

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**João Paulo Casseiro Marques**

**Aplicação de equipamento de monitoramento  
contínuo da floculação no tratamento da  
água bruta da estação de tratamento de água do  
DCTA com polímero catiônico natural**

**Trabalho de Graduação  
2019**

**Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica**

João Paulo Cassemiro Marques

**Aplicação de equipamento de monitoramento  
contínuo da floculação no tratamento da  
água bruta da estação de tratamento de água do  
DCTA com polímero catiônico natural**

Orientador

Prof. PhD Ten Cel Eng Marcio Antonio da Silva Pimentel

**ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA**

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2019

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

**Divisão de Informação e Documentação**

MARQUES, João Paulo Casseiro

Aplicação de equipamento de monitoramento contínuo da floculação no tratamento da água bruta da estação de tratamento de água do DCTA com polímero catiônico natural/ João Paulo Casseiro Marques

São José dos Campos, 2019.

57f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2019. Orientador: Ten Cel Eng Márcio Antonio da Silva Pimentel - pHD

1. Coagulação 2. Floculação. 3. Tratamento de água 4. Engenharia sanitária

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

Marques; João Paulo Casseiro Marques. **Aplicação de equipamento de monitoramento contínuo da floculação no tratamento da água bruta da estação de tratamento de água do DCTA com polímero catiônico natural**. 2019. 57f.. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

**CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR : João Paulo Casseiro Marques

TÍTULO DO TRABALHO : Aplicação de equipamento de monitoramento contínuo da floculação no tratamento da água bruta da estação de tratamento de água do DCTA com polímero catiônico natural

TIPO DO TRABALHO/ANO : Graduação / 2019

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

*João Paulo Casseiro Marques*

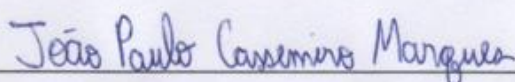
João Paulo Casseiro Marques

Rua H8B 239

12228-461, São José dos Campos - SP

# APLICAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DA FLOCULAÇÃO NO TRATAMENTO DA ÁGUA BRUTA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO DCTA COM POLÍMERO CATIÔNICO NATURAL

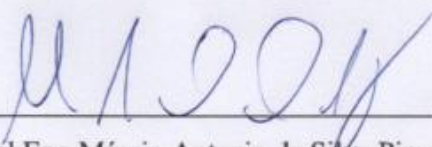
Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



---

João Paulo Cassemiro Marques

Autor



---

Ten Cel Eng Márcio Antonio da Silva Pimentel - PhD

Orientador



---

Prof. Dr Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 27 de novembro de 2019

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a minha família, por sempre ter me apoiado incondicionalmente e me incentivado durante esse caminho.

Ao professor Márcio Pimentel, pela orientação durante todo o trabalho, pelos ensinamentos e sugestões. À professora Dafne Cruz, pelas aulas e pelo auxílio durante os ensaios.

No ITA, agradeço à todos que estiveram comigo de alguma forma, seja durante as dificuldades ou nos momentos de alegria, em especial à aqueles que moraram comigo.

Agradeço principalmente ao Murilo Tarosso, por ter sido o melhor companheiro de quarto e amigo que poderia ter tanto durante a preparação para o vestibular, durante as provas e vivência no ITA, e para a preparação para a vida profissional após a faculdade.

Ao Victor Hugo Vianna por ter me ensinado, com toda sua paciência, as matérias de matemática e programação do FUND, que foi uma das etapas mais difíceis da graduação.

Ao André Bergo, Rafael Pereira, Matheus do Vale e Daniel Lopes pela amizade durante o curso e por terem auxiliado no aprendizado das matérias.

À Civil 19, pois passamos juntos por muitas dificuldades e a união dessa turma foi essencial para que todos pudessem chegar até a formatura juntos.

*"As coisas sempre se tornam óbvias depois do fato".*

(Nassim Nicholas Taleb)

## Resumo

O tratamento da água bruta é muito importante para possibilitar o devido uso da água pela população. Como a qualidade da água que chega em uma estação de tratamento de água não é sempre a mesma, é necessário que haja uma mudança dos parâmetros usados para tratar a água, visando otimizar sua eficiência e reduzir custos. Um método de se analisar a necessidade de tais mudanças é o uso do Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação, o qual foi usado no presente trabalho. Seu funcionamento foi verificado usando como coagulante um polímero orgânico com carga catiônica, para que sua eficiência também pudesse ser verificada. A água bruta analisada foi retirada da Estação de Tratamento de Água do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Foram feitos vários ensaios *jar test* para verificar qual a dosagem ótima do coagulante para obter a melhor eficiência do tratamento da água e em seguida analisou-se como variava o índice de floculação da amostra, associando a variação do índice de floculação com a melhora da qualidade da água.

## **Abstract**

The treatment of raw water is very important to enable the proper use of water by the population. As the quality of water arriving at a water treatment plant is not always the same, there is a need to change the parameters used to treat water to optimize its efficiency and reduce costs. One method of analyzing the need for such changes is the use of Continuous Flocculation Monitoring Equipment, which was used in the present work. Its operation was verified using as a coagulant a cationically charged organic polymer, so that its efficiency could also be verified. The analyzed raw water was taken from the Water Treatment Station of the Aerospace Science and Technology Department. Several jar test tests were performed to verify the optimal dosage of the coagulant to obtain the best water treatment efficiency and then to analyze how the flocculation index of the sample varied, associating flocculation index variation with the water quality improvement.



## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Camada difusa.....  | 16 |
| Figura 2. Gráfico da força de interação entre partículas.....   | 17 |
| Figura 3. Ilustração do efeito semelhante à uma fita adesiva responsável por prender as partículas suspensas..... | 20 |
| Figura 4. Variação do IF após uma perturbação no sistema.....   | 25 |
| Figura 5. Curvas de calibração do gradiente de velocidade para água (Richter, 2009) .....                         | 27 |
| Figura 7. Esquema de funcionamento do EMCF .....  | 28 |
| Figura 8. Célula de fluxo .....   | 28 |
| Figura 9. Variação do IF com diferentes dosagens de coagulantes.....  | 29 |
| Figura 10. Componentes AC e DC esquematizadas.....  | 29 |
| Figura 11. Resultado esperado da variação do IF.....  | 30 |
| Figura 12. Mecanismo de atuação do polímero.....  | 32 |
| Figura 13. Fórmula química do composto.....   | 32 |
| Figura 14. Microbacia do ribeirão Vidoca e sua localização no município de São José dos Campos .....              | 35 |
| Figura 15. Remoção de turbidez para diferentes dosagens .....   | 38 |
| Figura 16. Remoção de absorbância para diferentes dosagens .....  | 38 |
| Figura 17. Remoção de cor para diferentes dosagens .....  | 39 |
| Figura 18. Variação do índice de floculação durante o tratamento da água com a dosagem de 80 ppm .....            | 40 |
| Figura 19. Variação do índice de floculação desconsiderando o pico inicial.....                                   | 41 |
| Figura 20. Variação do IF usando a fórmula ajustada.....  | 42 |
| Figura 21. Comparação da curva ajustada e original.....   | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 22. Resultado das amostras usando a dosagem de 60 ppm, à esquerda e 80 ppm, à direita.....                            | 44 |
| Figura 23. Imagem de parte de uma gota da água bruta obtida com o microscópio .....  | 45 |
| Figura 24. Imagem de parte de uma gota da água após a floculação usando uma dosagem de 80 ppm obtida com o microscópio ..... | 46 |
| Figura 25. Imagem de parte de uma gota da água após a decantação usando uma dosagem de 80 ppm obtida com o microscópio ..... | 48 |
| Figura 26. Imagens da água bruta, da água após a floculação e da água após a sedimentação                                    | 49 |
| Figura 27. Imagem de parte de uma gota da água após a floculação usando a dosagem de 60 ppm obtida com o microscópio .....   | 50 |
| Figura 28. Imagem de parte de uma gota da água após a floculação usando a dosagem de 100 ppm obtida com o microscópio .....  | 50 |

## Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1. Materiais utilizados   | 33 |
| Tabela 2. Parâmetros de qualidade da água bruta  | 36 |
| Tabela 3. Resultados do ensaio de <i>jar test</i> para a dosagem de 60 ppm                   | 37 |
| Tabela 4. Resultados do ensaio de <i>jar test</i> para a dosagem de 80 ppm                   | 37 |
| Tabela 5. Resultados do ensaio de <i>jar test</i> para a dosagem de 100 ppm                  | 37 |
| Tabela 6. Verificação do ajuste dos diferentes tipos de curva                                | 41 |
| Tabela 7. Valores do índice de floculação em certos instantes de tempo após a mistura rápida | 44 |
| Tabela 8. Distribuição de partículas em relação à seu tamanho para a água bruta              | 45 |
| Tabela 9. Distribuição de partículas em relação à seu tamanho para a água após a floculação  | 47 |
| Tabela 10. Distribuição de partículas em relação à seu tamanho para a água após a decantação | 48 |
| Tabela 11. Resultados quantitativos da análise das imagens das amostras                      | 49 |
| Tabela 12. Tamanho das partículas após a floculação usando diferentes dosagens               | 51 |

## Sumário

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                         | <b>12</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Motivação .....</b>                          | <b>12</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivo .....</b>                           | <b>13</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>              | <b>13</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Parâmetros de qualidade da água.....</b>     | <b>13</b> |
| 2.1.1      | Cor .....                                       | 13        |
| 2.1.2      | Absorbância .....                               | 13        |
| 2.1.3      | Temperatura.....                                | 14        |
| 2.1.4      | Turbidez.....                                   | 14        |
| <b>2.2</b> | <b>Parâmetros químicos da água .....</b>        | <b>15</b> |
| 2.2.1      | pH .....  | 15        |
| 2.2.2      | Alcalinidade.....                               | 15        |
| 2.2.3      | Dureza.....                                     | 16        |
| <b>2.3</b> | <b>Coagulação .....</b>                         | <b>16</b> |
| 2.3.1      | Análise teórica .....                           | 16        |
| 2.3.2      | Varredura .....                                 | 18        |
| 2.3.3      | Adsorção com neutralização.....                 | 18        |
| 2.3.4      | Adsorção com formação de pontes.....            | 18        |
| 2.3.5      | Compressão da dupla camada elétrica.....        | 19        |
| 2.3.6      | Coagulação com polímeros orgânicos .....        | 19        |
| <b>2.4</b> | <b>Floculação.....</b>                          | <b>20</b> |
| 2.4.1      | Análise teórica .....                           | 20        |
| 2.4.2      | Estabilidade dos flocos .....                   | 22        |
| 2.4.3      | Fatores de força e recuperação dos flocos ..... | 23        |
| 2.4.4      | Equação cinética básica .....                   | 23        |
| 2.4.5      | Sedimentação diferencial.....                   | 25        |
| <b>2.5</b> | <b>Processos de controle.....</b>               | <b>26</b> |
| 2.5.1      | Jar Test.....                                   | 26        |
| 2.5.2      | Equipamentos de monitoramento contínuo .....    | 27        |
| <b>2.6</b> | <b>Agente coagulante usado.....</b>             | <b>31</b> |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA.....</b>                                       | <b>33</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Determinação da dosagem ótima .....</b>                    | <b>33</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Materiais.....</b>   | <b>33</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Metodologia.....</b>                                       | <b>33</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Água de estudo.....</b>                                    | <b>34</b> |
| 3.4.1      | Água Bruta.....   | 34        |
| <b>3.5</b> | <b>Caracterização da água.....</b>                            | <b>35</b> |
| 3.5.1      | pH .....  | 35        |
| 3.5.2      | Absorbância .....   | 35        |
| 3.5.3      | Cor .....   | 35        |
| 3.5.4      | Turbidez.....   | 36        |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                          | <b>36</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Caracterização da água bruta .....</b>                     | <b>36</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Determinação da dosagem ótima .....</b>                    | <b>37</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Análise dos dados de IF.....</b>                           | <b>39</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Análise das imagens das partículas.....</b>                | <b>44</b> |
| 4.4.1      | Água bruta .....  | 45        |
| 4.4.2      | Água após a floculação.....                                   | 46        |
| 4.4.3      | Água após a decantação.....                                   | 47        |
| 4.4.4      | Resultados agrupados .....                                    | 48        |
| 4.4.5      | Análise do tamanho das partículas usando outras dosagens..... | 49        |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÕES.....</b>  | <b>51</b> |
| <b>6</b>   | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                      | <b>52</b> |

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

A qualidade da água de abastecimento é de suma importância para a saúde pública, visto que muitas atividades do dia a dia das pessoas estão relacionadas ao consumo da água, como hidratação, lavagem de alimentos, higiene pessoal, dentre outras. Dessa forma, é imprescindível que as estações de tratamento de água possuam os melhores métodos possíveis para garantir a melhor qualidade de água possível que chega para a população. Tal qualidade é obtida ao remover contaminantes e impurezas presentes na água bruta captada de rios, lagos ou poços.

Além dos parâmetros de qualidade da água tratada, é preciso avaliar o preço dos componentes usados e do processo de tratamento como um todo para verificar se tal processo é de fato vantajoso. Com uma água que respeita os padrões impostos pela organização mundial de saúde (OMS), aquele processo que tiver menores custos se mostra superior. Uma das etapas mais importantes do tratamento da água é a coagulação e a floculação, visto que é necessário desestabilizar as partículas dispersas na água (coagulação) e agrupá-las em flocos maiores (floculação), para que seja possível sua posterior decantação e filtração.

É objetivo de estudo desse trabalho a análise da eficiência do coagulante Acquapol C1 30, o qual é um polímero catiônico. Dentre suas vantagens, pode-se destacar o fato de que ele não altera o pH da água a ser tratada e, por ser um composto orgânico, é biodegradável e melhora a remoção de lodo da água. Para otimizar o uso do coagulante na melhora dos parâmetros de qualidade da água, é preciso verificar qual a dosagem ótima do coagulante para um dado pH. Normalmente, tal análise é feita em estações de tratamento de água por aparelhos como o *Streaming Current Monitor* ou um zetâmetro, analisando a corrente de fluxo ou o potencial zeta durante a coagulação. Como tais aparelhos representam um alto custo para as estações, busca-se uma alternativa mais barata que proporcione resultados adequados. O *jar test*, apesar de ser um ensaio demorado, visto que a execução da rotina necessária para avaliar a influência dos parâmetros que influenciam a coagulação é grande, apresenta resultados compatíveis com aqueles mais modernos. Para o estudo em questão, tal aparelho tem resultados adequados, visto que não é necessário avaliar a floculação continuamente. Outro aparelho usado para verificar a eficiência da dosagem usada é o equipamento de monitoramento contínuo, que relaciona a turbidez com a voltagem de saída do equipamento e verifica, ao longo do *jar test*, a formação de flocos. Com ele, é possível mensurar quantitativamente a eficiência de cada uma das dosagens escolhidas do coagulante analisado.

