É definida como a quantidade de oxigénio necessária à biodegradação (degradação no meio natural por processos biológicos) da matéria orgânica, a uma temperatura de 20°C, durante 5 dias.

Tabela XLIII – Volume de amostra e nº de gotas de EDTA necessárias para proceder à medição da CBO<sub>5</sub>

Faixa de Medição (mg/L)	Volume de Amostra (mL)	Gotas de EDTA
0-40	428	10
0-80	360	10
0-200	244	5
0-400	157	5
0-800	94	3
0-2000	56	3
0-4000	21,7	1

O método utilizado no projeto foi o método de respirometria: de acordo com a DQO medida da amostra, era colocado um determinado volume e um número de gotas específico de EDTA (ver Tabela XLIII). Após o volume certo e quantidade de EDTA administrada, a amostra era incluída no leitor durante 5 dias, em contínua agitação.

## ANEXO IV - Ensaio de Coagulação-Floculação Registrado

Tabela 44 – Resultados registrados do ensaio realizado com cloreto férrico do fornecedor Vittaquímica.

Gobelé	Temperatura (°C)	pH	Condutividade (µg/cm <sup>3</sup> )	Dosagem (L/min)	Q (mg/L)	Turvação FAU		%	SST (mg/L)				DQO (mg/L)		%
1	21,4	6,7	1,0	0,9	21	45	46	72%	39,3523	39,2571	53,3	71%	126	119	55%
						46			39,2522	39,3579			112		
						46			39,3514	39,3569			119		
2	21,0	6,8	5,6	1,0	25	58	58	65%	49,7586	49,7637	49,3	73%	132	126	53%
						58			49,7641	49,7692			119		
						58			49,7636	49,7682			128		
3	20,8	6,7	9,4	2,0	49	53	53	68%	42,9473	42,9481	21,0	89%	117	101	62%
						53			42,9461	42,9474			121		
						53			42,9422	42,9464			123		
4	20,5	6,5	21,8	2,2	54	61	61	63%	39,1928	39,1956	22,0	88%	133	137	49%
						60			39,1921	39,1984			143		
						61			39,1926	30,1937			135		
5	20,2	6,4	24,5	3,0	74	57	57	65%	43,3565	43,3584	21,0	89%	126	126	53%
						57			43,363	43,3651			134		
						58			43,3563	43,3586			117		
6	19,9	6,2	35,8	4,0	98	33	33	80%	41,5569	41,5587	16,0	91%	108	115	57%
						33			41,5523	41,5539			101		
						33			41,5511	43,3586			137		

Data de Análise: 07/08/2013

Coagulante: Cloreto Férrico

Fornecedor: Allquim

Tabela 45 - dosagens e concentrações do 1º ensaio com cloreto férrico

Gobelé	Dosagem (L/min)	Q (mg/L)
1	0,9	22
2	1,0	25
3	2,0	49
4	2,2	54
5	3,0	74
6	4,0	98

Tabela 46 - dosagens e concentrações do 2º ensaio com cloreto férrico

Gobelé	Dosagem (L/min)	Q (mg/L)
1	5,0	123
2	6,0	147
3	7,0	172
4	8,0	196
5	9,0	221
6	10,0	245



Figura 43 - Fotografia geral do resultado do 2º ensaio com cloreto férrico



Data de Análise: 07/08/2013

Coagulante: Cloreto Férrico

Fornecedor: Allquim

Tabela 47 - Resultados registados no ensaio com Cloreto Férrico do fornecedor Allquim

Gobelé	Dosagem (L/min)	Q (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	Condutividade (µg/cm <sup>3</sup> )	DQO (mg/L)	
1	19	466	24,6	6,4	24,7	271	275
						276	
						277	
2	20	490	24,6	6,4	29,4	251	252
						259	
						245	
3	22	539	24,7	6,3	30,7	249	248
						241	
						255	
4	24	588	24,6	6,3	32,8	240	241
						249	
						235	
5	26	637	24,6	6,3	33,8	228	231
						225	
						240	
6	28	686	24,7	6,1	42,1	90	88
						90	
						84	

Data de Análise: 01/08/2013

Coagulante: Panfloc PC18

✓ Panfloc

Fornecedor: Vittaquímica

Tabela 48 - Resultados registados do 2º ensaio com Panfloc

Gobelé	Dosagem (L/min)	Q (mg/L)	Volume a adicionar (mL)	Turvação		%	SST			%	CQO (mg/L)		%
							cadim+filt	peso total	média				
1	1,74	40	1,78E-02	18	18	90%	43,1601	43,1623	0,0034	91,5%	157	155	60%
				18			43,1555	43,1578			156		
				18							153		
2	2,65	61	2,72E-02	23	23	87%	39,599	39,6001	0,0016	96,0%	155	153	60%
				23							39,6027		
				24			154						
3	3,5	81	3,59E-02	59	59	67%	39,5011	39,5048	0,0083	47,8%			
				59			39,5029	39,5064					
				59			39,5012	39,5044					
4	4,4	102	4,51E-02	59	60	67%	42,5812	42,5857	0,0093	41,3%			
				60			42,5816	42,5864					
				60									
5	5,5	127	5,64E-02	55	55	70%	45,3634	45,3671	0,0087	45,3%			
				55			45,3628	45,3667					
				55			45,3612	45,3644					
6	6,6	153	6,77E-02	50	50	72%	45,0806	45,0853	0,0092	42,0%			
				50			45,078	45,0825					
				51									

