# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



## Dafne de Brito Cruz

# APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE FLOCULAÇÃO NO CONTROLE DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO NA ÁGUA BRUTA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO DCTA

Trabalho de Graduação 2017

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

# Dafne de Brito Cruz

# APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE FLOCULAÇÃO NO CONTROLE DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO NA ÁGUA BRUTA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO DCTA

#### Orientador

(Prof. PhD Ten Cel Eng) Marcio Antônio da Silva Pimentel (ITA)

# ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

#### Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) Divisão de Informação e Documentação

CRUZ, Dafne de Brito

Aplicação do índice de floculação no controle da dosagem de sulfato de alumínio na água bruta da Estação de Tratamento de Água do DCTA / Dafne de Brito Cruz.

São José dos Campos, 2017.

67£

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017. Orientador: Prof. PhD Ten Cel Eng Márcio Antônio da Silva Pimentel.

 Floculação. 2. Tratamento de água. 3. Monitoramento de saúde estrutural. 4. CTA (São José dos Campos).
 Engenharia sanitária. II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. III. Aplicação do índice de floculação no controle da dosagem de sulfato de alumínio na água bruta da Estação de Tratamento de Água do DCTA.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CRUZ, Dafne de Brito. Aplicação do índice de floculação no controle da dosagem de sulfato de alumínio na água bruta da Estação de Tratamento de Água do DCTA. 2017. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

#### CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Dafne de Brito Cruz

TÍTULO DO TRABALHO: Aplicação do indice de floculação no controle da dosagem de sulfato

de alumínio na água bruta da Estação de Tratamento de Água do DCTA

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2017

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. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização da autora.

Dafre de Brito Criz

Dafre de Brito Criz

constita Rebetto Merioko 448 BI 2 A

Avenida Jornalista Roberto Marinho, 448 Bl 2 Ap 408 24451-045, São Gonçalo - RJ

# APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE FLOCULAÇÃO NO CONTROLE DA DOSAGEM DE SULFATO DE ALUMÍNIO NA ÁGUA BRUTA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO DCTA

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Dafne de Brito Cruz

Autor

(Prof. PhD Ten Cel Eng) Marcio Antônio da Silva Pimentel (ITA)

Orientador

(Prof. Dr) Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 21 de novembro de 2017

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que fez por mim durante esses seis anos, principalmente pela força e por ter colocado pessoas no meu caminho que me ajudaram chegar até aqui.

A meus pais e minha irmã, por acreditarem em mim, pelo apoio incondicional e por serem o maior motivo de eu ter decidido continuar.

À Clarinha e à Isabella, pela amizade a todo momento e por terem aturado meu humor e minhas histórias durante todo esse percurso.

Ao professor Rodrigo Villard, que acreditou em mim e me deu a oportunidade de estudar para chegar ao ITA.

À Ju, pelo apoio que me deu e pelo cuidado que tinha por mim naqueles difíceis meses.

No ITA, agradeço às meninas da 16 por todas as aventuras que vivemos. O ITA não seria o mesmo sem vocês. Agradeço principalmente à Duda, por ter sido a melhor companheira de quarto e por ter me salvado da primeira fase ruim que vivi aqui, e à Sarah, por ter pacientemente ouvido infinitas lamentações.

Ao Talles, pela amizade, pelas conversas filosóficas, por entender minha sensibilidade e por todos os momentos divertidos que vivemos. E aos meninos do 112, por terem auxiliado na minha sobrevivência ao FUND.

À Civil 16, pois passamos muitos momentos difíceis juntos e não dá para esquecer quem estava no mesmo barco nesses momentos. Agradeço sobretudo à Jéssica e ao Michel, por terem me salvado no pior momento que vivi e pelos bons e nem tão bons momentos compartilhados.

Agradeço também ao meu namorado Matheus, por ter sido o meu porto seguro nesses últimos meses, por aguentar meus choros, minhas conversas sobre o TG e as idas à ETA.

Agradeço ao Pi, por todos os conselhos que me deu durantes esses anos e à Nazareth por ter sido o colo de mãe que eu tinha aqui no ITA. Agradeço à Ana pelos conhecimentos passados para que esse trabalho pudesse ser realizado e por fim, agradeço ao meu orientador Márcio pela dedicação, por estar sempre disponível e pelo apoio à realização desse trabalho.

"Não se morre uma vez, afinal de contas, para acabar. Morre-se todos os dias, a cada instante de cada dia. A criança que eu era está morta no adulto que sou, aquele que eu era ontem está morto hoje, ou se sobrevivem em mim é apenas na medida em que lhes sobrevivo..."

(André Comte-Sponville)

## Resumo

O monitoramento da qualidade da água em processo de tratamento é importante para garantir pronta reposta quando há variações das características da água bruta. Esta análise pode ser feita atráves do Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF), utilizado nesse trabalho como alternativa aos aparelhos usuais, visando testar sua trabalhabilidade com água bruta, além de avaliar o uso do índice de floculação como dosador do coagulante sulfato de alumínio.

Desta forma, submeteu-se a água bruta da Estação de Tratamento de Água do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial a ensaios Jar Test para a avaliação de sua qualidade durante os processos de coagulação e floculação. O aparelho de testes foi conectado a um EMCF, por onde se acompanhava a evolução do índice de floculação no tempo.

Os resultados apontam para a importância da continuidade de testes que possam validar a hipótese de que o índice de floculação atinge maior patamar quanto melhor a dosagem de coagulante utilizada, isto é, a que causa maior remoção de turbidez à amostra. As curvas encontradas estão de acordo com as curvas de referência da literatura e a dosagem ótima encontrada no ensaio Jar Test de fato apresentou maior patamar no tempo de análise.

O controle da temperatura e o ajuste do gradiente de velocidade são adaptações propostas para um acompanhamento dos dados mais preciso, a fim de que se possa confirmar a hipótese e validar o uso do índice dessa maneira.

## **Abstract**

The water quality monitoring during treatment process is important to ensure prompt response when raw water characteristics change. This analysis can be made with a Continuous Flocculation Monitoring Equipment (EMCF), used in this work replacing usual devices, aiming to test its efficiency with raw water, besides assessing the use of flocculation index to dosage the aluminium sulphate coagulant.

Hence, the raw water from DCTA's Water Treatment Plant was submitted to Jar Tests to evaluate its quality during coagulation and flocculation processes. The test device was connected to an EMCF, in which was studied the flocculation index during time.

The results underline the importance to proceed with the tests to prove the hipotesis that the flocculation index achieves the highest level when the best coagulant dosage is applied, in other words, it happens when the sample has more turbity removal. During the experiment, the curves are similar to the teorical ones and the optimum dosage that was found in the Jar Tests had the highest level during analisis time.

The temperature control and speed gradient adjustment are future proposals for more accurate data in order to validate the hipotesis and the correct use of the flocculation index.