## 1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é estudar a eficiência de um coagulante orgânico (Seta, 2019) na melhora dos parâmetros de qualidade de água com diferentes dosagens através do *jar test* com o equipamento de monitoramento contínuo da floculação. A partir daí, verificar a dosagem ótima para se usar na estação de tratamento de água e analisando qual o método de floculação que o coagulante segue, possibilitando a mudança de parâmetros que influenciam em tal método visando otimizar o processo, visto que é um processo muito importante para a sociedade.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Parâmetros de qualidade da água

#### 2.1.1 Cor

A cor da água é provocada pela presença de impurezas que se encontram em suspensão fina, estado coloidal ou ainda em solução, constituindo partículas finas com diâmetros variando de  $1\text{ m}\mu\text{m}$  a  $1\text{ }\mu\text{m}$  e só podem ser observadas através de microscópios eletrônicos de varredura de grande resolução. Quando a medida de cor é feita com o sobrenadante de amostra de água centrifugada por 30 minutos, com rotação de 3000 rpm, ou de água filtrada de  $0,45\text{ }\mu$ , obtém-se a cor verdadeira. Quando ela está em seu estado natural, obtém-se a cor aparente, devido às partículas coloidais e suspensas, as quais interferem na medida (Di Bernardo & Dantas, 2005).

Sua intensidade é obtida ao comparar uma amostra com um padrão de cobalto-platina, em que o resultado é apresentado em unidades de cor ( $uC$ ) ou unidade Hazen ( $uH$ ) (Libânio, 2010).

#### 2.1.2 Absorbância

A absorbância é uma medida da quantidade de luz absorvida por uma amostra de água em determinado comprimento de onda. Ela é diretamente proporcional à quantidade de matéria na amostra. Um feixe de luz ultravioleta ou no espectro do visível é direcionado na amostra de água e verifica-se a quantidade de luz que atravessa a amostra. Como se tem a intensidade do feixe incidente e do que atravessou, é possível obter a luz absorvida. Deve-se atentar ao fato de que nem sempre o valor obtido é verdadeiro, pois caso a amostra seja uma suspensão, boa parte da luz será dispersada e não absorvida. Para um resultado mais preciso, deve-se comparar com

uma amostra branca que consiste de água deionizada, para que apenas a absorvância relativa ao soluto de interesse seja considerada. Sua definição matemática é dada pela equação 1, em que  $\lambda$  é o comprimento de onda em questão,  $I$  é a intensidade da luz que atravessou e  $I_0$  é a intensidade da luz emitida.

$$A_\lambda = -\log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

### 2.1.3 Temperatura

É necessário conhecer a temperatura da água a ser analisada devido ao fato de que a mesma altera a eficiência de desinfecção da água, principalmente na etapa da floculação, que é o objeto alvo deste estudo. A temperatura tem influência nas reações de hidrólise do coagulante e em especial no desempenho das unidades de mistura rápida, floculação, decantação e filtração (Di Bernardo & Dantas, 2005).

### 2.1.4 Turbidez

A turbidez da água é uma propriedade óptica que mede o espalhamento da luz devido às partículas presentes na água. Os fatores mais comuns que causam a turbidez na água bruta são argilas e siltes, matéria orgânica e organismos microscópicos. Altos níveis de turbidez indicam que há uma presença grande de sólidos suspensos.

A mesma é expressa como Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU), sendo feita em uma célula fotoelétrica, medindo a quantidade de luz dispersa e comparando com uma amostra padrão de água. Com um fotodetector apropriado, a luz transmitida pode ser convertida em uma voltagem, a qual é linearmente dependente da intensidade.

Dessa forma, a turbidez,  $\tau$ , é definida usando a equação 2, em que  $V$  e  $V_0$  são as voltagens transmitida e emitida, respectivamente, e  $L$  é o comprimento percorrido pela luz.

$$V = V_0 e^{-\tau L} \quad (2)$$

Para uma dada amostra, a turbidez depende apenas das propriedades de espalhamento da luz e da concentração das particular suspensas. Caso a suspensão possua apenas partículas iguais, a turbidez é dada pela equação 3, em que  $N$  é o número de partículas e  $C$  é a concentração da amostra.

$$\tau = NC \quad (3)$$



A combinação das equações 2 e 3 resulta na lei de Lambert-Beer, expressa pela equação 4.

$$\ln\left(\frac{V_0}{V}\right) = \tau L = NCL \quad (4)$$

De acordo com a FUNASA, o maior valor permitido para a água tratada é de 1 NTU na saída das estações de tratamento de água e de 5 NTU retirando a amostra de um ponto qualquer da rede de distribuição.

## 2.2 Parâmetros químicos da água

### 2.2.1 pH

A definição técnica do pH da água é a medida da atividade do íon hidrogênio ( $H^+$ ) e é descrito como o logaritmo negativo da atividade do íon hidrogênio. Uma água com pH igual à 7 tem  $10^{-7}$  mols de íons de hidrogênio por litro. A sua escala varia de 0 a 14. Uma água com pH menor do que 7 é considerada ácida e com o pH maior do que 7 é considerada básica.

Sua medida é feita através de um pHmetro, que consiste de um eletrodo de vidro feito de uma membrana de vidro especial que é vedada no fim formando um bulbo. Dentro do vidro há uma solução ácida padrão, juntamente com um eletrodo interno de referência. Essa solução é chamada de solução referência de pH 7. Um segundo eletrodo é localizado no tubo externo imerso em KCl. Este está fechando o primeiro tubo e é o que fica em contato com a solução em que o pH será medido. O mesmo opera como um voltímetro, pois o par de eletrodos podem medir pequenas mudanças na voltagem na ordem de milivolts. A voltagem produzida pela solução teste é medida e comparada com a voltagem produzida pela solução referência. A diferença de voltagem entre as duas é usada para calcular o pH.

### 2.2.2 Alcalinidade

A alcalinidade é muito importante como um parâmetro de qualidade da água pois ela mede a capacidade da água de resistir a mudanças no pH que a tornariam mais ácida. Os principais íons presentes na água que são capazes de neutralizar ácidos são o  $(CO_3)^{2-}$ ,  $(HCO_3)^-$  e  $(OH)^-$ . Em termos de pH é possível classificar quais os compostos causadores da alcalinidade: em um pH entre 9,4 e 12,3, a alcalinidade é decorrente de hidróxidos e carbonatos;

com um pH entre 8,3 e 9,4, a alcalinidade é decorrente de carbonatos e bicarbonatos e com um pH entre 4,4 e 8,3 a alcalinidade é decorrente somente de bicarbonatos.

### 2.2.3 Dureza

A dureza está ligada a incrustações nos sistemas de água quente, por isso é necessário tomar cuidado com seu valor. Ela é definida pela soma da concentração dos cátions polivalentes da água e expressa quantitativamente pela quantidade de  $CaCO_3$ . A principal fonte de dureza da água bruta é o bicarbonato, que se torna carbonato devido ao aquecimento ou alto pH. Como tal dureza ocorre mediante ações externas naturais, ela é considerada como dureza temporária. Quando os íons que causam a dureza são oriundos de outros ânions, diferentes do carbonato, tal dureza é denominada permanente.

## 2.3 Coagulação

### 2.3.1 Análise teórica

As partículas coloidais, normalmente, encontram-se com carga negativa na água e, portanto, as mesmas possuem uma força eletrostática de repulsão que impossibilita o fenômeno da floculação, visto que evita a aglomeração das partículas, mantendo a estabilidade da suspensão. Dessa forma, é necessário alterar a força iônica presente do meio, por meio da adição de sais de alumínio ou polímeros sintéticos, para que a carga das partículas se altere e haja uma tendência de agrupamento (Richter, 2015). Tal alteração caracteriza o fenômeno da coagulação, pois íons de carga oposta à da superfície são adsorvidos e íons de carga igual são repelidos, criando uma camada difusa em volta da partícula. Essa camada reduz ou neutraliza a carga da partícula, possibilitando o posterior agrupamento e, em seguida, a floculação. Tal camada é representada na Figura 1

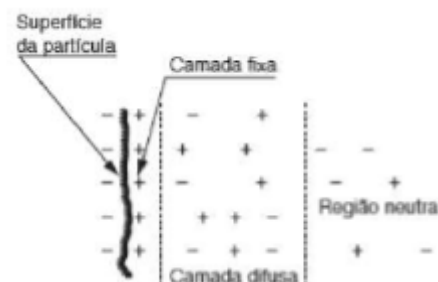


Figura 1. Camada difusa

A medida do potencial de coagulação de uma partícula é feita através do potencial zeta, o qual é descrito pela equação 5, em que  $\zeta$  é potencial zeta,  $M$  é a mobilidade eletroforética e  $D$  é a constante dielétrica da água.

$$\zeta = \frac{4\pi\nu}{ED} = 1,256 \cdot 10^5 \cdot \mu \frac{M}{D} \quad (5)$$

É possível perceber que quanto maior a distância de um ponto fora da partícula até onde a concentração iônica se apresenta igual à da solução, menor o potencial.

Quando há duas partículas próximas uma da outra, há uma força atrativa muito pequena agindo entre elas, que é a força de Van der Waals, representada pela equação 6, a qual é inversamente proporcional à distância. Na equação 6,  $A$  é o coeficiente de Hamaker, o qual varia de  $10^{-19}$  a  $10^{-20}J$ , pois depende das propriedades dos materiais e é inversamente proporcional à sexta potência da distância entre as partículas, podendo ser positiva ou negativa,  $R_1$  e  $R_2$  são os raios das partículas e  $r$  é a distância entre a superfície das duas partículas.

$$F_{vw} = -\frac{AR_1R_2}{(R_1 + R_2)6r^2} \quad (6)$$

Dessa forma, para que seja possível fazer com que as partículas coloidais se agreguem, é necessário vencer essa força, a qual pode ser considerada como a diferença entre o potencial zeta, que é a força repulsiva, e a força de Van der Waals, que é a força atrativa. A Figura 2 representa como as forças de atração e repulsão se dispõem proporcionalmente e a barreira de potencial necessária para haver a união das partículas em suspensão.

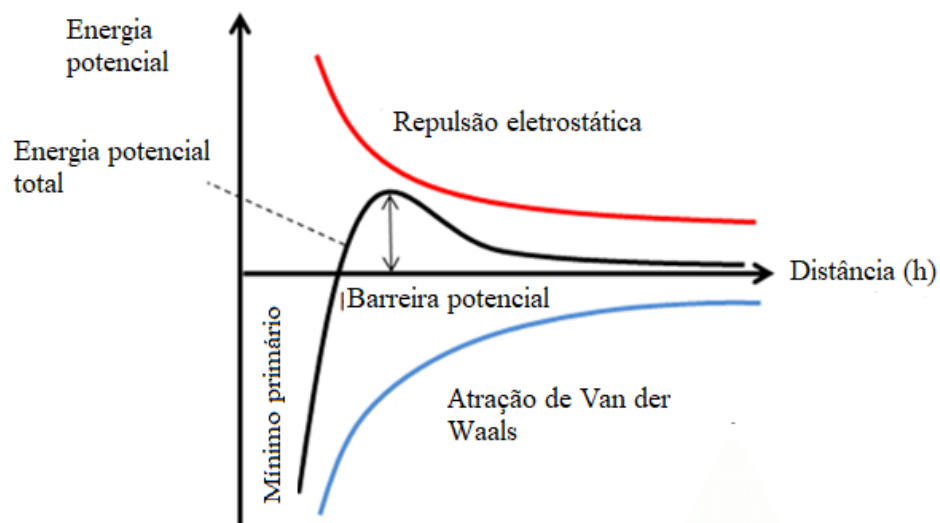


Figura 2. Gráfico da força de interação entre partículas

De uma forma geral, esta pode ocorrer das seguintes maneiras: varredura, adsorção com neutralização, adsorção com formação de pontes e compressão da dupla camada elétrica,

### **2.3.2 Varredura**

A varredura ocorre quando, ao adicionar o coagulante, alguns precipitados são formados. Tais flocos são maiores e sedimentam com maior facilidade do que aqueles obtidos no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas (Di Bernardo & Dantas, 2005).

Os principais precipitados formados são do tipo  $Al(OH)_3$  e  $Fe(OH)_3$ . Nesse mecanismo o precipitado decanta por gravidade em um determinado tempo e as partículas se chocam com outras, arrastando-as para baixo junto com elas. Visto que um floco obtido por varredura pode absorver contaminantes da água sem que haja coagulação, é necessário usar um polímero orgânico como floculante.

### **2.3.3 Adsorção com neutralização**

Quando as espécies usadas como coagulantes possuem carga contrária aos colóides, ocorre a desestabilização destes. Ligações de hidrogênio, reações de coordenação, ligações covalentes e reações de troca iônica são os principais causadores da atração entre a espécie adsorvida com a superfícies dos colóides.

Tal mecanismo é muito útil quando não é preciso que haja a formação de flocos para sedimentação, e apenas que as partículas sejam desestabilizadas, que ocorre quando é usado o método de filtração direta (Di Bernardo & Dantas, 2005).

Um dos problemas que pode ocorrer com tal mecanismo é o de que, ao se adicionar uma concentração muito alta de coagulante, é possível que ocorra o fenômeno de reversão de cargas, fazendo com que os colóides anteriormente carregados negativamente fiquem carregados positivamente devido ao excesso de polímeros catiônicos que possuem carga positiva e, assim, o desempenho da coagulação é prejudicado.

### **2.3.4 Adsorção com formação de pontes**

Os polímeros que possuem uma grande cadeia molecular possuem carga ao longo da sua cadeia e tais cargas conseguem desestabilizar os colóides carregados negativamente. Isso ocorre devido à redução da carga da partícula coloidal ou pelo entrelaçamento das partículas com os polímeros.

### **2.3.5 Compressão da dupla camada elétrica**

A desestabilização de um colóide ocorre devido às interações eletrostáticas, íons de cargas do mesmo sinal se repelem e aqueles de carga contrária se agrupam. Quanto maior a carga do íon, menor é a quantidade requerida do mesmo para a coagulação da amostra. Os fatores que se destacam em tal mecanismo são que a concentração de eletrólitos necessários para a coagulação não depende da concentração de coloides na água e que é impossível reestabilizar as partículas coloidais, ou seja, ocorre o fenômeno da reversão de cargas, fazendo com que as partículas anteriormente suspensas com carga negativa comecem a ficar suspensas por causa da carga positiva. Tal método consiste na adição de eletrólitos de forma a neutralizar o potencial zeta da amostra (Di Bernardo & Dantas, 2005).

Uma das maneiras de se verificar se a coagulação está ocorrendo por esse método é a verificação potencial zeta da amostra, que deve chegar próximo ao valor neutro para que se conclua que o método em questão é o da compressão da dupla camada elétrica.

### **2.3.6 Coagulação com polímeros orgânicos**

Quando são usados polímeros orgânicos como coagulantes, as principais ações dos mesmos são a desestabilização das partículas e a aglomeração dos flocos, tornando-os mais resistentes e volumosos (Richter, 2015).