Data de Análise: 03/08/2013

2ºEnsaio – doses mais pequenas

Tabela 49 – Resultados registados do 2º ensaio com Panfloc

Gobelé	Dosagem (L/min)	Q (mg/L)	Volume a adicionar (mL)	Turvação		%	SST			%	
							cadim+filt	peso total	média		
1	0,45	10	4,62E-03	98	99	45%	43,3744			100,0%	
				99							43,3746
				100							47,3753
2	0,85	20	8,72E-03	88	88	51%	45,9788			100,0%	
				88							45,9739
				88							45,974
3	1,3	30	1,33E-02	65	65	64%	48,46	*	*	100,0%	
				64							48,466
				65							48,4717
4	1,74	40	1,78E-02	52	52	71%	42,581			100,0%	
				52							42,5818
				52							42,5813
5	2,15	50	2,21E-02	53	53	71%	45,6742			100,0%	
				54							45,6738
				53							45,67
6	2,6	60	2,67E-02	46	46	75%	41,5497	41,5538	0,0054	27,3%	
				46							41,5513
				46							41,5504

CQO (mg/L)		%	
160	152	56%	
145			
152			

\*as membranas foram trocadas por engano pelo técnico de laboratório e não foi possível determinar o peso de cada um.

Fotografias 1º Ensaio Panfloc  
PC 18 - 01/08

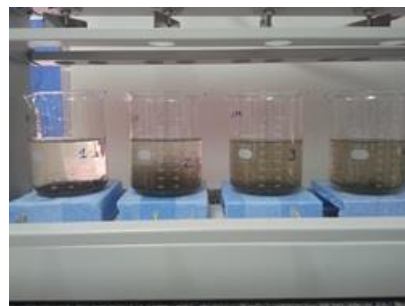


Figura 44 – Resultado do ensaio Jar-Test

Fotografias 1º Ensaio Panfloc  
PC18 – 03/08



Figura 45 – Resultados do 2º Ensaio Jar-Test

## ANEXO V - Teste ao Panfloc e Cloreto Férrico realizado em laboratório por Águas de Niterói, S.A.

✓ Cálculos Realizados

Dosagem L/min)	1	2	3	4	5	6
Concentração (ml/L)	0,017	0,035	0,053	0,07	0,088	0,105

Consideremos o período de atuação de 1minuto e a dosagem de 1L/min:

57000L esgoto – 1L

0,5L - X






Tendo em conta que 1mL=1cm<sup>3</sup>, então a concentração 0,017ml/L é equivalente a 0,017cm<sup>3</sup>/L. Multiplicando a concentração cm<sup>3</sup>/L pela densidade do Panfloc utilizada, resulta a concentração mg/L:

$$\frac{0,017 \text{ cm}^3 \text{ Panfloc}}{\text{L esgoto}} * \frac{1,35 \text{ g Panfloc}}{\text{cm}^3 \text{ Panfloc}} * \frac{10^3 \text{ mg}}{\text{g}} = \frac{22,95 \text{ mg Panfloc}}{\text{L esgoto}}$$

O mesmo cálculo foi realizado para todas as dosagens:

Dosagem L/min)	1	2	3	4	5	6
Concentração (ml/L)	0,017	0,035	0,053	0,07	0,088	0,105
C (mg/L)	23	47	72	95	119	142

✓ Fotos dos Resultados Obtidos com a dosagem de Panfloc

<p>C= 23mg/L</p>  A photograph of a glass Erlenmeyer flask containing a clear, colorless liquid. The flask is held by a hand, and the background is a plain white surface.	<p>C=47mg/L</p>  A photograph of a glass Erlenmeyer flask containing a slightly yellowish, clear liquid. The flask is held by a hand, and the background is a plain white surface.	<p>C=72mg/L</p>  A photograph of a glass Erlenmeyer flask containing a yellowish, clear liquid. The flask is held by a hand, and the background is a plain white surface.
<p>C=95mg/L</p>  A photograph of a glass Erlenmeyer flask containing a yellowish, clear liquid. The flask is held by a hand, and the background is a plain white surface.	<p>C=119mg/L</p>  A photograph of a glass Erlenmeyer flask containing a yellowish, clear liquid. The flask is held by a hand, and the background is a plain white surface.	<p>C=142mg/L</p>  A photograph of a glass Erlenmeyer flask containing a yellowish, clear liquid. The flask is held by a hand, and the background is a plain white surface.