# Lista de Figuras

Figura 1 - Carga ao redor de uma partícula coloidal (RICHTER, 2009)28
Figura 2 - Potencial nas proximidades de uma superfície coloidal. Adaptado de
(FITZPATRICK; GREGORY, 2003)
Figura 3 - Diagrama de energia potencial. Adaptado de (FITZPATRICK; GREGORY, 2003).
Figura 4 - Diagrama das espécies solúveis de alumínio em equilíbrio com o hidróxido de
alumínio, em função do pH. Adaptado de (FITZPATRICK; GREGORY, 2003)31
Figura 5 - Reações de coagulação com sulfato de alumínio. Adaptado de (AMIRTHARAJAH;
MILLS, 1982)32
Figura 6 - Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio para remoção de turbidez
(AMIRTHARAJAH; MILLS, 1982)33
Figura 7 - Curva de calibração de um aparelho padrão Phips&Bird (RICHTER, 2009)38
Figura 8 - Aparelho Jar Test. 38
Figura 9 - Monitor de Corrente de Fluxo (CHEMTRAC SYSTEMS, [201-?])40
Figura 10 - Zetâmetro Zeta-Meter 4.0 (ZETA-METER)
Figura 11 - Funcionamento do PDA. Adaptado de (HUNT, 1993)
Figura 12 - Curva do índice de floculação no tempo. Adaptado de (GREGORY, 1999)43
Figura 13 - Mudanças na curva IF x tempo com diferentes doses de coagulante. Adaptado de
(GREGORY, 1999)
Figura 14 - Índice de floculação em função do tempo em uma solução de caulinita 30 g/L com
adição de coagulante polímérico, com taxa de agitação de 120 rpm. Adaptado de (GREGORY,
1999)45

Figura 15 - Dados do índice de floculação com o tempo, indicando as etapas de floculação	e
sedimentação. Adaptado de (STAAKS et al., 2011)	5
Figura 16 - Bacia do Ribeirão Vidoca. (STEMPNIAK; TEIXEIRA BATISTA; MORELL	I,
2007)4	8
Figura 17 - Parte baixa da bacia do Ribeirão Vidoca (STEMPNIAK; TEIXEIRA BATISTA	١;
MORELLI, 2007)	8
Figura 18 - Espectrofotômetro DR 6000 Benchtop da Hach para medição de cor aparente	e
absorbância	9
Figura 19 - Turbidímetro 2100Q da Hach.	0
Figura 20 - pHmetro QX 1500 Plus da Qualxtron	0
Figura 21 - Esquema da realização dos ensaios (BARTIKO, 2014)	1
Figura 22 - Módulo Sensor (RUSSO, 2017).	3
Figura 23 - Redução de pH x Dosagem com o ensaio Jar Test, ph inicial 7,55	7
Figura 24 - Remoção de cor x Dosagem com o ensaio Jar Test, pH inicial 7,55	7
Figura 25 - Remoção de turbidez x Dosagem com o ensaio Jar Test, pH inicial 7,55	8
Figura 26 - Redução de absorbância x Dosagem com o ensaio Jar Test, pH incial 7,55	8
Figura 27 - Início do Jar Test	9
Figura 28 - Formação de flocos após um tempo de ensaio	9
Figura 29 - Água bruta antes da realização do ensaio Jar Test	9
Figura 30 - Água bruta após ensaio Jar Test e 15 minutos de sedimentação	9
Figura 31 - IF x tempo, pH inicial 7,56	0
Figura 32 - IF x tempo, pH incial 7,5, desconsiderando o pico inicial	1

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Lista de equipamentos e materiais.	47
Γabela 2 - Lista de reagentes.	47
Tabela 3 - Parâmetros de agitação no ensaio Jar Test.	52
Γabela 4 - Água bruta: medições iniciais.	55
Tabela 5 - Resultados dos ensaios Jar Test para pH inicial 7,5.	56
Tabela 6 - Variações relativas dos parâmetros em cada teste e na média das réplicas.	56
Tabela 7 – Cálculos de <i>IF</i> e diferenca patamar para cada dosagem.	61

# Lista de Abreviaturas e Siglas

ETA Estação de Tratamento de Água

a.C Antes de Cristo

d.C Depois de Cristo

DCTA Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial

ITA Instituto Tecnológico de Aeronáutica

OMS Organização Mundial da Saúde

UJT Unidade Jackson de Turbidez

UNT Unidade Nefelométrica de Turbidez

pH Potencial hidrogeniônico

DLVO Iniciais dos autores da teoria: Deryagin, Landau, Verwey, Overbeek

SCM Streaming Current Monitor

PDA Photometric Dispersion Analyser

EMCF Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação

rpm Rotações por minuto

DC Componente estável do sinal

AC Componente flutuante do sinal

RMS Root mean square – raiz quadrada do valor médio

IF Índice de floculação

Sabesp Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

Unesp Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

EDTA Etilenodiamonotetracético sal dissódico

Alc Alcalinidade

Ac Acidez

IF1 Índice de floculação detectado pelo sensor 1

IF2 Índice de floculação detectado pelo sensor 2

# Lista de Símbolos

 $A_{\lambda}$  absorbância em determinando comprimento de onda

I intensidade de luz transmitida

 $I_0$  intensidade de luz incidente

*OH* – íon hidróxido

*H*<sup>+</sup> íon hidrogênio

E diferença de potencial elétrico

R constante dos gases perfeitos

T temperatura absoluta em K

F constante de Faraday

 $[H^+]_2$  concentração de  $H^+$ da solução em análise

 $[H^+]_1$  concentração de  $H^+$  da solução do eletrodo

 $V_A$  energia de interação de van der Waals

A constante de Hamaker

a raio de partículas esféricas

d distância de separação entre partículas

Ψ potencial de Nernst

 $\Psi_{\delta}$  potencial de Stern

k' parâmetro de Debye-Huckel

x distância ao plano de Stern

ζ potencial zeta

 $V_R$  energia elétrica

e carga do elétron

 $V_T$  energia total de interação da teoria DLVO

U velocidade de uma camada do fluido

Y posição de uma camada do fluido

G gradiente de velocidade

 $\varepsilon$  tensão de cisalhamento no fluido

P potência

V volume

 $N_{ij}$  número de colisões entre as partículas de tamanho i e j

α eficiência de colisão

 $\beta(i,j)$  frequência de colisão entre partículas de tamanho i e j

 $n_i$  número de partículas de tamanho i por unidade de volume

 $n_i$  número de partículas de tamanho j por unidade de volume

 $n_l$  número de partículas de tamanho l por unidade de volume

 $\beta_{Br}$  frequência de colisão na floculação pericinética

μ coeficiente de viscosidade dinâmica

k constante de Boltzmann (=  $1,385 \times 10^{-23}$  /.  $K^{-1}$ )