Como o principal problema das suspensões é a estabilidade de sua carga, o polímero deve agir de forma a diminuir ou neutralizar a carga do meio em que as partículas estão inseridas. Dessa forma, quando as partículas estão carregadas negativamente, o polímero indicado é um catiônico, e, além de neutralizar a carga, pelo fato da molécula ter uma cadeia muito grande, os polímeros possuem muitos espaços em que é possível a adsorção das partículas suspensas, fazendo com que elas se liguem por meio de pontes de hidrogênio e aumentem seu tamanho.

Na coagulação por meio de polímeros catiônicos, os principais mecanismos de coagulação são a adsorção com neutralização e adsorção com formação de pontes. Sua ação é comparada ao efeito de uma corda que têm fitas adesivas responsáveis por prender as partículas suspensas formando agregados maiores, ilustrada na Figura 3.

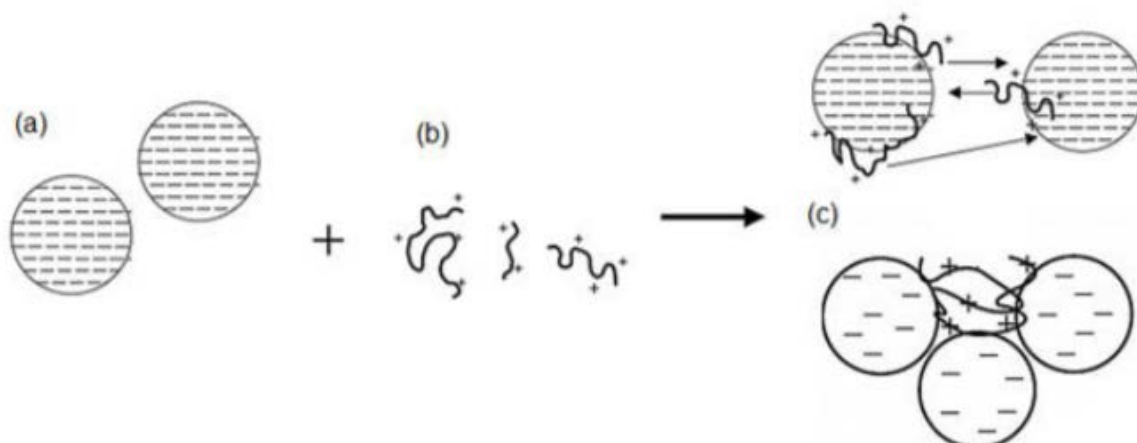


Figura 3. Ilustração do efeito semelhante à uma fita adesiva responsável por prender as partículas suspensas

Além de poder realizar a coagulação independentemente, os polímeros também podem ser usados como agentes que auxiliem a coagulação por meio de substâncias inorgânicas. Um problema do uso de coagulantes orgânicos é o fato de que tais polímeros normalmente são ineficazes na remoção da cor da amostra ou em aglutinar coloides de origem orgânica. Em tais casos, é preciso utilizar um coagulante metálico. A principal vantagem do coagulante orgânico é a de que ele não altera o pH da água, porém sua densidade de carga é influenciada pelo pH da água bruta analisada.

## 2.4 Floculação

### 2.4.1 Análise teórica

A floculação é o processo em que partículas desestabilizadas ou partículas formadas como resultado de desestabilização, são induzidas a ficarem juntas, ter contato e, por consequência, formar aglomerados maiores. A floculação acelera a formação dos flocos e também influencia nas características físicas dos flocos formados, como tamanho e densidade, além de governar o número final de partículas desestabilizadas.

O tempo necessário para a floculação varia de 15 a 20 minutos para mais de uma hora, sendo que os principais parâmetros em que se deve prestar atenção durante a floculação são a velocidade da mistura, caracterizada pelo gradiente, e a quantidade de energia da mistura. Para prevenir a quebra dos flocos já formados, é comum que ao longo do processo a velocidade de mistura seja diminuída conforme o tamanho dos flocos aumente. Uma vez que os flocos são destruídos durante o processo é difícil fazer com que eles voltem ao seu tamanho ótimo. Tal

fato ocorre, principalmente ao se usar polímeros orgânicos como coagulantes, pois os mesmos podem estabilizar as partículas envolvendo-as e impossibilitando que essas se aglomerem com outras partículas, prejudicando o desempenho da floculação (Libânio, 2010).

A floculação pode ser feita por dois tipos distintos:

Por meio de flocladores hidráulicos, em que a mistura é feita com a própria energia da água que chega com alta velocidade nas calhas, ou em flocladores mecânicos, em que a mistura é feita por pás com eixo vertical e dotadas de movimentos de rotação.

Sua medida quantitativa é dada por meio do gradiente de velocidade  $G$ , o qual é definido como o limite da relação da diferença de velocidade entre duas camadas de água muito próximas entre si e a distância entre as mesmas. Sua medida é de suma importância para o controle de qualidade da floculação, pois quanto maior a diferença de velocidades entre camadas, maior a frequência de choques entre partículas. Tais choques podem ajudar na desestabilização dos coloides ou podem quebrar os flocos já formados. A partir do conceito de viscosidade, o gradiente foi definido como  $\sqrt{\frac{P}{\mu V}}$ ,  $P$  é a potência aplicada à água,  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade e  $V$  é o volume da câmara de mistura. A taxa de redução de partículas é expressa pela equação 7, em que  $n_i$  e  $n_j$  são relacionados ao número de partículas de tamanho  $i$  e  $j$ , e  $R_{ij}$  é o raio de colisão.

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{4}{3} G n_i n_j R_{ij}^3 \quad (7)$$

Quando o diâmetro de uma das partículas é muito maior que de outra, pode-se considerar que  $R_{ij}$  é aproximadamente igual à  $R_2$ , que é o raio de uma das partículas, de tal forma que  $N_1 = N$  e então é obtida a concentração das partículas por unidade de volume dada pela equação 8.

$$C = \frac{4}{3} \pi R_2^3 \quad (8)$$

Substituindo a equação 8 na equação 7, e resolvendo a equação diferencial, chegamos na equação 9, conhecida como equação de Hudson, em que  $N$  é o número de partículas na amostra.

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\alpha \frac{CGT}{\pi}} \quad (9)$$

O coeficiente  $\alpha$  é introduzido como uma medida de eficiência da colisão entre as partículas, e tal equação mostra que a velocidade da floculação não depende da turbidez inicial e sim da massa de sólidos precipitada, uma vez que depende da concentração em volume de floco e não do número e tamanho das partículas primárias (Richter, 2015).

Na floculação pericinetica, o tempo necessário para que uma concentração inicial seja reduzida para uma outra final é dado pela equação 10.

$$t = \frac{3\mu}{4kT} \left( \frac{1}{N_t} - \frac{1}{N_0} \right) \quad (10)$$

Tal resultado é válido apenas para a consideração de partículas do mesmo tamanho, sendo que o único fator que influencia no resultado é a temperatura. Para a consideração de partículas de diferentes tamanhos é feita a correção mostrada pela equação 11, em que  $d$  e  $D$  são os diâmetros das partículas e  $T$  e  $t$  são os tempos para cada partícula saindo da mesma concentração inicial chegarem a  $N_t$ .

$$\frac{T}{t} = \frac{1}{4} \left[ 4 + \left( \sqrt{\frac{D}{d}} - \sqrt{\frac{d}{D}} \right)^2 \right] \quad (11)$$

O uso dos polímeros catiônicos como agentes floclantes faz com que os flocos formados não sejam tão volumosos e, portanto, são mais adequados para a filtração direta ou flotação a ar dissolvido.

#### 2.4.2 Estabilidade dos flocos

Um dos fatores mais importantes da floculação é a estabilidade dos flocos formados, pois à medida em que eles vão sendo formados, conforme a floculação vai ocorrendo devido à adição do agente floclante e da rotação das pás do *jar test*, os mesmos podem ser destruídos, caso a velocidade de rotação das pás esteja muito alta. Quando os flocos formados são quebrados devido à rotação das pás, é muito difícil fazer com que eles sejam formados novamente, devido à alta energia no sistema. Dessa forma, é de suma importância se atentar aos parâmetros de controle da estabilidade dos flocos.

Quanto mais as partículas se aglutinam, o floco aumenta e sua densidade diminui, fazendo com que fique mais susceptível a tensões de cisalhamento geradas pelo gradiente de velocidade, visto que a força responsável pela aglutinação é a de van der Waals, ou seja, não há uma atração



perfeita entre as partículas. Quanto maior o gradiente, mais rápido os flocos se formam, porém há um limite de tamanho em que os flocos conseguem chegar, fazendo com que haja um tamanho máximo do floco (Richter, 2015).

Esse limite é dado pela equação 12.

$$d_{m\acute{a}x} = \frac{C}{G^n} \quad (12)$$

Outro fator a ser analisado é a taxa de desagregação dos flocos, que é definida por Soucek e Sindelar em 1967, como dependente das condições de turbulência da água, sendo expressa matematicamente pela equação 13, em que  $Re$  é o número de Reynolds.

$$S = G \cdot Re^{-0,5} \quad (13)$$

### 2.4.3 Fatores de força e recuperação dos flocos

Os fatores de força e recuperação dos flocos são utilizados para revelar a quebra e a reformação dos flocos. O fator de força ( $S_f$ ) indica a habilidade dos flocos de resistir a tensões de cisalhamento, e o fator de recuperação ( $R_f$ ) indica a capacidade dos flocos depois de se quebrarem. Tais fatores são obtidos pelas equações 14 e 15, em que  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  são coeficientes usados para quantificar o tamanho dos flocos na fase estável antes da quebra dos flocos, depois do período de quebra e depois da reagrupação das partículas (Sun, 2016).

$$S_f = \frac{d_2}{d_1} \cdot 100 \quad (14)$$

$$R_f = \frac{(d_3 - d_2)}{(d_1 - d_2)} \cdot 100 \quad (15)$$

Valores altos de  $R_f$  indicam que as partículas possuem facilidade para se reagruparem, enquanto grandes valores de  $S_f$  mostram que os flocos são fortes e difíceis de serem quebrados.

### 2.4.4 Equação cinética básica

Os parâmetros sobre a velocidade da floculação já analisados mostram a velocidade em que os flocos são formados e a taxa em que os mesmos são destruídos, fornecendo resultados satisfatórios na teoria. Entretanto, tais fenômenos ocorrem simultaneamente e, portanto, a análise deve ser feita em conjunto, de tal forma que os resultados apresentados anteriormente

não condizem totalmente com a realidade. O modelo que conecta os dois fatores foi proposto por Argamon (1971), e a taxa de crescimento dos flocos é o resultado das somas da função de agregação e da função de quebra, expressa pela equação 16.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dN_a}{dt} + \frac{dN_b}{dt} \quad (16)$$

Sendo que:

$$\frac{dN_a}{dt} = -K_A N G \quad (17)$$

$$\frac{dN_b}{dt} = -K_b N_0 G^2 \quad (18)$$

Substituindo as equações 15 e 16 em 14, e resolvendo a equação 14, chega-se no resultado para um único reator

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1 + K_b G^2 T}{1 + K_a G T} \quad (19)$$

Como os processos em estações de tratamento de água, em sua maioria, são feitos em várias câmaras de floculação em série, e considerando que os coeficientes  $K_a$  e  $K_b$  mantêm-se constantes em todas as câmaras, tem-se o seguinte resultado, expresso pela equação 20, em que  $m$  é o número de câmaras:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1 + K_b G^2 \frac{T}{m} \left[ \sum_{i=0}^{m-1} \left( K_a G \frac{T}{m} \right)^i \right]}{\left( 1 + K_a G \frac{T}{m} \right)^m} \quad (20)$$

De acordo com Bratby (1980), é possível adaptar a equação acima para um reator em fluxo de pistão, o qual equivale à um ensaio de coagulação. Para fazer tal mudança, é preciso considerar que o número de câmaras  $m$  é infinito, fazendo o limite da equação acima com  $m$  tendendo ao infinito. O cálculo do limite resulta na equação 21.

$$\frac{N}{N_0} = \frac{K_b}{K_a} G + \left( 1 - \frac{K_b}{K_a} G \right) \cdot e^{-K_a G T} \quad (21)$$

Na prática, os gradientes usados são normalmente pequenos, num intervalo de 30 a  $75s^{-1}$ , fazendo com que o coeficiente de quebra seja por volta de 1000 vezes menor que o de agregação, possibilitando a simplificação da equação 21, resultando na equação 22.

$$\frac{N}{N_0} = \left(1 + K_a G \frac{T}{m}\right)^{-m} \quad (22)$$

É possível otimizar o processo de floculação ao se conhecer os parâmetros  $K_a$  e  $K_b$ , pois permitem prever as condições ótimas de quebra e formação dos flocos, assim como a velocidade do processo. Dessa forma, é possível melhorar a eficiência da coagulação realizando experimentos e checando os valores de tais parâmetros.

A Figura 4 representa a dificuldade na formação dos flocos assim que eles são quebrados, de tal forma que o índice de floculação, que mede a taxa de agregação das partículas suspensas na água, não volta ao seu valor original, sendo reduzido bruscamente após um aumento repentino na velocidade de rotação das pás em um *jar test*.

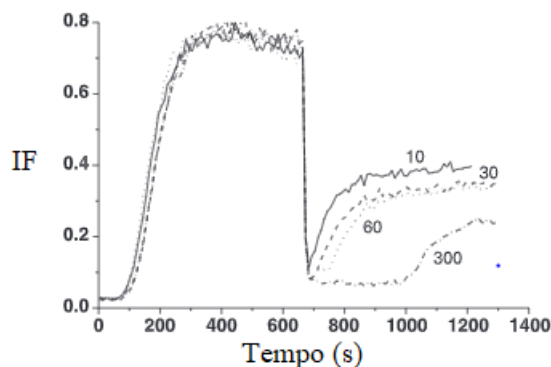


Figura 4. Variação do IF após uma perturbação no sistema

#### 2.4.5 Sedimentação diferencial

Nem sempre ocorre a floculação pericinética ou ortocinética. Quando há uma coexistência de flocos grandes e pequenos na água, tais flocos tendem a se sedimentar com diferentes velocidades, as quais ocorrem devido à diferença de tamanhos. Tal processo possibilita o contato entre as partículas e resulta em um tipo de floculação. De acordo com Tambo & Watanabe (1979), que considera a validade da lei de Stokes para a mecânica dos fluidos, chega-se na seguinte relação, expressa pela equação 23.

$$\frac{N}{N_0} = e^{-4,5C \frac{hd}{D^2}} \quad (23)$$

Com tal equação, é possível perceber que quanto maior for a concentração dos flocos, altura do leito e o diâmetro dos flocos grandes, mais alta será a eficiência de remoção pelo método de sedimentação diferencial.