T temperatura absoluta

 $N_t$  número de partículas no tempo t

 $d_1$  diâmetro da partícula 1

diâmetro da partícula 2

 $t_1$  tempo para a partícula 2 chegar a  $N_t$ 

 $t_2$  tempo para a partícula 2 chegar a  $N_t$ 

 $\beta_{cis}$  frequência de colisão na floculação ortocinética

 $V_i$  volume de partículas de tamanho i

 $\varphi$  fração de volume da fase em suspensão

 $R_{i,j}$  raio de colisão entre duas partículas i e j

 $d_i$  diâmetro da partícula i

diâmetro da partícula j

 $N_i$  número de partículas de tamanho i

 $N_i$  número de partículas de tamanho j

 $v_i$  velocidade de sedimentação da partícula i

 $v_i$  velocidade de sedimentação da partícula j

 $K_A$  coeficiente de agregação

 $K_B$  coeficiente de quebra

m número de câmaras de floculação

t tempo

 $d_{m\acute{a}x}$  diâmetro máximo

c constante empírica

n constante empírica

S fator de desagregação de flocos

Re número de Reynolds

v velocidade da partícula

M mobilidade eletroforética

D constante dielétrica da água

L comprimento do caminho ótico

 $A_{ef}$  área efetiva da seção transversal do feixe de luz

 $N_{\nu}$  número de partículas por unidade de volume

 $C_d$  área da seção transversal de dispersão da partícula

*IF*<sub>0</sub> índice de floculação inicial

b patamar do índice de floculação

 $t_{inf}$  tempo para atingir o ponto de inflexão da curva IF x tempo

s inclinação da curva IF x tempo no ponto de inflexão

 $HCO_3^-$  fon bicarbonato

 $CO_3^{2-}$  íon carbonato

 $H_2CO_3$  ácido carbônico

*K<sub>b</sub>* constante de equilíbrio de dissociação do ácido carbônico

 $K_c$  constante de equilibro de dissociação do íon bicarbonato

 $pK_c$  indicação da fórmula matemática  $-\log(K_c)$ 

 $Al_2(SO_4)_3$  sulfato de alumínio

 $Al_2O_3$  óxido de alumínio

 $y_t^*$  estimativa de IF no tempo t

 $y_t$  IF no tempo t

α parâmetro de ajuste do método exponencial

*IF* IF médio

*IF*<sub>i</sub> valor de IF em um tempo i

tempo<sub>i</sub> tempo qualquer de aquisição de dado de IF

# Sumário

1 IN	ГRODUÇÃО	21
1.1	Motivação	21
1.2	Objetivo	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos	22
1.3	Escopo	22
2 RE	VISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Parâmetros de caracterização da água	24
2.1.1	Parâmetros físicos	24
2.1.2	Parâmetros químicos	25
2.2	Coagulação	27
2.2.1	Definição	27
2.2.2	Estabilidade coloidal - teoria DLVO	27
2.2.3	Mecanismos de coagulação	30
2.2.4	Coagulação com sulfato de alumínio	31
2.3	Floculação	33
2.3.1	Definição	33
2.3.2	Taxa de agregação entre partículas	34
2.3.3	Cinética de floculação	36
2.3.4	Estabilidade dos flocos	37
2.4	Processos de controle	37
2.4.1	Jar test	38
2.4.2	Streaming Current Monitor (SCM)	39
2.4.3	Zetâmetro	40
2.4.4	Técnicas de monitoramento contínuo	41
3 ME	ETODOLOGIA	47
3.1	Materiais	47
3.2	Água de estudo	48
3.3	Caracterização da água	48
3.3.1	Cor	49
3.3.2	Absorbância	49
3.3.3	Turbidez	49

3	.3.4	pH	49
3	.3.5	Dureza	50
3	.3.6	Alcalinidade	50
3.4		Determinação da dosagem ótima	50
3.5		Aquisição dos dados de IF	52
3.6		Tratamento dos dados de IF	53
4	RE	SULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1		Caraterização da água	55
4.2		Determinação da dosagem ótima	55
4.3		Tratamento dos dados de IF	60
5	CO	NCLUSÕES	63
5.1		Sugestões para trabalhos futuros	63
6	RE	FERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

A coagulação e a floculação são duas etapas essenciais no funcionamento de uma Estação de Tratamento de Água por ciclo completo, sobretudo para o funcionamento das etapas posteriores do processo de tratamento. Nessa área de estudo, a coagulação pode ser definida pela desestabilização de partículas coloidais através do uso de um reagente químico, o coagulante, e do processo físico de agitação. A floculação consiste na aglomeração dessas partículas desestabilizadas em flocos, com agitação da amostra e podendo também ser facilitada por um agente floculante.

Desde 1500 a.C., os princípios da coagulação já eram utilizados pelos egípcios, cujas técnicas foram gravadas nas tumbas dos faraós Amenófis II e Ramsés II (ENZLER, [entre 2005 e 2017]). No entanto, foi no século XX que autores como Smoluchowski, Camp, Hudson, Amirtharajah, Hahn e Tampo intensificaram os estudos desses processos, descrevendo sobretudo a ação dos coagulantes nos colóides, a cinética da desestabilização e aglomeração das partículas e fatores intervenientes, atualmente elementos chave dos sistemas de tratamento de água.

Nesse contexto, a definição da dosagem de coagulante é um dos parâmetros de maior importância para a eficiência do tratamento da água, assim como para a economia da ETA, pois uma dosagem menor que a necessária prejudica o processo de coagulação, e uma dosagem maior, além de afetar o processo, causa desperdício de produtos químicos.

A escolha do sulfato de alumínio como coagulante para a realização desse trabalho justifica-se pela sua larga aplicação desde o início do século XX para a remoção de impurezas da água, visto que sais de metais hidrolisados reduzem a repulsão elétrica entre as partículas de colóides, desestabilizando-os. Ademais, desde a Antiguidade usa-se o sulfato de alumínio para a purificação da água, como mencionado por Plínio (23 d.C. – 79 d.C.) (DUAN; GREGORY, 2003).

As Estações de Tratamento de Água usam em geral aparelhos como o Streaming Current Monitor ou zetâmetro para o controle de dosagem de coagulante, em que através da medida da corrente de fluxo ou do potencial zeta, estima-se o ponto em que há neutralização de cargas e consequentemente, a dosagem ótima de coagulante. No entanto, o alto custo de aquisição desses aparelhos e o fato dos parâmetros medidos não representarem perfeitamente a ocorrência ótima da coagulação em todos os casos estimula a busca por uma alternativa viável e mais econômica para a determinação dessa dosagem. O Jar Test é um procedimento utilizado de baixo custo,

entretanto é trabalhoso e tem longa resposta comparado aos aparelhos anteriores. Um processo de controle que possa avaliar a ocorrência da floculação continuamente é interessante para garantir pronta resposta em ETAs, cuja qualidade da água bruta apresente grandes variações.

As bases do monitoramento contínuo da floculação foram estabelecidas por Gregory e Nelson (1984) ao mostrar que flutuações na transmissão de luz através de uma dispersão em fluxo podem dar informações sobre a formação de flocos. Em vista disto, este trabalho visa estudar o comportamento do índice de floculação, medida adimensional obtida em função de parâmetros ópticos de uma amostra em fluxo pela qual passa um feixe de luz, para auxílio à determinação da dosagem ótima de coagulação do sulfato de alumínio em água bruta.

## 1.2 Objetivo

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é checar a correlação entre o comportamento do índice de floculação no tempo e a dosagem ótima obtida através de Jar Test na água bruta da Estação de Tratamento de Água do DCTA, visando investigar a viabilidade de uso do índice de floculação como dosador do coagulante sulfato de alumínio.

#### 1.2.2 Objetivos específicos

Outros objetivos relacionados a esse trabalho são:

- Caracterização preliminar da água bruta da Estação de Tratamento de Água do DCTA.
- Checar a trabalhabilidade do Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação na aplicação com água bruta.