## **2.5 Processos de controle**

### **2.5.1 Jar Test**

O aparelho de *jar test* tem suma importância na análise de coagulação e floculação. O desempenho de um agente floculante é medido de forma indireta com o uso do mesmo. Com os parâmetros da água bruta previamente determinados, e os parâmetros após a adição do agente em cada amostra, variando o pH ou a concentração do mesmo, é possível verificar qual concentração, pH, gradiente de velocidade ou quaisquer outros parâmetros variáveis são os melhores para a água analisada. Dessa forma, é possível em um aparelho que usa uma amostra reduzida de água, verificar quais são os melhores parâmetros para se usar na estação de tratamento de água. Devido à diversidade de aparelhos de *jar test* disponíveis, é necessária a verificação da curva de calibração. Tal curva depende do tamanho das pás, do volume dos jarros usados e da potência do aparelho, variando de acordo com o modelo do equipamento utilizado. Além disso, é necessário usar um fator de correção de acordo com a temperatura da amostra.

Como há muitos equipamentos disponíveis no mercado, deve-se optar pelo uso daqueles que apresentem o padrão “Phipps&Bird”, com a calibração indicada pela Figura 5, pois é essa que possui curvas de calibração do gradiente confiáveis, com a devida comprovação por diversos pesquisadores.

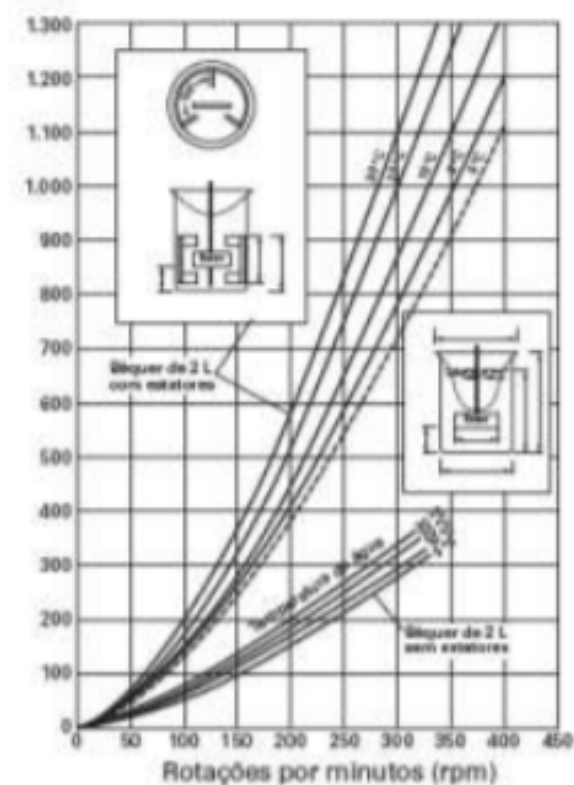


Figura 5. Curvas de calibração do gradiente de velocidade para água (Richter, 2009)

### 2.5.2 Equipamentos de monitoramento contínuo

O início dos estudos da análise do monitoramento contínuo da coagulação e floculação foi feito por Gregory & Nelson (1986), tendo como princípio fundamental as variações de turbidez da água durante o seu processo de tratamento. Uma das grandes vantagens do uso deste tipo de equipamento é a possibilidade de estimar vários tamanhos diferentes de partículas, e que ele atua de uma maneira não destrutiva, apenas retirando amostras de água do sistema, realizando a análise e a devolvendo para a amostra (Ramphal & Sibiya, 2014).

A forma com que a análise é feita é esquematizada na Figura 6.

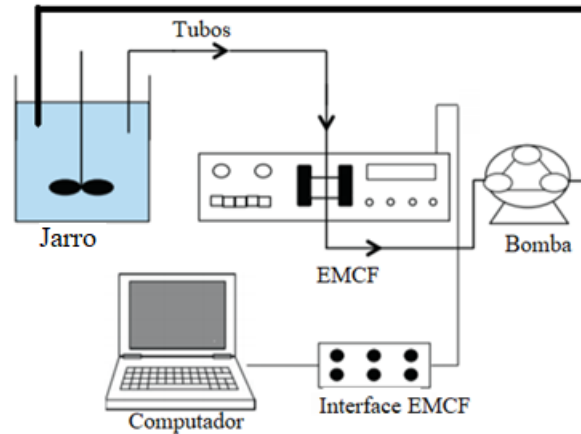


Figura 6. Esquema de funcionamento do EMCF

A Figura 7 esquematiza a célula de fluxo e os respectivos componentes ópticos inseridos no equipamento de monitoramento contínuo da floculação.

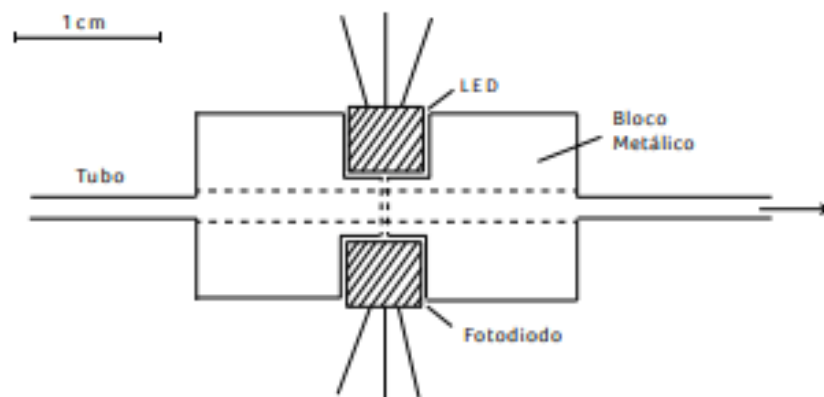


Figura 7. Célula de fluxo

A Figura 8 mostra, para o uso de diferentes dosagens de sulfato de alumínio como coagulante, a variação do índice de floculação. Embora o presente estudo não seja feito com tal coagulante, mas sim com o polímero catiônico Acquapol, é esperado que um resultado análogo aconteça para tal agente, de tal forma que para diferentes dosagens, o índice de floculação varie de forma diferente. Em todos os casos, é notório como o índice de floculação tem um patamar de aumento, significando o aumento do tamanho dos flocos e, em seguida, ocorre a estabilização do índice, mostrando que a taxa de agregação dos flocos está igual à taxa de quebra dos mesmos.

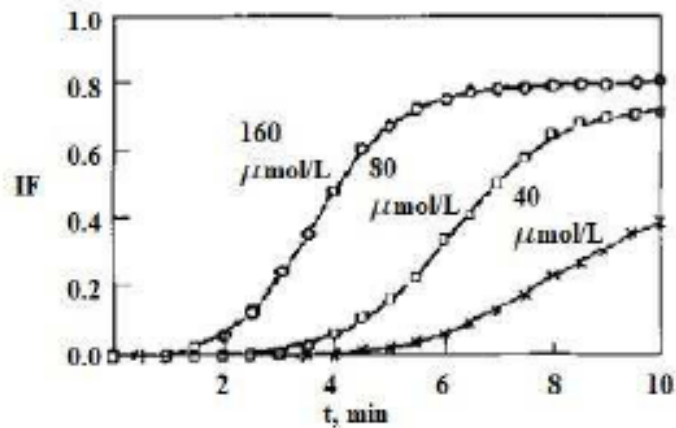


Figura 8. Variação do IF com diferentes dosagens de coagulantes

As medições comuns de turbidez, como aquelas indicadas em 2.1.4 não são tão importantes para o monitoramento de partículas nas suspensões. Entretanto, a turbidez de uma suspensão floculada, depois que os flocos começam a se formar, fornece informações importantes sobre o estado de agregação das partículas. A turbidez pode ser medida pela intensidade da luz incidida no fotodetector e tal intensidade pode ser convertida em uma voltagem, dado que essa e a intensidade são diretamente proporcionais. Dessa forma, é possível dividir tal voltagem em duas componentes: uma estável (DC) e outra variável (AC). As flutuações da turbidez esperadas estão dispostas na Figura 9.

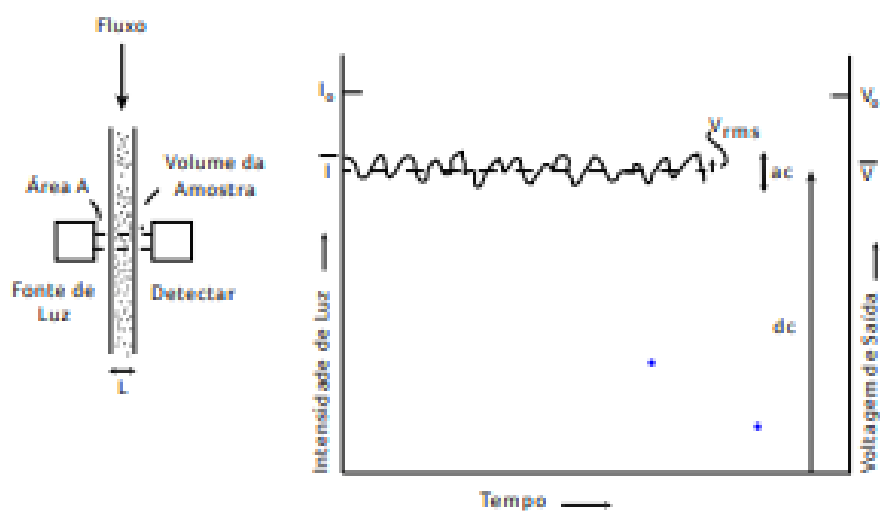


Figura 9. Componentes AC e DC esquematizadas

Fonte: (Gregory & Nelson, 1986)

A componente estável depende apenas da turbidez e, portanto, reflete a média da intensidade da luz transmitida, ao passo que a variável surge devido a variações da amostra da água analisada pelo equipamento de monitoramento. Como a não uniformidade das amostras de água causa a componente a variável, tal análise é feita estatisticamente, sendo considerada uma distribuição de Poisson para a componente variável de voltagem. Em tal distribuição, o desvio padrão é igual à raiz quadrada do valor médio. Dessa forma, o valor médio da raiz quadrada do sinal é proporcional à raiz quadrada da concentração das partículas, possibilitando correlacionar a concentração com o valor medido no equipamento de monitoramento contínuo. Comparando os sinais, deve-se verificar que a componente contínua é muito maior do que a componente variável, sendo que para analisar a componente menor, o sinal deve ser ampliado. O cálculo do índice de floculação é representado pelas equações 24 e 25.

$$IF = \frac{\sqrt{AC}}{DC} \quad (24)$$

$$IF = \left(\frac{L}{A}\right)^{0,5} \left(\sum N_i C_i^2\right)^{0,5}, \quad (25)$$

onde  $L$  é o comprimento do caminho óptico,  $A$  é a área transversal efetiva do feixe de luz,  $N_i$  é a concentração de partículas do tipo  $i$  e  $C_i$  é a área transversal das partículas responsáveis pela dispersão. O índice de floculação é alterado praticamente pelo fator  $(\sum N_i C_i^2)^{0,5}$  e é praticamente desprezível o efeito relativo à contaminação das paredes do tubo e de desvios dos componentes elétricos (Xiao, Huang, Zhang, & Cui, 2009).

A forma com que é esperado que o índice de floculação varie é indicada na Figura 10.

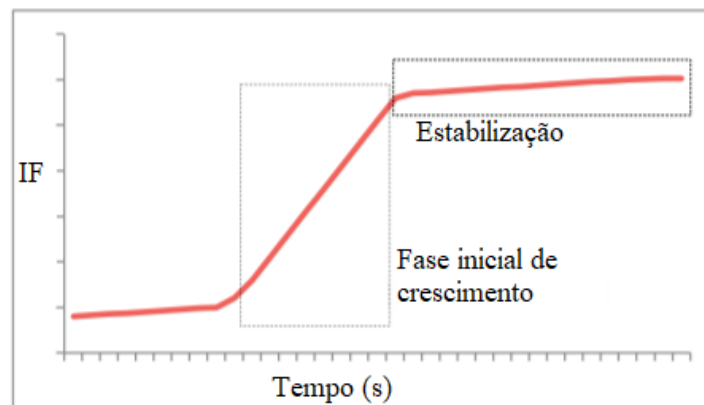


Figura 10. Resultado esperado da variação do IF



A diferença de perfis nas regiões indica a evolução do tamanho médio das partículas presentes na água com relação ao tempo de floculação em diferentes taxas de cisalhamento. Quando ocorre a coagulação e as partículas começam a se agregar, é visto que o índice de floculação começa a aumentar, visto que o tamanho dos flocos começa a aumentar significativamente. No final, há uma estabilização, pois a velocidade de quebra dos flocos tende a igualar-se à velocidade de agregação das partículas, gerando o equilíbrio do sistema (Hopkins & Ducoste, 2003).

Apenas a verificação do índice de floculação não é suficiente para se obter resultados satisfatórios referentes à floculação, sendo necessária a criação de novos parâmetros a partir do índice de floculação para realizar uma análise mais precisa de acordo com o interesse da análise.

## **2.6 Agente coagulante usado**

O uso de polímeros catiônicos é estudado pelo fato de que, ao usá-los como auxiliares na coagulação, os mesmos reduzem significativamente a dosagem necessária do coagulante primário durante o tratamento da água (Di Bernardo & Dantas, 2005).

O Acquapol é um coagulante orgânico, ambientalmente correto, sendo desenvolvido a partir da extração do tanino vegetal da Acácia Negra, proveniente de áreas controladas por padrões internacionais do FSC-Forest Stewardship Council, para Bom Manejo Florestal.

Uma grande vantagem, por serem obtidos a partir de fontes renováveis e serem formados por matéria orgânica, é que não são tóxicos, o que faz com que o manejo dos lodos obtidos no tratamento da água seja menos oneroso e arriscado. Um grande problema que era enfrentado por alguns países como Suíça e Japão é que alguns polieletrólitos usados no tratamento da água potável ofereciam efeitos incertos para a saúde humana no longo prazo. Dessa forma, aumentou-se o interesse em polímeros naturais, que é o caso do Acquapol C1 30 (Bolto, 1995).

Quimicamente, é um polímero catiônico com sua carga proveniente de grupos amônio, com baixa massa molecular, solúvel e biodegradável. O mesmo atua em um sistema de partículas coloidais neutralizando as cargas de impurezas presentes no meio e formando pontes entre elas, gerando coágulos. As partículas aglutinadas possuem maior peso e tamanho, de tal forma que, com o aumento dos coágulos, obtém-se estruturas maiores, os flocos, os quais podem ser removidos por processos de decantação ou filtração. Sua característica mais vantajosa é a de que complexa a maioria dos metais, sem consumir a alcalinidade do meio, além de que, por ter o tanato quaternário de amônio como ativo, o Acquapol não sofre hidrólise,

devido ao tamanho da sua molécula e por sua carga positiva. O modo de ação do produto encontra-se simplificado na Figura 11.

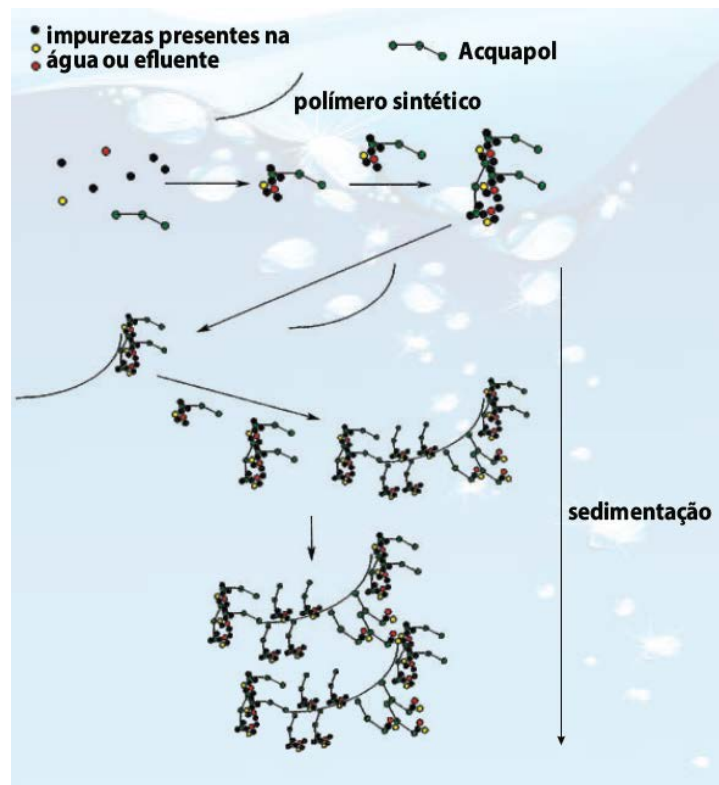


Figura 11. Mecanismo de atuação do polímero

Sua estrutura química é dada pela Figura 12.

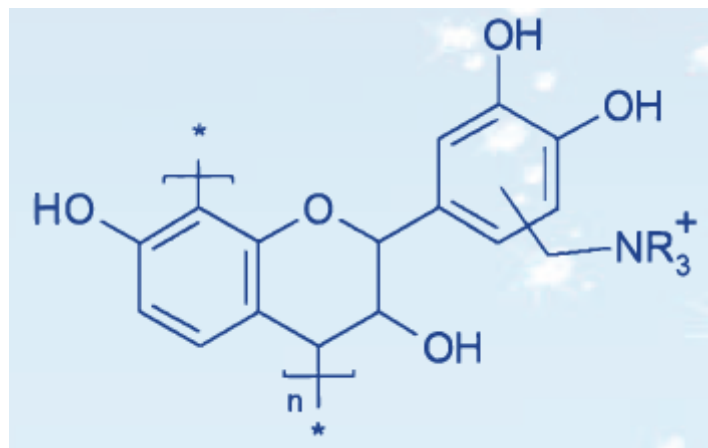


Figura 12. Fórmula química do composto

## 3 Metodologia

### 3.1 Determinação da dosagem ótima

O presente trabalho tem como objetivo a determinação da dosagem ótima de coagulante de acordo com o pH inicial da amostra. Dessa forma, para um mesmo pH, são usadas várias concentrações iniciais do agente coagulante para que, com os resultados da amostra após o *jar test*, seja possível verificar aquela que remove a maior quantidade de impurezas da água e melhora os parâmetros analisados. É esperado que haja uma concentração de coagulante ótima, em que aumentando ou diminuindo a mesma, ocorra uma piora nos parâmetros de qualidade finais da água. Dessa forma, ao obter-se tal pico na melhora dos parâmetros, é possível obter a dosagem ótima do coagulante para o tratamento da água bruta em questão.

### 3.2 Materiais

A Tabela 1 mostra os materiais utilizados nos experimentos.

Tabela 1. Materiais utilizados

| Equipamento               | Descrição                    | Aplicação                                      |
|---------------------------|------------------------------|--|
| ECMF                      | ITA (Russo,2017)             | Ensaio de coagulação                           |
| Jar Test                  | Nova Ética Modelo LDB        | Ensaio de coagulação                           |
| Bomba peristáltica        | Watson Marlow                | Movimentação da amostra entre o jarro e o EMCF |
| Espectrofotômetro         | DR 6000 Benchtop Hatch       | Análises de cor e absorvância                  |
| pHmetro                   | QX 1500 Plus Qualxtron       | Leitura de pH e medida de temperatura          |
| Turbidímetro              | 2100Q Hach                   | Análise de turbidez                            |
| Ultra purificador de água | Gehaka Master System         | Fornecimento de água deionizada                |
| Capela                    | Sp Labor                     | Local de preparo de soluções químicas          |
| Balança eletrônica        | Shumadzu AUY220              | Pesagem de substâncias                         |
| Agitador                  | Fisatom Mod. 752             | Homogeneização da amostra para análises        |
| Tubo                      | MarterflexTygon 06409-16 4mm | Circulação da amostra entre o jarro e o EMCF   |
| Barrilete                 | Permutation 50L              | Armazenamento e homogeneização da água bruta   |

### 3.3 Metodologia

Primeiramente, a água bruta é coletada na estação de tratamento de água do DCTA e transportada até o laboratório de hidrologia da Divisão de Engenharia Civil do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, onde é armazenado em um freezer convencional a uma

temperature de 1,5°C. Para iniciar os experimentos, são colocados dois litros de água em cada jarro usado no *jar test* e a temperatura da água é ajustada para 20°C. Em seguida, ajusta-se o pH de cada amostra para o valor desejado do teste, adicionando-se uma solução de ácido sulfúrico, além de carbonato de sódio, para que o pH não se altere com a adição do agente floculante. O pH adotado foi 6,5, pois é uma recomendação do fabricante (Seta, 2019).

Com o pH da água devidamente ajustado para o valor desejado, realizam-se os testes para medição de seus parâmetros de qualidade.

A bomba é posicionada depois do equipamento de monitoramento contínuo, para evitar que pudesse haver quebra dos flocos na parte de aperto da bomba (Yukselen & Gregory, 2004).

Volumes diferentes da solução do coagulante são adicionados às amostras, as quais são submetidas a um *jar test* em que a mistura rápida é feita durante 20 segundos com uma rotação de 500 RPM e a mistura lenta é feita por mais 15 minutos com rotação de 45 RPM. Após as amostras saírem do *jar test*, a água de cada uma delas é separada para análises dos seus padrões de qualidade. Após obter a melhor concentração do agente coagulante, é repetido o teste usando o equipamento de monitoramento contínuo, para verificar a mudança do índice de floculação ao longo do processo.

Outro teste feito é o de verificação das imagens das amostras, visando verificar o tamanho das partículas na água em cada etapa do tratamento da água. Para isso, foi usado um microscópio óptico com câmara digital S1 da marca Bettersize.

## **3.4 Água de estudo**

### **3.4.1 Água Bruta**

A água usada nos experimentos foi a água bruta coletada na estação de tratamento de água do Departamento de Ciência e Tecnologia de Aeronáutica (DCTA). Tal água é proveniente do córrego Vidoca, o qual pertence ao Ribeirão Vidoca, localizado na região sul de São José dos Campos. Poços artesianos subterrâneos também são usados para captar uma parte da água bruta disponível na estação de tratamento.

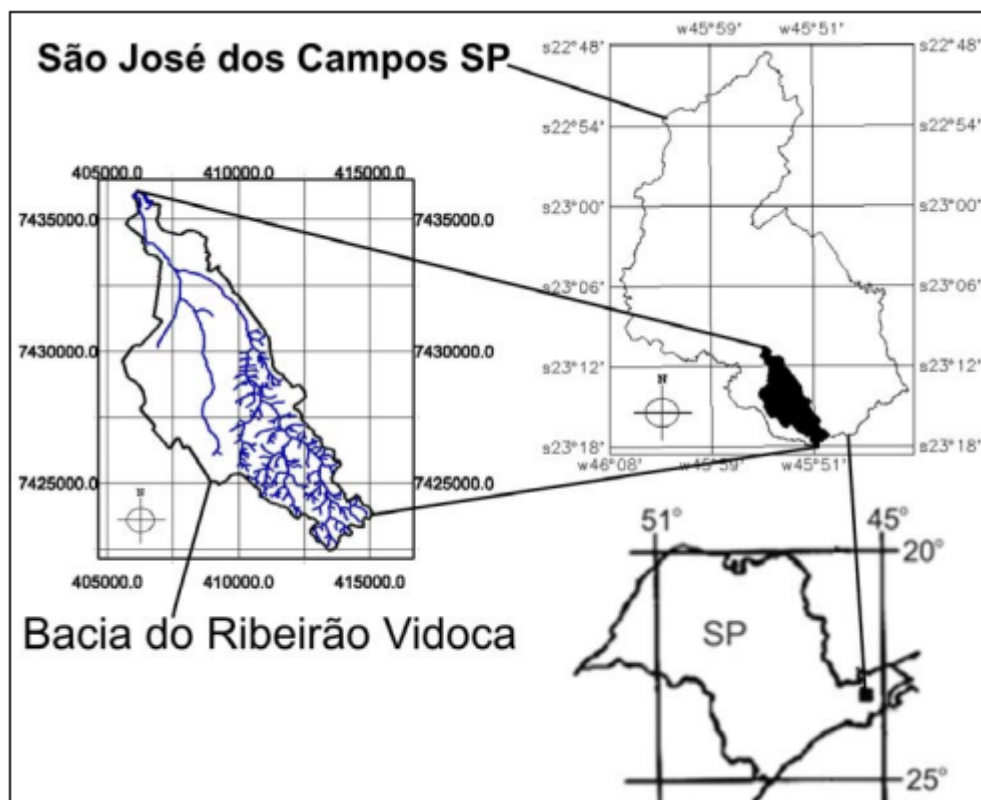


Figura 13. Microbacia do ribeirão Vidoca e sua localização no município de São José dos Campos (Stempniak, 2007)

A ETA do DCTA é responsável por todo o abastecimento de água potável do campus Guarnaé-SJ e trata aproximadamente 3 milhões de litros de água diariamente. A população estimada do campus é de 6000 pessoas (Cruz, 2017).

### 3.5 Caracterização da água

#### 3.5.1 pH

O pH da amostra de água foi medido com o phmetro de bancada QX 1500 Plus da Qualxtron. A parte externa do bulbo é introduzida na amostra a ser analisada, e o pH da amostra é aquele que o aparelho exibe quando está estabilizado.

#### 3.5.2 Absorbância

A absorbância foi medida com o espectrofotômetro DR 6000. Novamente, é necessário usar a água deionizada como zero e em seguida faz-se a leitura da amostra de água, a qual é inserida em uma cubeta padrão para análise.

#### 3.5.3 Cor

A cor aparente foi medida usando o espectrofotômetro DR 6000 Benchtop no comprimento de onda de 465 nm. Usa-se uma amostra de água deionizada para ser o zero do

aparelho e, em seguida, faz-se a medida da amostra em questão. Ambas amostras são colocadas em um recipiente de vidro característico do aparelho.

### 3.5.4 Turbidez

A medida da turbidez da água foi feita com o turbidímetro 2100Q da empresa Hach, com o resultado expresso em unidades nefelométricas de turbidez (UNT). A água é inserida em um recipiente padrão para análise.

## 4 Resultados e discussões

### 4.1 Caracterização da água bruta

Os parâmetros de qualidade da água bruta estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de qualidade da água bruta

| Parâmetro      | Valor |
|----------------|-------|
| pH             | 7,1   |
| Absorbância    | 0,036 |
| Cor(uH)        | 137   |
| Turbidez (UNT) | 31    |

Os valores estão expostos a mudanças no dia a dia, pois tais valores dependem de muitos parâmetros que não são facilmente controlados durante a obtenção da água. Podem ser citados impurezas nos canos, os quais contaminam a água até chegar à estação de tratamento, períodos de chuvas, que alteram a qualidade das águas dos rios, além de poder trazer grandes volumes de terra e folhas, as quais podem entrar em estado de decomposição e prejudicar demanda química e biológica de oxigênio, turbidez e outros fatores.

Outro fator que deve ser levado em conta é que a água bruta do DCTA já está com cloro e carbonato de sódio adicionados à água bruta, o que faz com que o pH da água esteja mais alto do que na captação.

Geralmente, a água bruta da estação de tratamento apresenta turbidez baixa, variando num intervalo de 15 a 30 UNT, porém, em períodos chuvosos, tal turbidez pode alcançar valores superiores a 100 UNT, fazendo com que a análise de tais melhorias se torne uma tarefa complicada. Além disso, tais variações destacam a importância de algum tipo de equipamento de monitoramento contínuo em uma ETA, pois a partir dele, é possível verificar as dosagens ótimas visando uma melhora na qualidade da água e economia nos gastos com coagulantes.

## 4.2 Determinação da dosagem ótima

O pH escolhido para a análise da dosagem ótima foi 6,5, pois além de estar próximo do pH da água bruta, está na faixa recomendada pelo fabricante do coagulante, da marca Seta, que é de 6,3 a 6,8. Tal faixa permite o funcionamento ótimo do coagulante, preservando suas características ótimas (Seta, 2019). As dosagens escolhidas para a análise foram de 10, 20, 40, 60, 80, 100, 140 e 200 ppm, também seguindo orientação do fabricante. Algumas dosagens não apresentaram resultados significativos, e dessa forma, não foram incluídas na análise da qualidade do tratamento. Dosagens muito baixas não causavam nenhuma alteração visível na qualidade da água, enquanto que dosagens muito altas faziam com que a cor da água ao final do tratamento ficasse muito escura, dado que o coagulante apresenta uma cor escura. Além disso, o polímero catiônico é usado para neutralizar a carga negativa dos colóides, de tal forma que a adição de concentrações muito altas do coagulante fazem com que as partículas passem a ter uma carga positiva, impossibilitando sua desestabilização.

Portanto, as dosagens analisadas foram de 60, 80 e 100 ppm. A Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 indicam os parâmetros de qualidade da água antes do tratamento e logo após, respeitando a metodologia indicada no item 3.2. Para se quantificar a eficiência da melhora das características físicas da água bruta, analisou-se a variação relativa de cada parâmetro, de acordo com a dosagem utilizada.