### 1.3 Escopo

O plano de trabalho prevê inicialmente a realização de ensaios no laboratório de saneamento da divisão de Engenharia Civil do ITA. Esses ensaios contemplam a caracterização da água bruta captada na Estação de Tratamento de Água do DCTA, na qual serão analisados os seguintes parâmetros: pH, turbidez, alcalinidade, dureza, cor e absorbância. Todos os testes serão realizados com equipamentos do próprio laboratório, a saber: pHmetro de bancada QX 1500 Plus da Qualxtron, turbidímetro 2100Q da Hach e espectrofotômetro DR 6000 Benchtop da Hach.

A amostra de água será então submetida a ensaios Jar Test, buscando-se encontrar a dosagem ótima de coagulante sulfato de alumínio, através da comparação da turbidez da amostra antes e após o ensaio.

O índice de floculação será medido simultaneamente à realização de cada Jar Test, através de um sensor conectado à água em processo de coagulação/floculação. Através da plataforma Arduino e do software Meguno Pro, a variação do índice de floculação com o tempo será registrada, dado que será utilizado para a análise dos resultados.

Na perspectiva escrita, o presente trabalho será estruturado da seguinte maneira:

#### Capítulo 1 - Introdução

Neste tópico serão apresentados a motivação do estudo, sua importância e objetivo, além de uma breve descrição das atividades realizadas e a definição do escopo do trabalho.

#### Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Este capítulo tratará de uma breve revisão da literatura relacionada ao assunto do trabalho, dividida em parâmetros de caracterização da água, coagulação, floculação e processos de controle.

#### Capítulo 3 – Metodologia

No capítulo 3 será descrita a metodologia adotada para os ensaios em laboratório.

#### Capítulo 4 – Resultados e Discussões

Serão apresentados neste capítulo as medições de caracterização da água bruta, os resultados dos ensaios Jar Test e as curvas de índice de floculação com o tempo, assim como discussões a respeito desses resultados.

#### Capítulo 5 – Conclusões

O capítulo 5 apresentará as conclusões a respeito da relação do índice de floculação com as dosagens dos ensaios Jar Test.

#### Capítulo 6 – Referências Bibliográficas

Apresentará a relação das fontes consultadas para a realização do trabalho.

# 2 Revisão Bibliográfica

## 2.1 Parâmetros de caracterização da água

#### 2.1.1 Parâmetros físicos

#### 2.1.1.1 Cor

A cor da água reflete sua capacidade em absorver certas radiações do espectro visível e é causada por material coloidal ou partículas em suspensão presentes na mesma. Define-se cor aparente pela cor de amostras líquidas com partículas em suspensão. Já a cor real mede a cor de uma amostra somente com substâncias dissolvidas em estado coloidal (RICHTER, 2009). A cor real ou verdadeira é uma medida indireta da quantidade de sólidos dissolvidos totais presentes na água.

A cor é geralmente um indicador da presença de certos materiais na água: o ferro, por exemplo, pode dar uma coloração avermelhada e o ácido húmico, matéria orgânica proveniente da degradação de vegetais, dá tonalidade marrom-amarelada. Águas de cor levemente esverdeada podem ter alcalinidade e dureza elevadas. De uma forma geral, a cor de uma água pode indicar o seu grau de poluição, visto que geralmente, águas de cor elevada apresentam alta demanda química ou bioquímica de oxigênio.

A unidade de cor é definida pela cor produzida por 1,0 mg de cloroplatinato de potássio e 0,5 mg de cloreto de cobalto dissolvidos em 1 L de água. Essa unidade é representada por graus Hazen (°H) ou mg/L de Pt-Co.

A cor afeta esteticamente a qualidade de uma água, portanto, a Organização Mundial da Saúde (OMS) estabelece para padrão de potabilidade que o limite máximo recomendado é de 5 unidades de cor, sendo permitido no máximo 15 °H.

#### **2.1.1.2** Turbidez

A turbidez é um parâmetro físico que define o grau de atenuação que um feixe de luz sofre ao atravessar um fluido, o que é causado pela absorção e espalhamento da luz pelas partículas em suspensão.

A medição de turbidez é feita em uma célula fotoelétrica, onde calcula-se a quantidade de luz dispersa através de uma amostra de água e é expressa em unidades Jackson de turbidez (UJT), ou mais comumente, unidades nefelométricas de turbidez (UNT).

Por ser uma medida indireta da quantidade de sólidos em suspensão, a turbidez é um parâmetro importante no controle de qualidade da água. A OMS recomenda como padrão de potabilidade valor máximo de 1 UNT e valor máximo permissível de 5 UNT.

#### 2.1.1.3 Absorbância

Absorbância é a propriedade da água absorver radiações em certa frequência. Ela pode ser definida por:

$$A_{\lambda} = -\log_{10} \frac{I}{I_0} \tag{1}$$

onde I é a intensidade de luz de comprimento de onda  $\lambda$  transmitida e  $I_0$  é a intensidade de luz incidente.

A medição de absorbância é realizada por meio de um espectrofotômetro. O aparelho faz uma varredura em comprimento de onda para verificar em qual deles a amostra apresenta maior absorbância. Um feixe de luz atravessa uma cubeta contendo o branco, que é o solvente da solução da amostra, analisa a faixa do espectro que há maior absorção e zera-se a medição de absorbância. Um feixe nesse comprimento de onda de maior absorção do branco atravessa a cubeta contendo a solução e por comparação entre a intensidade de luz transmitida pela amostra e a intensidade de luz transmitida pelo branco, calcula-se a absorbância da água analisada.

A comparação com o branco garante que só seja avaliada a absorbância relativa as substâncias diluídas ou em suspensão na água, ao passo que a absorbância do solvente e as perdas por reflexão na cubeta são desconsideradas. No caso de uma água bruta, o solvente pode ser uma amostra de água destilada ou deionizada.

#### 2.1.2 Parâmetros químicos

#### 2.1.2.1 pH

A água tende a se dissociar em íons  $H^+$  e  $OH^-$ :

$$H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^- \tag{2}$$

O pH ou potencial de hidrogênio é uma forma de exprimir a atividade de  $H^+$ , em termos de seu logaritmo negativo. Como em uma solução diluída a atividade pode ser aproximada à concentração, o pH acaba por fornecer a medida da concentração dos íons  $H^+$ . Sua definição é:

$$pH = -\log[H^+] \tag{3}$$

A medição de pH pode ser realizada através de pHmetros ou métodos colorimétricos. Os pHmetros medem a diferença de potencial elétrico entre um eletrodo e a solução em análise. Uma fina membrana de vidro separa uma solução ácida contida dentro do eletrodo, com concentração de  $H^+$  conhecida, e a solução em que se deseja medir o pH. Através da equação de Nernst (eq. 4) e da medição da diferença de potencial elétrico, encontra-se a concentração de  $H^+$  da solução.

$$E = \frac{RT}{F} + \ln\left(\frac{[H^+]_2}{[H^+]_1}\right) \tag{4}$$

onde E é a diferença de potencial elétrico, R é a constante dos gases perfeitos, T a temperatura absoluta em K, F a constante de Faraday,  $[H^+]_2$  é a concentração de  $H^+$ da solução em análise e  $[H^+]_1$  é a concentração de  $H^+$  da solução do eletrodo.

O método colorimétrico consiste em adicionar algumas gotas de indicador que dão uma coloração à água correspondente a uma certa faixa ou valor de pH.

#### 2.1.2.2 Alcalinidade

A alcalinidade de uma água é sua capacidade em neutralizar ácidos e é causada pela presença de carbonatos ( $CO_3^{2-}$ ), bicarbonatos ( $HCO_3^{-}$ ) e hidróxidos ( $OH^{-}$ ) na água. No tratamento de água, está relacionada ao controle de corrosão, redução de dureza e coagulação (RICHTER, 2009).

A medição de alcalinidade pode se dar por titulação com ácido, determinando-se o equivalente de hidrogênio ou através de métodos colorimétricos, em que se conhecendo os principais íons responsáveis pela alcalinidade em cada faixa de pH, são utilizados indicadores que mudam de cor a pHs específicos.

Define-se alcalinidade parcial como a alcalinidade neutralizada por ácido até atingir o pH de 8,3 e alcalinidade total, a alcalinidade neutralizada até o pH de 4,5. A alcalinidade é normalmente expressa em mg/L de  $CaCO_3$ .

#### 2.1.2.3 Dureza

A dureza de uma água é definida como a soma das concentrações dos íons  $Ca^{2+}eMg^{2+}$ , expressa em mg/L de  $CaCO_3$ . A dureza total mede a quantidade dos íons  $Ca^{2+}eMg^{2+}$ , diferenciando-se as parcelas dureza de cálcio e dureza de magnésio. A dureza permanente ou não carbonatada mede a quantidade dos mesmos íons após submeter a água à ebulição durante meia hora e retomando o volume inicial com água destilada. A dureza temporária ou de carbonatos é causada por bicarbonatos de cálcio e magnésio elimináveis por ebulição. É calculada pela diferença entre a dureza total e a dureza permanente.

Os valores máximos recomendado e permissível para padrão de potabilidade pela OMS são de respectivamente, 100 e 500 mg/L de *CaCO*<sub>3</sub>. O método de medição pode ser por titulação, como será descrito na metodologia deste trabalho.

## 2.2 Coagulação

## 2.2.1 Definição

Em tratamento de água, há a necessidade de remoção de partículas de dimensões de 1 nm a 1 μm, os colóides, que não são separados pelos processos físicos usuais, como sedimentação, flotação e os diversos modos de filtração. É necessário então que essas partículas sejam aglomeradas, aumentando seu tamanho, de modo que um processo físico de separação possa ser aplicado. O processo de desestabilização das partículas coloidais para que possam ser agregadas é chamado de coagulação.

Um bom entendimento da estabilidade e interação entre colóides é, portanto, essencial para o estudo da coagulação. As partículas coloidais apresentam em geral carga elétrica superficial negativa, resultado de adsorção de íons, reações químicas na superfície e dissociação de substâncias constituintes do cristal natural (RICHTER, 2009). Essas partículas tendem a se repelir devido a forças elétricas de repulsão entre suas duplas camadas, evitando a agregação desejada no processo de coagulação. Esta é a estabilidade coloidal: a propriedade de se manter disperso em solução. Para desestabilizar um colóide, é necessário interferir nas forças de atração e repulsão que agem sobre ele.

#### 2.2.2 Estabilidade coloidal - teoria DLVO

A primeira teoria quantitativa sobre a estabilidade dos colóides, teoria DLVO, foi desenvolvida por Deryagin e Landau (1941) e Verwey e Overbeek (1948) (FITZPATRICK; GREGORY, 2003). Ela consiste na ação combinada das forças elétricas de repulsão e de atração de van der Waals, da qual resulta a energia total de interação entre partículas em função da distância entre elas. Outras forças como atração estérica, repulsão hidrofóbica e atração das cadeias poliméricas também fazem parte da interação entre colóides, mas não constituem a base dessa teoria.

A energia de interação van der Waals entre duas partículas esféricas de raio a separadas por uma distância d é dada por:

$$V_A = -\frac{Aa}{12d} \tag{5}$$

onde A é a constante de Hamaker, que depende das propriedades da partícula e da água, e d << a. O sinal '-' indica atração, por convenção.

Conforme já dito, os colóides possuem carga superficial negativa, portanto em solução, íons de carga oposta atraem-se eletricamente aos colóides, gerando a camada fixa ou camada de Stern, bem aderida à superfície. Os íons de mesma carga são repelidos formando a camada difusa, uma camada com íons positivos e negativos mantida próxima a superfície devido às forças eletrostáticas. Essas duas camadas formam a dupla camada difusa, que tem predominância de cargas positivas, a fim de deixar o colóide menos negativo. É a repulsão entre as duplas camadas difusas que tendem a repelir os colóides entre si, mantendo-os estáveis. As FigurasFigura 1 e 2 mostram, respectivamente, a superfície coloidal e a variação de potencial ao seu redor.

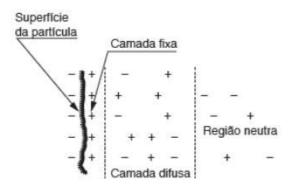


Figura 1 - Carga ao redor de uma partícula coloidal (RICHTER, 2009).

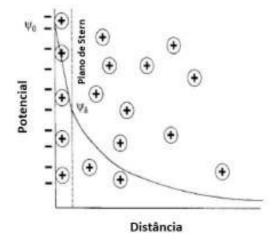


Figura 2 - Potencial nas proximidades de uma superfície coloidal. Adaptado de (FITZPATRICK; GREGORY, 2003).

Na superfície, o potencial  $\Psi_0$  é conhecido como potencial de Nernst. Esse potencial decresce linearmente até o fim da camada de Stern, onde o potencial é  $\Psi_{\delta}$ , denominado potencial de Stern. A partir dessa distância, o potencial decai de acorco com

$$\Psi = \Psi_{\delta} \exp(-k'x) \tag{6}$$

onde x é a distância do plano de Stern e k' é o parâmetro Debye-Huckel, que dá a taxa de decrescimento do potencial com a distância.

Técnicas eletrocinéticas como a microeletroforese permitem investigar partículas carregadas e descobrir o potencial elétrico no plano de cisalhamento entre a partícula e o fluido, conhecido como potencial zeta, ζ. Esse plano de cisalhamento é próximo ao plano de Stern, portanto utiliza-se o potencial zeta no lugar do potencial de Stern, o qual não pode ser medido diretamente.

A energia elétrica gerada pela aproximação de duas partículas esféricas de raio a separadas por uma distância d é dada por:

$$V_R = 2\pi e a \zeta^2 \exp(-k'd), \tag{7}$$

onde e é a carga do elétron.

Dessa forma, a energia total de interação entre duas partículas, segundo a teoria DLVO é (FITZPATRICK; GREGORY, 2003):

$$V_T = 2\pi e a \zeta^2 \exp(-k'd) - \frac{Aa}{12d}.$$
 (8)

A Figura 3 mostra as energias de interação em função da distância de separação.