Tabela 3. Resultados do ensaio de *jar test* para a dosagem de 60 ppm

| Parâmetro      | Valor inicial | Valor final | Varição relativa (%) |
|----------------|---------------|-------------|----------------------|
| Turbidez (UNT) | 31,21         | 3,22        | 89,68                |
| Absorbância    | 0,034         | 0,01        | 70,76                |
| Cor(uH)        | 138           | 64          | 53,68                |

Tabela 4. Resultados do ensaio de *jar test* para a dosagem de 80 ppm

| Parâmetro      | Valor inicial | Valor final | Varição relativa (%) |
|----------------|---------------|-------------|----------------------|
| Turbidez (UNT) | 31,110        | 1,7         | 96,10                |
| Absorbância    | 0,036         | 0,004       | 88,80                |
| Cor(uH)        | 136           | 59          | 56,61                |

Tabela 5. Resultados do ensaio de *jar test* para a dosagem de 100 ppm

| Parâmetro      | Valor inicial | Valor final | Varição relativa (%) |
|----------------|---------------|-------------|----------------------|
| Turbidez (UNT) | 30,57         | 12          | 60,75                |
| Absorbância    | 0,036         | 0,007       | 80,76                |
| Cor(uH)        | 137           | 80          | 41,47                |

Para se ter uma melhor noção dos resultados, eles foram agrupados de acordo com o parâmetro em questão para se verificar graficamente como foi a variação em cada dosagem. Os limites do eixo vertical foram escolhidos de tal forma que fosse possível verificar como a remoção de turbidez e de absorbância é muito maior do que a de cor. Isso pode ser explicado pelo fato de que o composto usado na coagulação prejudica a cor da água devido à sua cor natural. A barra de erros corresponde ao valor mínimo e máximo dos ensaios, uma vez que os testes foram feitos em triplicada, sendo usado o resultado da média dos valores.

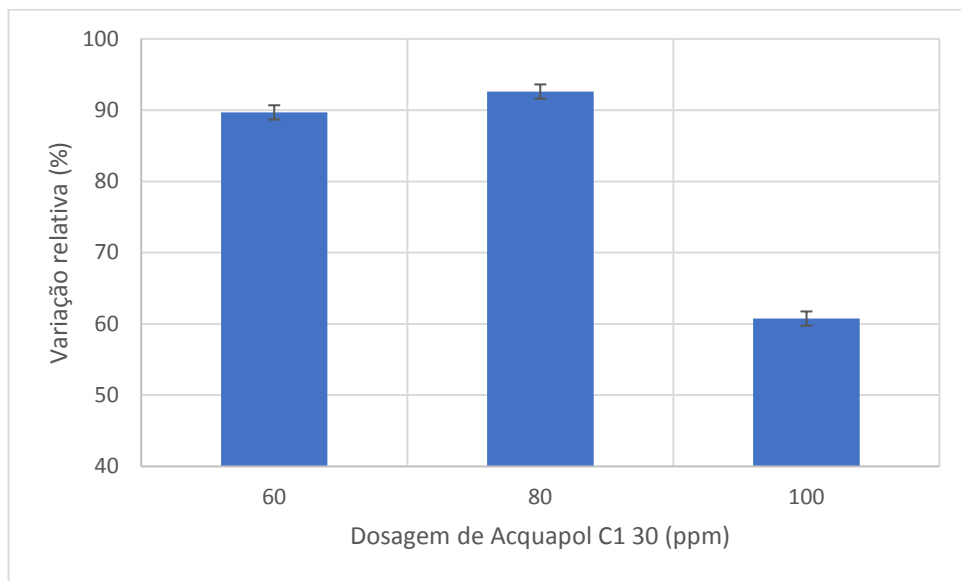


Figura 14. Remoção de turbidez para diferentes dosagens

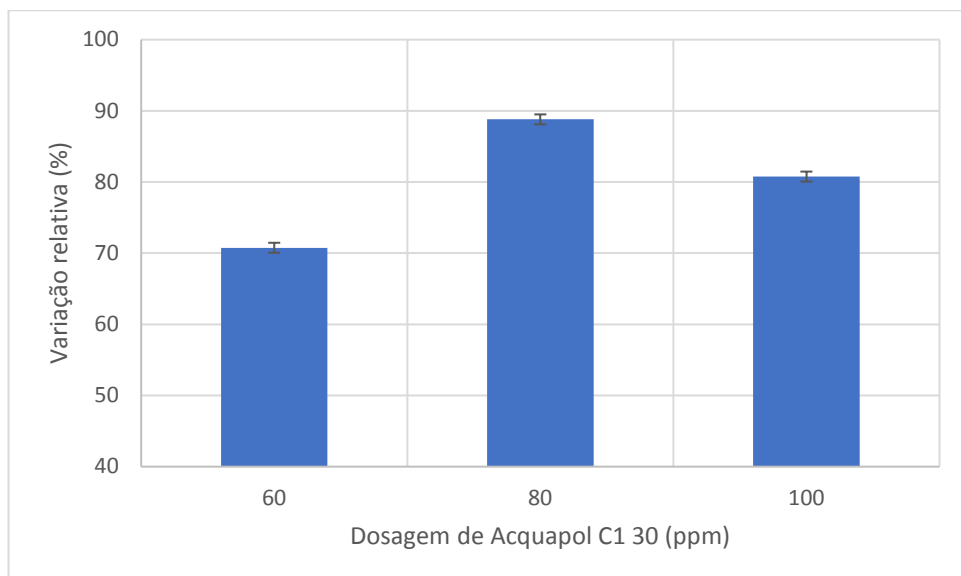


Figura 15. Remoção de absorbância para diferentes dosagens



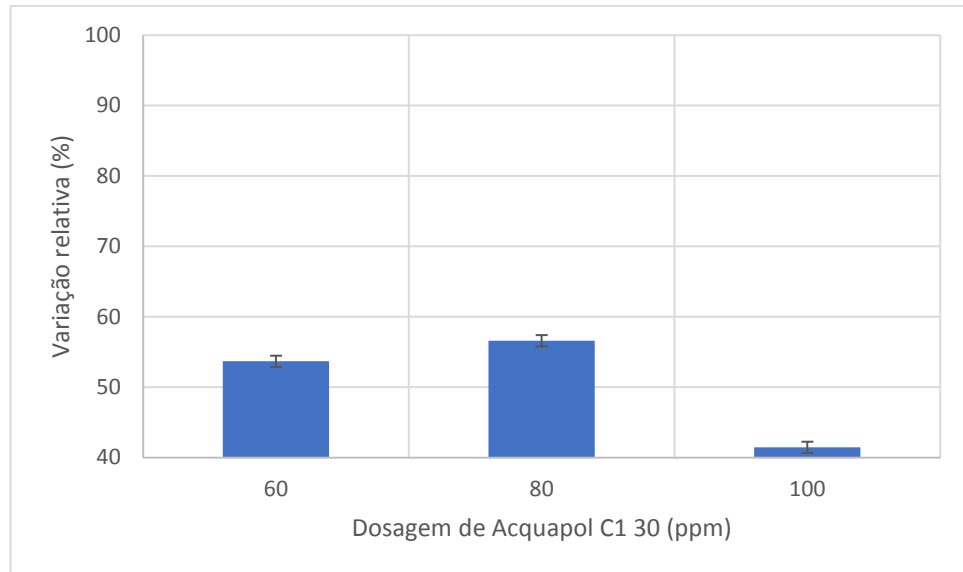


Figura 16. Remoção de cor para diferentes dosagens

Ao se analisar os resultados obtidos, verifica-se que o melhor resultado é obtido com a dosagem de 80 ppm, pois todos os resultados são melhores nesta dosagem. É interessante notar que, para se determinar a melhor dosagem de fato, seria necessário fazer os experimentos para dosagens intermediárias, discretizando em intervalos cada vez menores o espaçamento entre os testes. Entretanto, o resultado obtido já se mostra satisfatório pois a melhora dos parâmetros de qualidade da água é significativa e é visto o perfil esperado nos gráficos, havendo um pico de melhora comparando 3 dosagens diferentes. Além disso, como a água bruta não tem sempre os mesmos parâmetros de qualidade, tal dosagem recomendada não seria a mesma. Dessa forma, é notável que o resultado se encontra nesta faixa de dosagens. Uma sugestão para trabalhos futuros seria verificar a dosagem ótima para amostras da água bruta retirada em datas diferentes, verificando se a faixa de dosagem recomendada mantém-se num intervalo grande ou pequeno.

### 4.3 Análise dos dados de IF

A análise dos dados do índice de floculação foi feita para a dosagem de 80 ppm, uma vez que é a que apresenta os melhores valores de remoção dos parâmetros de qualidade da água.

A Figura 17 mostra os resultados obtidos com o ECMF.

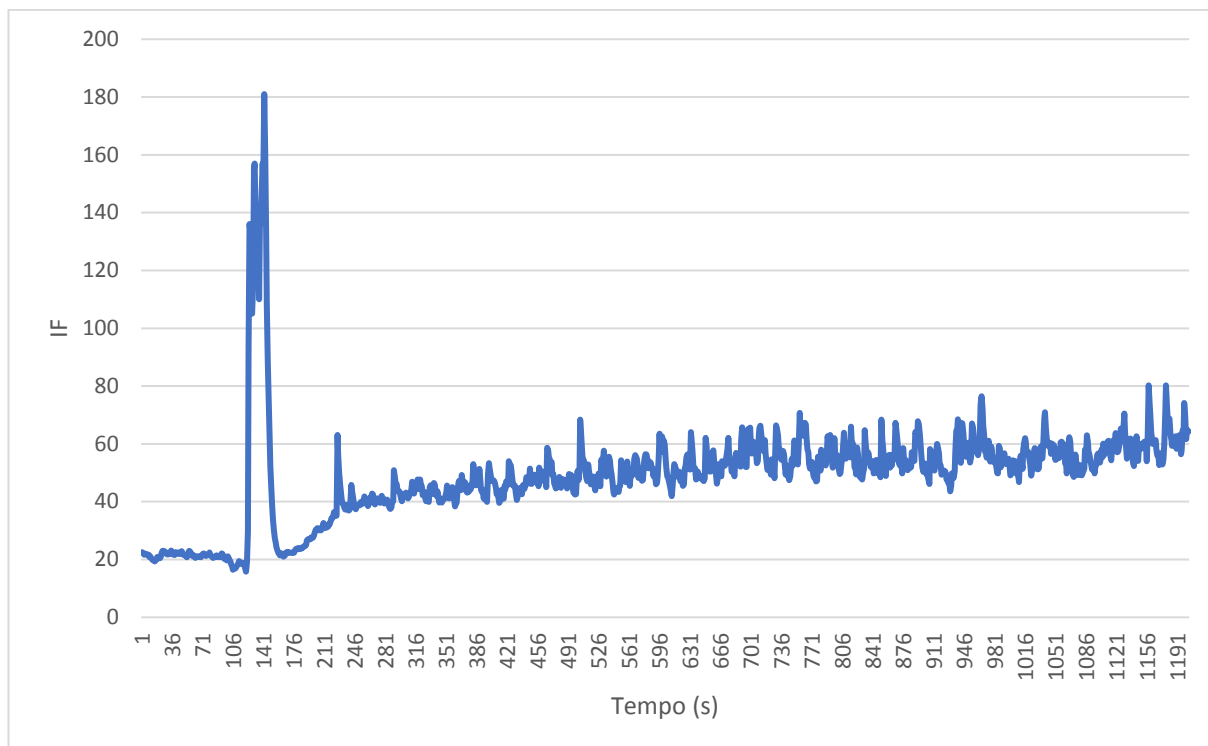


Figura 17. Variação do índice de floculação durante o tratamento da água com a dosagem de 80 ppm

O patamar inicial refere-se a um período usado para estabilizar os dados obtidos pelo ECMF, para que não haja desvios durante a obtenção dos dados. O pico é decorrente da agitação durante a mistura rápida, que torna o fluxo de água caótico, fazendo com que tais resultados não sejam necessários para a análise. Dessa forma, optou-se pela análise da curva desconsiderando tal pico, causado pela mistura rápida e os dados obtidos antes do mesmo, como mostrado pela Figura 18.

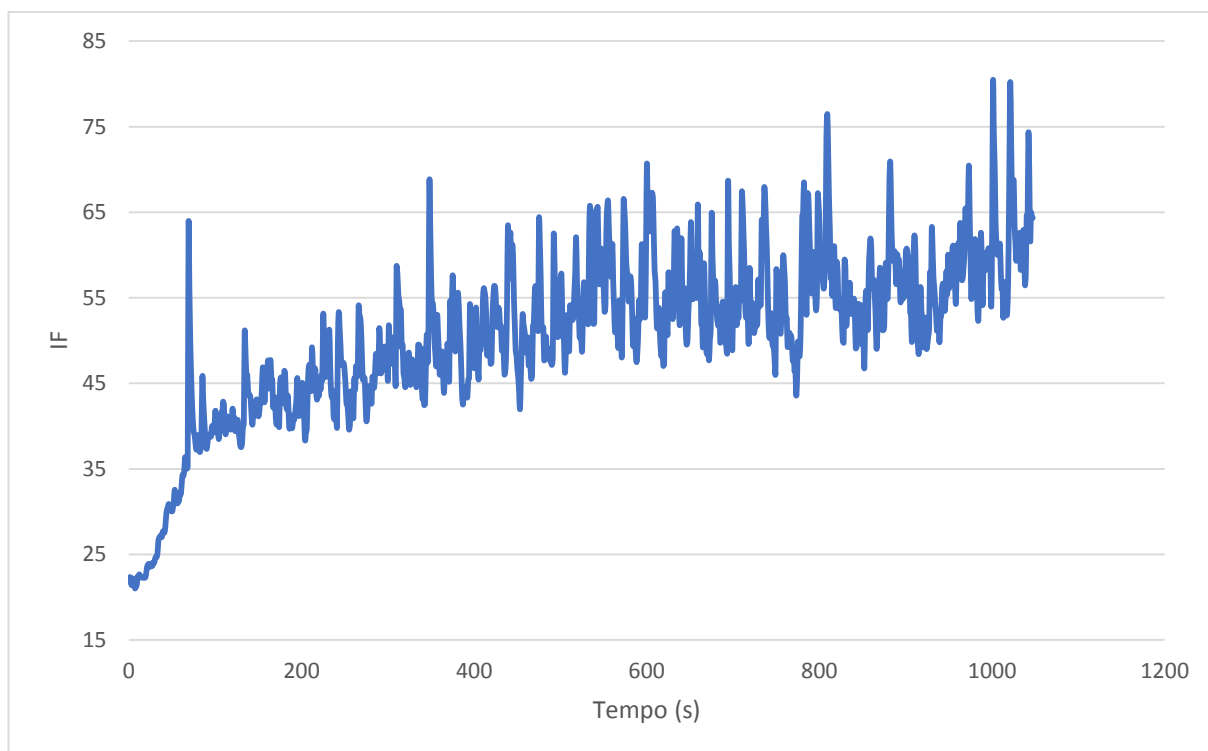


Figura 18. Variação do índice de floculação desconsiderando o pico inicial

Tal gráfico apresenta uma série de ruídos causados pela variação das partículas analisadas no ECMF, visto que os aglomerados não possuem tamanho constante ao longo da amostra e que podem ocorrer imprecisões dentro do aparelho. Dessa forma, buscou-se ajustar os valores do índice de floculação com curvas já conhecidas. A análise buscou uma curva que tivesse um elevado valor de  $R^2$  e que fosse estritamente crescente, uma vez que polinômios de graus altos buscam se ajustar a muitos pontos da curva e acabam não representando um padrão físico esperado. Os valores de  $R^2$ , e se a curva é estritamente crescente, encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6. Verificação do ajuste dos diferentes tipos de curva

| Curva             | $R^2$ | Estritamente crescente |
|-------------------|-------|------------------------|
| Exponencial       | 0,56  | SIM                    |
| Linear            | 0,59  | SIM                    |
| Logarítmica       | 0,73  | SIM                    |
| Polinômio 2° grau | 0,69  | NÃO                    |
| Polinômio 3° grau | 0,73  | SIM                    |
| Polinômio 4° grau | 0,73  | SIM                    |
| Polinômio 5° grau | 0,75  | NÃO                    |
| Polinômio 6° grau | 0,76  | NÃO                    |
| Potência          | 0,80  | SIM                    |

Dessa forma, a curva de ajuste escolhida foi a do tipo potência, por apresentar o maior  $R^2$  e por ser estritamente crescente. Sua fórmula é dada pela equação 26:

$$IF = 15,203t^{0,1983} \quad (26)$$

A Figura 19 e a Figura 20 mostram seu formato individualmente e junto com os dados obtidos pelo ECMF.