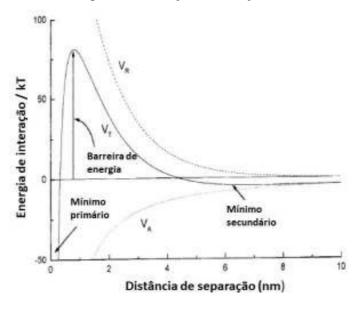


Figura 3 - Diagrama de energia potencial. Adaptado de (FITZPATRICK; GREGORY, 2003).

De acordo com a magnitude das forças de atração e repulsão pode existir uma barreira inicial de energia a ser vencida para a aproximação das partículas e ocorrência da coagulação. Antes do vencimento da barreira de energia o colóide é estável e o processo de coagulação é dificultado. Segundo Fitzpatrick e Gregory (2003), o mínimo primário de energia acontece quando a distância entre as partículas é muito pequena. Se  $d \to 0$ ,  $V_A \to \infty$ , no entanto forças de repulsão de curto alcance fazem com que esse potencial seja finito e as partículas possam ser dispersas em solução. Entretanto, conforme a distância aumenta e o potencial de repulsão

decresce exponencialmente, chega-se a um mínimo secundário de energia, que pode gerar fracos agregados, dada a eliminação da barreira de energia. Essa teoria DLVO explicita a estabilidade dos colóides e as forças de interação preponderantes entre eles, o que auxilia o entendimento dos mecanismos de coagulação. Por exemplo, através dela é possível calcular a concentração crítica de coagulante, a qual elimina a barreira de energia e possibilita a coagulação (FITZPATRICK; GREGORY, 2003).

#### 2.2.3 Mecanismos de coagulação

Dois processos, ainda sob estudos e comprovação experimental, tentam explicar a coagulação: a compressão da dupla camada e reações químicas entre partículas coloidais e coagulantes. Esses processos possam ocorrer tanto individualmente como simultaneamente (RICHTER, 2009).

A compressão da dupla camada consiste na introdução de um eletrólito na solução coloidal que não irá gerar reações de hidrólise ou adsorção. Esse eletrólito aumenta a carga iônica na dupla camada difusa, a qual diminui de volume para manter-se neutra. Isso faz com que as forças de van der Waals superem a repulsão eletrostática, causando então a coagulação por compressão da dupla camada difusa.

Já o processo de reações químicas propiciaria a coagulação através desses mecanimos ou combinações entre eles: adsorção e/ou neutralização de cargas, adsorção-formação de pontes e varredura/arrasto, tendo este último um forte componente físico.

Na adsorção e/ou neutralização de cargas, os cátions do coagulante e espécies hidrolisadas são adsorvidos e neutralizam a carga seuperficial negativa dos colóides, reduzindo a dupla camada difusa, o que diminui as forças elétricas de repulsão, causando sua desestabilização e por consequência, formação de flocos. O mecanismo de neutralização de cargas é o mais indicado no processo de tratamento de água por filtração direta, pois as espécies desestabilizadas ficam retidas no filtro, sem haver necessidade de formação de grandes flocos, o que encurtaria a carreira de filtração.

Por outro lado, a coagulação por arrasto exige um processo de sedimentação. Neste caso, espécies geradas a partir da adição do coagulante, como  $Al(OH)_3$  ou  $Fe(OH)_3$ , precipitam e 'varrem' consigo os colóides. Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), os flocos obtidos nesse mecanismo são maiores e sedimentam mais facilmente que os flocos obtidos no processo de adsorção e/ou neutralização.

E por último, o mecanismo de adsorção-formação de pontes ocorre quando a inserção de um polímero, em geral catiônico, causa adsorção e desestabilização dos colóides, que é

completada por um efeito de ligação de ponte entre as partículas. Devido ao aumento da massa molecular, elas tendem a gerar flocos e precipitar.

#### 2.2.4 Coagulação com sulfato de alumínio

Dado que o tema deste trabalho envolve a coagulação com sulfato de alumínio, será detalhado o processo de coagulação com esse sal. A escolha do sulfato de alumínio como coagulante se justifica por sua larga aplicação no tratamento de água (DUAN; GREGORY, 2003), que se dá pois o íon  $Al^{3+}$ é um cátion bem carregado positivamente, o que ajuda a neutralizar as cargas geralmente negativas das impurezas coloidais da água. Quando se coloca sulfato de alumínio em água, uma série de reações de hidrólise e polimerização começam a ocorrer. Fatores que serão influentes no processo de coagulação são: pH, espécies iônicas presentes na água, concentração e tipo dos colóides, tipo e dose de coagulante e condição de mistura do coagulante com a água.

A Figura 4 mostra o equilíbrio das diversas espécies de alumínio com o  $Al(OH)_3$ , que tem baixa solubilidade em água e logo precipita.

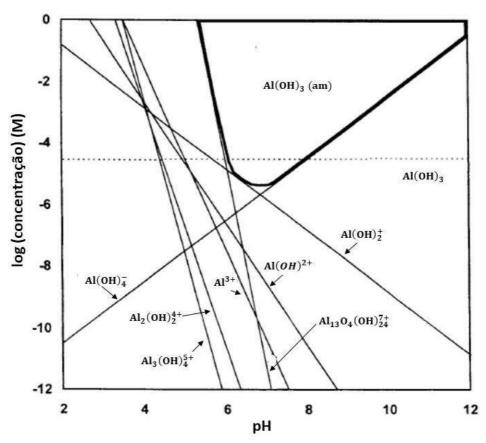


Figura 4 - Diagrama das espécies solúveis de alumínio em equilíbrio com o hidróxido de alumínio, em função do pH. Adaptado de (FITZPATRICK; GREGORY, 2003).

Essas espécies hidrolíticas serão adsorvidas pelos colóides, causando sua desestabilização por neutralização de carga. Essas reações acontecem muito rapidamente: segundo Hahn e Stumm (1968) se completam em cerca de 1 segundo. Em seguida, se forma hidróxido de alumínio que precipita e carrega as partículas causando coagulação por arrasto, que ocorre em um período de 1 a 7 segundos. A Figura 5 mostra um esquema das reações de coagulação com sulfato de alumínio.

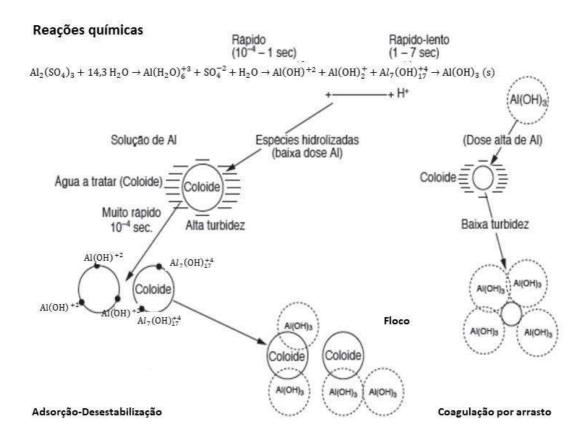


Figura 5 - Reações de coagulação com sulfato de alumínio. Adaptado de (AMIRTHARAJAH; MILLS, 1982).

Um diagrama de coagulação do sulfato de alumínio em função da dosagem de coagulante e do pH (AMIRTHARAJAH; MILLS, 1982) é mostrado na Figura 6.

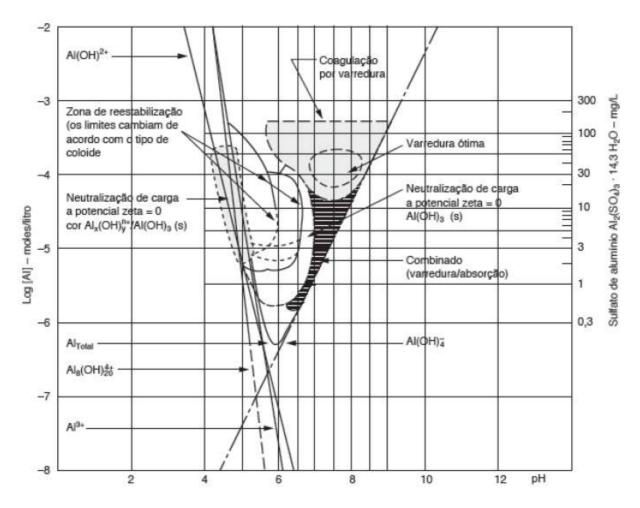


Figura 6 - Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio para remoção de turbidez (AMIRTHARAJAH; MILLS, 1982).

# 2.3 Floculação

#### 2.3.1 Definição

Floculação é a etapa do processo de tratamento de água que sucede a coagulação. Após a desestabilização das partículas coloidais, é necessário aglomerá-las em flocos para que possam ser removidas. Enquanto a coagulação está relacionada à desestabilização dos colóides, a floculação promove a colisão necessária entre essas partículas para a devida agregação ou quebra de flocos.

A agitação mais ou menos intensa da água é o elemento responsável pela ocorrência tanto da coagulação, promovida pela mistura rápida, quanto da floculação, ocasionada pela mistura lenta. Para quantificar a intensidade da mistura, usa-se o conceito de gradiente de velocidade. Ele é definido pelo limite da razão entre a diferença de velocidade entre duas camadas de fluido ( $\Delta U$ ) sobre a distância entre elas ( $\Delta Y$ ), quando essa distância tende a zero, e é geralmente indicado pela letra G:

$$G = \lim_{\Delta Y \to 0} \frac{\Delta U}{\Delta Y} = \frac{dU}{dY}.$$
 (9)

Camp e Stein deduziram a equação do gradiente de velocidade em um fluido em movimento:

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} = \sqrt{\frac{P}{\mu V}},\tag{10}$$

onde  $\varepsilon$  é a tensão de cisalhamento no fluido, P a potência aplicada e V o volume de fluido.

#### 2.3.2 Taxa de agregação entre partículas

A equação a seguir (THOMAS; JUDD; FAWCETT, 1999) representa a taxa de colisões bem-sucedidas entre duas partículas de tamanho i e j, que geram uma nova partícula de tamanho l.

$$N_{ij} = \alpha \beta(i, j) n_i n_j \tag{11}$$

onde  $N_{ij}$  representa o número de colisões entre as partículas de tamanho i e j  $\left(\frac{colisões}{m^3s}\right)$ ;  $\alpha$  a eficiência de colisão;

 $\beta(i, j)$  a frequência de colisão  $(m^3/s)$  e

 $n_i$ ,  $n_j$  o número de partículas de tamanho i e j, respectivamente  $(\frac{partículas}{m^3})$ .

Smoluchowski (1968) elaborou um modelo geral de floculação, assumindo nenhuma quebra de flocos. Segundo ele, a taxa de aumento de partículas de tamanho l, gerada pela colisão de partículas de tamanho i e j, pode ser definida pela equação 12, onde o primeiro termo do lado direito da equação representa o surgimento de partículas l e o segundo termo, a sua perda pela colisão com partículas de outros tamanhos. O fator  $\frac{1}{2}$  antes do primeiro termo do lado direito assegura que uma mesma colisão não seja contada duas vezes

$$\frac{dn_{l}}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i+j=l} \beta(i,j) n_{i} n_{j} - \sum_{i=1}^{\infty} \beta(i,l) n_{i} n_{l}$$
(12)

 $\beta$  é função do mecanismo cinético que causa a floculação. Os três principais mecanismos são: floculação pericinética, floculação ortocinética e sedimentação diferencial.

#### 2.3.2.1 Floculação pericinética

É causada pelo movimento Browniano das partículas do fluido, ocasionado pela energia térmica. Ocorre normalmente quando pelo menos uma das partículas é muito pequena, com

menos de  $1\mu m$  de diâmetro (HAN; LAWLER, 1992). Smoluchowski (1968) deu a frequência de colisão  $\beta$ , baseado nas seguintes hipóteses:  $\alpha$  é igual a um para todas as colisões, todas as partículas são esféricas e de mesmo tamanho, a colisão se dá entre duas partículas, os flocos são esféricos e não há quebra dos mesmos e o movimento do fluido passa por cisalhamento laminar. Esse fator de frequência já inclui a eficiência  $\alpha$  de colisão.

$$\beta_{Br} = \frac{8}{3} \alpha \frac{kT}{\mu},\tag{13}$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade dinâmica;

k é a constante de Boltzmann (=  $1,385 \times 10^{-23}$  J. K<sup>-1</sup>) e

T a temperatura absoluta (K).

Dessa forma, a taxa de agregação de partículas pode ser dada pela equação 14, ao combinar as equações 12 e 13.

$$\frac{dN_t}{dt} = -\frac{4}{3}\alpha \frac{kT}{\mu} N_t^2,\tag{14}$$

onde  $N_t$  é o número de partículas no tempo t.

Para partículas de diferentes diâmetros  $d_1$  e  $d_2$ , Kruit forneceu uma correção para relação de tempo (RICHTER, 2009).  $t_1$  e  $t_2$  são os tempos para cada partícula saindo da mesma concentração inicial chegarem a  $N_t$ .

$$\frac{t1}{t2} = \frac{1}{4} \left( 4 + \left( \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} - \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} \right)^2 \right) \tag{15}$$

### 2.3.2.2 Floculação ortocinética

As colisões são causadas devido ao movimento do fluido. Han e Lawler (1992) indicam que é mais provável de acontecer quando ambas as partículas são maiores que  $1\mu m$  e de tamanho aproximado. Swift e Friedlander (1964) dão a frequência de colisão em função do gradiente de velocidade:

$$\beta_{cis} = \frac{8}{\pi} \frac{dU}{dY} V_i \tag{16}$$

onde  $V_i$  é o volume de partículas de tamanho i.

Definindo  $\varphi$  como a fração de volume da fase em suspensão  $(N_i/V_i)$  e ignorando a quebra de flocos, chega-se à taxa de agregação de partículas na floculação ortocinética.

$$\frac{dN_t}{dt} = -\frac{4}{\pi}G\alpha\varphi N_t \tag{17}$$

Smoluchowski, em 1916, já havia deduzido uma equação que dá a taxa de aglomeração das partículas, dada por:

$$\frac{dN_t}{dt} = -\frac{4}{3}GN_iN_jR_{i,j}^3,$$
 (18)

sendo  $R_{i,j}$  o raio de colisão, definido por  $R_{i,j} = \frac{1}{2}(d_i + d_j)$ , onde  $d_i$  e  $d_j$  são os diâmetros das partículas i e j, consideradas esféricas,  $N_i$  o número de partículas de tamanho i e  $N_j$  o número de partículas de tamanho j. Se as duas partículas são de mesmo tamanho, tem-se:

$$\frac{dN_t}{dt} = -GN_i^2 V_i = -G\varphi N_i,\tag{19}$$

que é equivalente à equação 17, dado que a integração introduzirá uma constante.