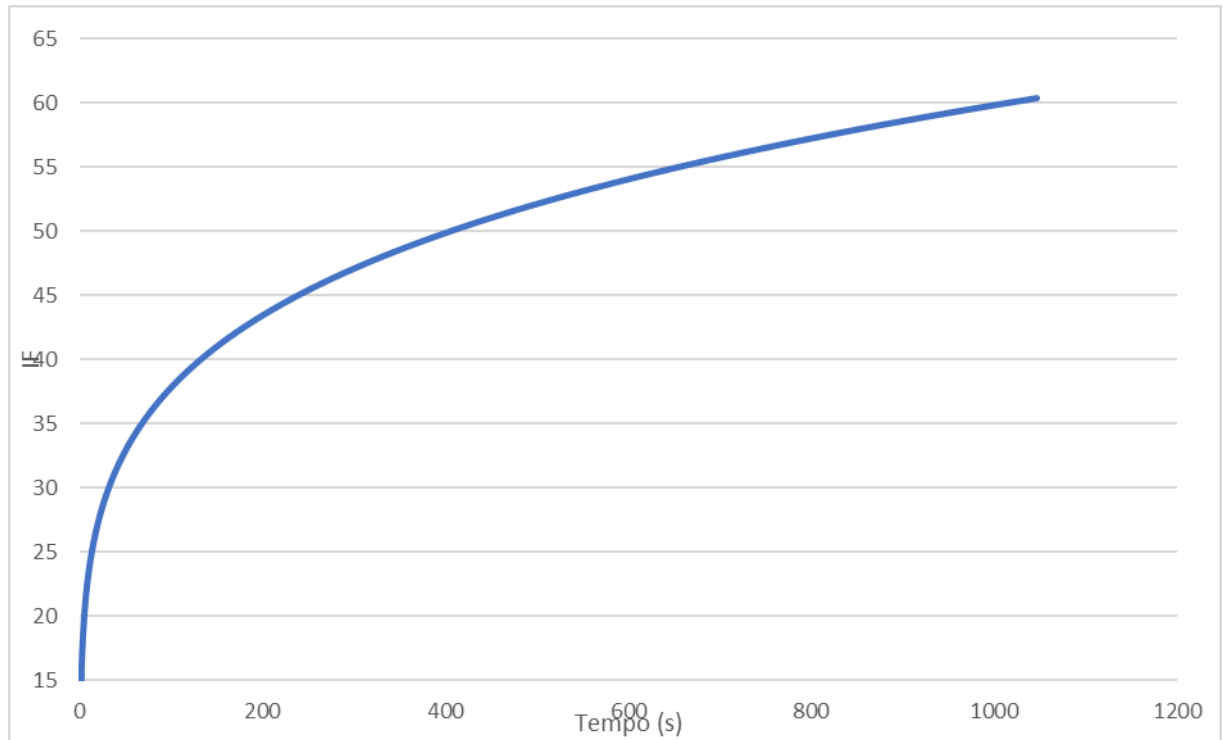


Figura 19. Variação do IF usando a fórmula ajustada

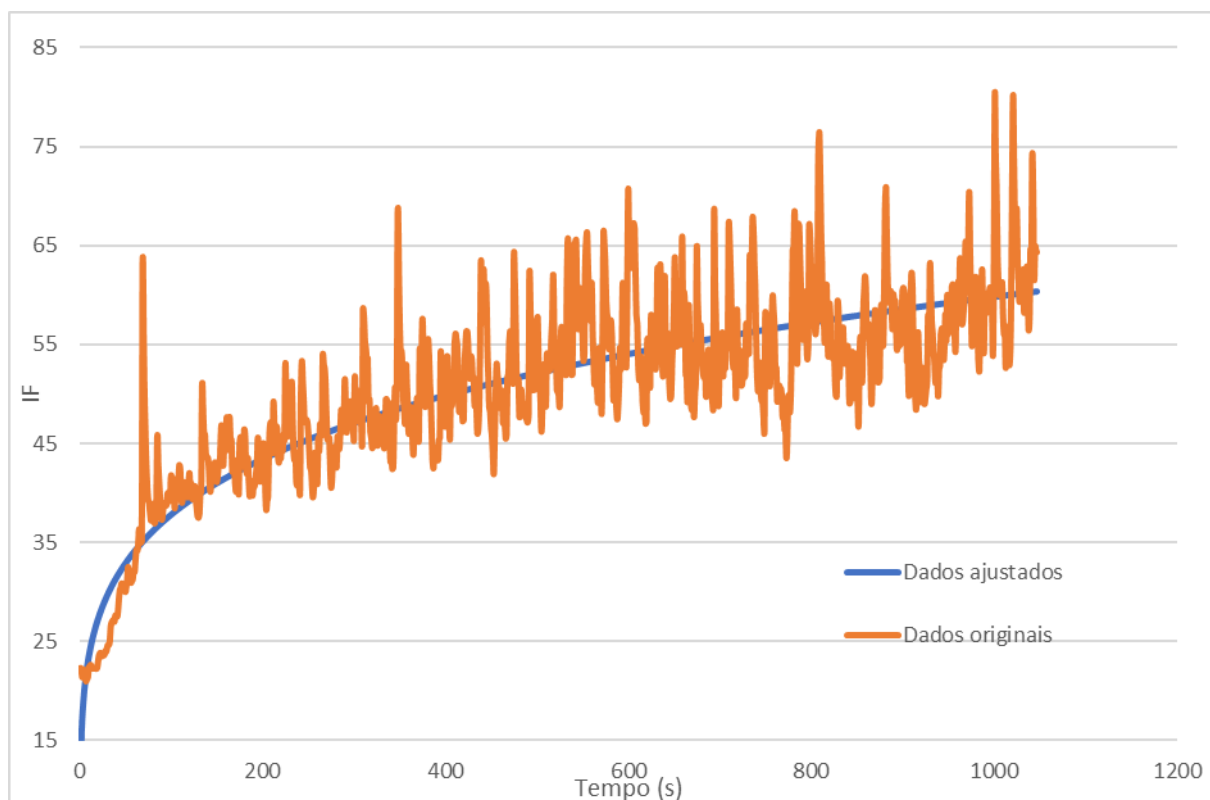


Figura 20. Comparação da curva ajustada e original

A curva mostra que, inicialmente, há um aumento muito grande do índice de floculação, e em seguida ocorre a estabilização dos valores, mostrando que a taxa de agregação tende a se igualar com a taxa de segregação. Pelos dados ajustados é possível imaginar que tais parâmetros tendem a aumentar sempre com o tempo, porém há um limite a ser alcançado. Pela curva dos dados originais é possível perceber de uma forma melhor que há uma tendência de estabilização em um patamar.

A análise do índice de floculação nos permite verificar a qualidade do tratamento da água bruta usando a dosagem de 80 ppm, pois nota-se um claro aumento no índice de floculação, conforme o esperado, além de que a melhora dos parâmetros de qualidade da água é significativa, excluindo-se a remoção de cor, a qual é baixa devido ao fato de que o próprio agente coagulante tem uma influência negativa na cor.

A Tabela 7 indica a mudança do índice de floculação considerando a curva ajustada, para facilitar a análise, dado que para um intervalo considerado, o valor correto desse índice não é tão claro devido aos ruídos na obtenção dos dados. É necessário considerar como ponto inicial algum que não esteja no começo da curva, pois esses possuem valores menores que o ponto inicial da curva original.

Tabela 7. Valores do índice de floculação em certos instantes de tempo após a mistura rápida

| Tempo (s) | IF | Variação |
|-----------|----|----------|
| 20        | 27 | -        |
| 200       | 43 | 16       |
| 1040      | 60 | 17       |

Tais valores mostram que houve praticamente a mesma variação no índice de floculação para os 3 minutos iniciais e para os 14 minutos seguintes, indicando que o aumento ocorre de forma muito acentuada no início do processo. Tal resultado pode ser explicado pela rotação das pás usadas, proporcionando um maior gradiente.

A Figura 21 mostra o resultado das amostras usando dosagens de 60 e 80 ppm.

Figura 21. Resultado das amostras usando a dosagem de 60 ppm, à esquerda e 80 ppm, à direita

#### 4.4 Análise das imagens das partículas

Para verificar a qualidade da coagulação e floculação do processo, analisou-se as imagens das amostras em 3 etapas. Primeiramente, verificou-se como estavam as partículas na água bruta, para que fosse confirmado que as partículas estavam suspensas, e, dessa forma, não seria

possível vê-las no microscópio. Em seguida, analisou-se a amostra ao final da floculação para se verificar o aumento no tamanho dos flocos e no final foi analisada a amostra após a decantação.

#### 4.4.1 Água bruta

A Figura 22 mostra parte de uma gota da água bruta. Nela é possível verificar que não é possível ver muitas partículas visíveis, pois se encontram em suspensão.

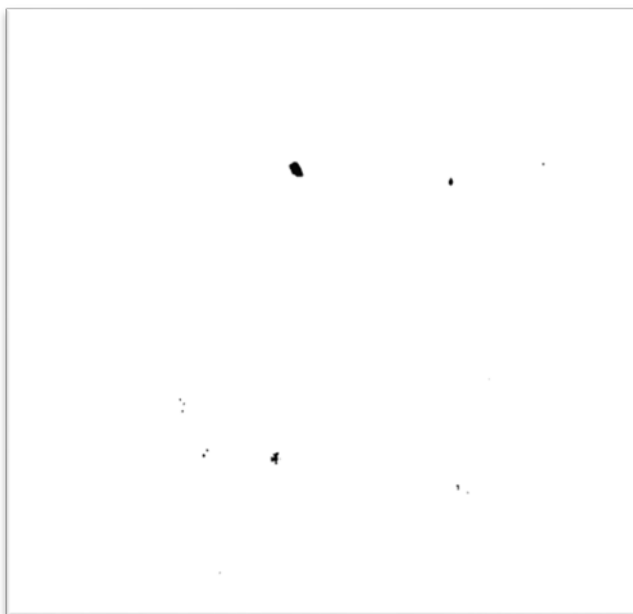


Figura 22. Imagem de parte de uma gota da água bruta obtida com o microscópio

Analisando todas as partes da gota pelo microscópio, é possível obter dados relevantes sobre a distribuição das partículas em relação ao seu tamanho. A Tabela 8 mostra a distribuição das partículas na amostra.

Tabela 8. Distribuição de partículas em relação à seu tamanho para a água bruta

| Tamanho(um)   | Quantidade (%) | Acumulado (%) |
|---------------|----------------|---------------|
| 1.00 - 1.43   | 0              | 0             |
| 1.43 - 2.04   | 0,03           | 0,03          |
| 2.04 - 2.91   | 0,07           | 0,1           |
| 2.91 - 4.16   | 0,82           | 0,92          |
| 4.16 - 5.94   | 0,69           | 1,61          |
| 5.94 - 8.49   | 1,02           | 2,63          |
| 8.49 - 12.13  | 3,66           | 6,29          |
| 12.13 - 17.32 | 7,64           | 13,93         |
| 17.32 - 24.74 | 14,74          | 28,67         |
| 24.74 - 35.33 | 71,33          | 100           |

Além disso, obteve-se que o diâmetro máximo de uma partícula encontrada na amostra foi de  $27,34 \mu m$ , o diâmetro médio das partículas foi de  $6,68 \mu m$  e o  $D_{10}$  foi de  $16,76 \mu m$ , ou seja, 90% das partículas da amostra eram menores que o  $D_{10}$  obtido.

#### 4.4.2 Água após a floculação

A Figura 23 mostra parte de uma gota da água após a floculação. Nela, é possível verificar que além de haver mais flocos, há um aumento no tamanho dos aglomerados de partículas. Por isso, conclui-se que houve a floculação e por isso o índice de floculação aumentou no processo de tratamento da água, como visto em 4.3.

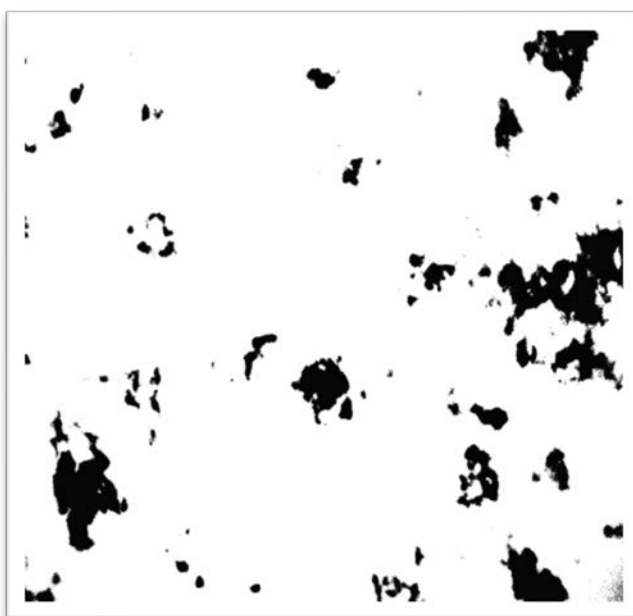


Figura 23. Imagem de parte de uma gota da água após a floculação usando uma dosagem de 80 ppm obtida com o microscópio



Tabela 9. Distribuição de partículas em relação à seu tamanho para a água após a floculação

| Tamanho( $\mu m$ ) | Quantidade (%) | Acumulado (%) |
|--------------------|----------------|---------------|
| 1.00 - 1.43        | 0,01           | 0,01          |
| 1.43 - 2.04        | 0              | 0,01          |
| 2.04 - 2.91        | 0              | 0,01          |
| 2.91 - 4.16        | 0              | 0,01          |
| 4.16 - 5.94        | 0              | 0,01          |
| 5.94 - 8.49        | 0,02           | 0,03          |
| 8.49 - 12.13       | 0,02           | 0,05          |
| 12.13 - 17.32      | 0,15           | 0,2           |
| 17.32 - 24.74      | 0,44           | 0,64          |
| 24.74 - 35.33      | 1,83           | 2,47          |
| 35.33 - 50.47      | 2,3            | 4,77          |
| 50.47 - 72.08      | 5,64           | 10,41         |
| 72.08 - 102.96     | 6,02           | 16,43         |
| 102.96 - 147.06    | 26,73          | 43,16         |
| 147.06 - 210.04    | 56,84          | 100           |

Além disso, verificou-se que o diâmetro máximo das partículas foi de 180,35  $\mu m$ , o diâmetro médio foi de 2,65  $\mu m$  e o  $D_{10}$  foi de 61,74  $\mu m$ .

#### 4.4.3 Água após a decantação

A Figura 24 mostra a imagem de uma parte de uma gota de água retirada após a decantação das partículas. Nela é possível ver que há apenas partículas pequenas e poucas delas. Isso deve se ao fato de que as partículas grandes são as que se aglomeraram e aumentaram sua densidade, e, portanto, decantando. Ao analisar a sequência de imagens, é possível verificar que a floculação ocorreu conforme o esperado. Primeiramente, não era possível ver as partículas, pois estavam suspensas. Após a floculação, o tamanho das partículas aumentou e na decantação houve uma grande redução no tamanho e número das partículas.

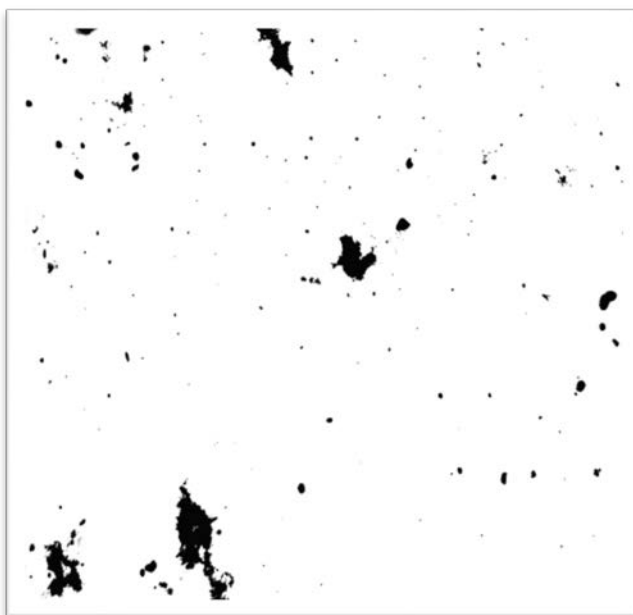


Figura 24. Imagem de parte de uma gota da água após a decantação usando uma dosagem de 80 ppm obtida com o microscópio

Tabela 10. Distribuição de partículas em relação à seu tamanho para a água após a decantação

| Tamanho( $\mu m$ ) | Quantidade (%) | Acumulado (%) |
|--------------------|----------------|---------------|
| 1.00 - 1.43        | 0,07           | 0,07          |
| 1.43 - 2.04        | 0,15           | 0,22          |
| 2.04 - 2.91        | 0,8            | 1,02          |
| 2.91 - 4.16        | 1,22           | 2,24          |
| 4.16 - 5.94        | 5,52           | 7,76          |
| 5.94 - 8.49        | 19,42          | 27,18         |
| 8.49 - 12.13       | 30,65          | 57,83         |
| 12.13 - 17.32      | 26,03          | 83,86         |
| 17.32 - 24.74      | 16,14          | 100           |

Além disso, verificou-se que o diâmetro máximo foi de  $19,5 \mu m$ , o diâmetro médio foi de  $5,03 \mu m$  e o  $D_{10}$  foi de  $6,57 \mu m$ .

#### 4.4.4 Resultados agrupados

A Figura 25 agrupa os resultados descritos nos itens acima. Nela é possível ver lado a lado as mudanças no tamanho das partículas na água em cada etapa: água bruta, floculação e sedimentação.

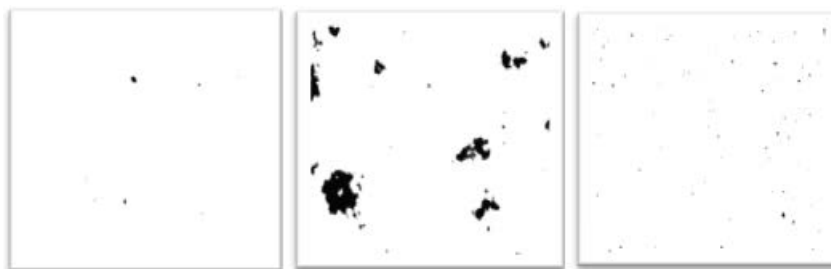


Figura 25. Imagens da água bruta, da água após a floculação e da água após a sedimentação

A Tabela 11 reúne os resultados quantitativos fornecidos pelo microscópio.

Tabela 11. Resultados quantitativos da análise das imagens das amostras

| Característica   | Água bruta | Floculação | Decantação |
|------------------|------------|------------|------------|
| $D_{med}(\mu m)$ | 6,68       | 2,65       | 5,03       |
| $D_{máx}(\mu m)$ | 27,34      | 180,35     | 19,5       |
| $D_{10}(\mu m)$  | 16,76      | 61,74      | 6,57       |

O índice  $D_{10}$  é um bom indicador do tamanho das partículas das amostras, pois ele mede o tamanho no qual 90% das partículas são maiores que ele. Assim, é possível se ter uma noção de grande parte do tamanho das partículas e excluir os 10% em que é possível ter partículas que interferem no resultado do tamanho médio das partículas. Dessa forma, ao analisar o  $D_{10}$  de cada etapa é possível concluir que o resultado é satisfatório, pois ele aumenta na floculação e abaixa na decantação. O resultado da água bruta carrega a incerteza de que as partículas estão suspensas e, por isso, é necessário a adição do coagulante para desestabilizar tais partículas.

#### 4.4.5 Análise do tamanho das partículas usando outras dosagens

As figuras Figura 26 e Figura 27 mostram as partículas da água após a floculação com a dosagem de 60 e 100 ppm respectivamente. É possível verificar que houve um aumento no tamanho das partículas, mas foi pequeno comparativamente ao aumento obtido com a dosagem de 80 ppm. Por isso, é possível concluir que houve, de fato, uma melhora nos parâmetros de qualidade da água, porém tal aumento no tamanho dos flocos não foi significativo para um aumento no índice de floculação, de tal forma que a sensibilidade do aparelho não conseguiu verificar uma melhora no índice.

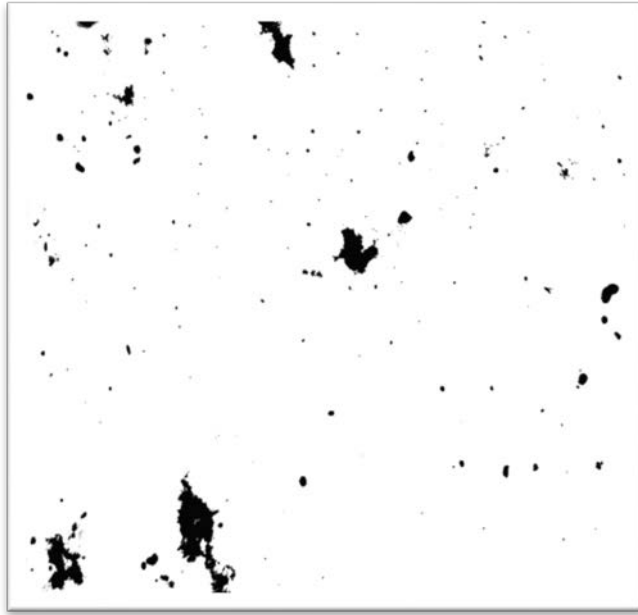


Figura 26. Imagem de parte de uma gota da água após a floculação usando a dosagem de 60 ppm obtida com o microscópio



Figura 27. Imagem de parte de uma gota da água após a floculação usando a dosagem de 100 ppm obtida com o microscópio

A Tabela 12 reúne os resultados do tamanho das partículas após a aplicação do coagulante em diferentes dosagens. Nela é possível verificar que o tamanho das partículas na dosagem de 80 ppm é maior que nas outras, sendo que o  $D_{10}$  é quase duas vezes maior na dosagem de 80 ppm. Tal fato mostra que o crescimento das partículas foi maior nessa dosagem, o que explica o fato do índice de floculação não ter um aumento significativo com a dosagem de 60 e 80 ppm.

Tabela 12. Tamanho das partículas após a floculação usando diferentes dosagens

| Floculação               | 60 ppm | 80 ppm | 100 ppm |
|--------------------------|--------|--------|---------|
| $D_{med}(\mu m)$         | 3,78   | 2,65   | 4,36    |
| $D_{m\acute{a}x}(\mu m)$ | 114,83 | 180,35 | 60,34   |
| $D_{10}(\mu m)$          | 36,32  | 61,74  | 24      |

## 5 Conclusões

Com os experimentos realizados foi possível verificar o aumento do índice de floculação para a dosagem ótima, mostrando que o equipamento de monitoramento contínuo da floculação pode ser utilizado de forma satisfatória em uma estação de tratamento de água, que precisa de uma resposta rápida de acordo com a mudança das características da água bruta. Tal necessidade advém do fato de que há muitos fatores que influenciam na qualidade dessa água. O equipamento utilizado se mostra mais barato do que os outros tipos de equipamentos de monitoramento e, portanto, é útil em reduzir os custos no tratamento de água.

O resultado obtido pela análise das imagens das amostras de água também mostram que ocorreu a aglomeração de partículas usando a dosagem ótima, devido ao fato de que os flocos aumentaram de tamanho durante a floculação e que não havia tantos flocos na água após a decantação. Os flocos que sobraram poderiam ser retirados usando um filtro

O gradiente utilizado teve que ser ajustado empiricamente para um valor que causasse a floculação, pois os encontrados na literatura não faziam referência ao coagulante usado, visto que o uso de polímeros como agentes coagulantes primários não é muito desenvolvido. Normalmente, eles são utilizados como auxiliares do tratamento de água usando sais. Além disso, não foi usado um polímero aniônico, o qual melhoraria o rendimento e a velocidade da floculação no tratamento.

Outro fator a ser analisado em estudos futuros é a variação do pH ao usar polímeros catiônicos como coagulantes. Na literatura é visto que eles possuem a propriedade de não alterar o pH significativamente, mas foi observado um grande aumento da acidez, mesmo com a solução tamponada. Essa redução de pH pode ter prejudicado os resultados da floculação, que mesmo com tal fato se mostrou satisfatória.

## 6 Referências

- Argamon, Y. (1971). Pilot Studies of Flocculation. *J. AWWA*.
- Bolto, B. (1995). Soluble polymers in water-purification. *Prog. Polym. Sci*, 987-1041.
- Bratby, J. (1980). Coagulation and Flocculation. *Croydon GB*.
- Cruz, D. (2017). *APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE FLOCULAÇÃO NO CONTROLE DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO NA ÁGUA BRUTA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO DCTA*.
- Di Bernardo, L., & Dantas, A. (2005). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. São Carlos: RiMa.
- Gregory, J., & Nelson, D. (1986). Monitoring of aggregates in flowing suspensions. *Colloids and Surfaces*, 175-188.
- Hopkins, D., & Ducoste, J. (2003). Characterizing flocculation under heterogeneous turbulence. *J Colloid Interface Sci*, 184-194.
- Libânio, M. (2010). *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. Campinas, SP: Átomo.
- Ramphal, S., & Sibiyá, S. (2014). Optimization of Time Requirement for Rapid Mixing During Coagulation Using a Photometric Dispersion Analyzer. *Procedia Engineering*, 1401-1410.
- Richter, C. (2015). *Água: Métodos e tecnologia de tratamento*. São Paulo, SP: Blucher.
- Seta. (2019). *Manual Técnico Acquapol*. Estância Velha. Fonte: [www.setaonline.com](http://www.setaonline.com).
- Stempniak, A. e. (2007). *Avaliação da transformação da paisagem na bacia do Ribeirão Vidoca, São José dos Campos, São Paulo*. Taubaté: Ambi-Água.
- Sun, S. e. (2016). Comparison of epichlorohydrin–dimethylamine with other cationic organic polymers as coagulation aids of polyferric chloride in coagulationultrafiltration process. *Journal of Hazardous Materials* 307, 108-118.
- Tambo, N., & Watanabe, Y. (1979). Physical characteristics of flocs - II Strenght of Flocs. *Water Res*, 13.
- Xiao, F., Huang, J.-C., Zhang, B.-j., & Cui, C.-w. (2009). Effects of low temperature on coagulation kinetics and floc surface morphology using alum. *Desalination*, 201-213.
- Yukselen, M., & Gregory, J. (2004). The reversibility of flock breakage. *International Journal of Mineral Processing*, 251-259.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

|  |  |   |   |
|--|--|---|---|
| 1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO<br><p style="text-align: center;">TC</p>   | 2. DATA<br><p style="text-align: center;">27 de novembro de 2019</p> | 3. REGISTRO N°<br><p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-143/2019</p> | 4. N° DE PÁGINAS<br><p style="text-align: center;">55</p> |
| 5. TÍTULO E SUBTÍTULO:<br><br>Aplicação de equipamento de monitoramento contínuo da floculação no tratamento da água bruta da estação de tratamento de água do DCTA com polímero catiônico natural.  |  |   |   |
| 6. AUTOR(ES):<br><br><b>João Paulo Cassemiro Marques</b>   |  |   |   |
| 7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):<br><br>Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA  |  |   |   |
| 8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:<br><br>1. Coagulação 2. Floculação 3. Tratamento de água 4. Engenharia sanitária.  |  |   |   |
| 9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:<br><br>Coagulação química; Floculação; Tratamento de água; Polímeros; Engenharia sanitária.  |  |   |   |
| 10. APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;"><input checked="" type="checkbox"/> Nacional      ( ) Internacional</span><br><br>ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil. Orientado: Ten Cel Eng Márcio Antonio da Silva Pimentel Ph.D. Publicado em 2019.   |  |   |   |
| 11. RESUMO:<br><br>O tratamento da água bruta é muito importante para possibilitar o devido uso da água pela população. Como a qualidade da água que chega em uma estação de tratamento de água não é sempre a mesma, é necessário que haja uma mudança dos parâmetros usados para tratar a água, visando otimizar sua eficiência e reduzir custos. Um método de se analisar a necessidade de tais mudanças é o uso do Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação, o qual foi usado no presente trabalho. Seu funcionamento foi verificado usando como coagulante um polímero orgânico com carga catiônica, para que sua eficiência também pudesse ser verificada. A água bruta analisada foi retirada da Estação de Tratamento de Água do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Foram feitos vários ensaios <i>jar test</i> para verificar qual a dosagem ótima do coagulante para obter a melhor eficiência do tratamento da água e em seguida analisou-se como variava o índice de floculação da amostra, associando a variação do índice de floculação com a melhora da qualidade da água. |  |   |   |
| 12. GRAU DE SIGILO:<br><br><p style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO      ( ) RESERVADO      ( ) SECRETO</p>  |  |   |   |