#### 2.3.2.3 Sedimentação diferencial

Causada pela diferença de velocidade de sedimentação entre as partículas. Ocorre geralmente na presença de partículas com diferença significativa em tamanho, onde pelo menos uma delas tem diâmetro maior que  $10\mu m$  (HAN; LAWLER, 1992). Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), o número total de encontros por unidade de tempo e volume entre  $n_i$  partículas de diâmetro  $d_i$  por unidade de volume, sedimentando com velocidade  $v_i$  e  $n_j$  partículas de diâmetro  $d_j$  por unidade de volume, sedimentando com velocidade  $v_j$ , em um cilindro de diâmetro  $d_i + d_j$  é:

$$N_{ij} = \frac{\pi}{4} n_i n_j (d_i + d_j)^2 (v_i - v_j)$$
 (20)

Esses três mecanismos de floculação são independentes e os efeitos de cada tipo de colisão podem ser adicionados dentro de uma mesma solução em processo de floculação.

#### 2.3.3 Cinética de floculação

No desenvolvimento desses três mecanismos de floculação, foi considerado que não há quebra de flocos. No entanto, na maioria dos casos, o fluxo do fluido é turbulento e esse fator não pode ser negligenciado. O modelo geral de formação de flocos deve incluir tanto a agregação quanto a quebra. Assim, Argaman (1971) define:

$$\frac{dN_t}{dt} = -K_A N_t G + K_B N_0 G^2, \tag{21}$$

onde  $K_A$  é o coeficiente de agregação (adimensional) e  $K_B$  é o coeficiente de quebra (s), a qual integrando resulta em:

$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{1 + K_B G^2 t}{1 + K_A G t}. (22)$$

Essa equação é válida para um reator. Se  $K_A$  e  $K_B$  mantêm-se constantes em um tanque com m câmaras de floculação em série, pode-se generalizar a equação 22 para:

$$\frac{N_t}{N_0} = \sum_{i=0}^{m-1} \left( 1 + \frac{K_A G t}{m} \right)^i \times \frac{\left( 1 + \frac{K_B G^2 t}{m} \right)}{\left( 1 + \frac{K_A G t}{m} \right)^m}$$
(23)

Segundo Richter (2009), constata-se experimentalmente que com os gradientes de velocidade geralmente aplicados, entre 75 e 30  $s^{-1}$ , o coeficiente de quebra  $K_B$  é da ordem de 1000 vezes menor do que o de agregação, o que simplifica a equação 23 a:

$$\frac{N_t}{N_0} = \left(1 + \frac{K_A G t}{m}\right)^{-m} \tag{24}$$

#### 2.3.4 Estabilidade dos flocos

Conforme as partículas se agregam e os flocos aumentam de tamanho, eles se tornam menos densos e mais suscetíveis à quebra por tensões de cisalhamento hidrodinâmicas. Assim, eles teriam um tamanho máximo, deduzido por alguns pesquisadores como Lagvankar, Kaufman e Tambo (RICHTER, 2009):

$$d_{m\acute{a}x} = \frac{c}{G^n},\tag{25}$$

onde c e n são constantes empíricas. O  $d_{máx}$  é dado em milímetros.

Soucek e Sindelar mostraram em 1967, que a desagregação dos flocos pode ser caracterizada numericamente pela condição de turbulência da água através do fator S. Assim, dependendo das características da água e do coagulante utilizado, é indicado um limite para S de forma que não haja desagregação dos flocos.

$$S = G \times Re^{-0.5},\tag{26}$$

onde Re é o número de Reynolds.

#### 2.4 Processos de controle

Neste tópico serão apresentados cinco métodos de controle do processo de coagulaçãofloculação tendo em vista a obtenção da dosagem ótima de coagulante: Jar test, Streaming Current Monitor (SCM), Zetâmetro, Photometric Dispersion Analyser (PDA) e Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF).

#### **2.4.1** Jar test

O Jar test, ou Teste de Jarros, é um procedimento bem simples e útil para se determinar a dosagem ótima de coagulante e o pH ótimo de coagulação. Nas Estações de Tratamento de Água, ele pode ser utilizado para reproduzir o processo de coagulação-floculação e também nos processos de flotação e filtração direta a fim de buscar as condições operacionais como intensidade, tempo, concentração e sequência dos reagentes que resultem em maior eficiência.

Embora não exista uma padronização e os aparelhos possam ser diferentes entre si, o Jar Test mais comum consiste em um aparelho de bancada composto por uma armação com seis agitadores ligados a um motor elétrico. Esses agitadores são introduzidos em béqueres de 1L ou 2L, com velocidade de rotação variável pelo operador. Essa velocidade de rotação, geralmente em unidades de rotações por minuto (rpm), corresponde a um gradiente de velocidade no fluido, o qual depende da temperatura, do volume do béquer e da presença ou não de estatores. Os estatores têm por objetivo a redução da velocidade de rotação da água durante a floculação (RICHTER, 2009).

Autores como Camp, Bhole e Lay, Hudson e Singley estabeleceram na década de 70 curvas de calibração do gradiente de velocidade em função da velocidade de rotação para diferentes tipos de aparelhos. A Figura 7 mostra, por exemplo, a curva de calibração de Camp, para paletas padrão do tipo Phips&Bird, que tem dimensões específicas e para as quais as curvas são confiáveis, comprovadas por diversos pesquisadores (RICHTER, 2009). No caso deste trabalho, utilizou-se o modelo LDB da marca Nova Ética de Jar Test, como representado na Figura 8.

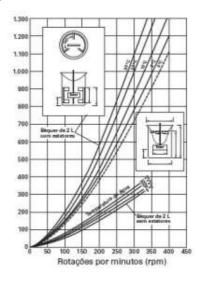


Figura 7 - Curva de calibração de um aparelho padrão Phips&Bird (RICHTER, 2009).



Figura 8 - Aparelho Jar Test.

O uso mais comum do Jar Test é para determinação da dosagem ótima de coagulante. Em cada jarro adiciona-se o coagulante com diferentes concentrações à agua, a amostra é agitada à alta velocidade de rotação por um período de 30 s a 1 min, reproduzindo a etapa de mistura rápida da coagulação e depois, deixa-se flocular a uma rotação menor por um período de 15 min. Após a decantação da amostra, mede-se a turbidez ou cor do sobrenadante de cada béquer e verifica-se qual concentração permitiu maior remoção da turbidez ou cor.

Evidentemente o parâmetro de projeto, o tempo de agitação e o gradiente de velocidade são escolhidos de acordo com o que se pretende analisar. Pode-se, por exemplo, reproduzir os parâmetros da ETA a fim de determinar a sua eficiência ou analisar que valores dos parâmetros levam a aprimoramentos do processo de tratamento.

#### **2.4.2** Streaming Current Monitor (SCM)

O Streaming Current Monitor ou Monitor de Corrente de Fluxo é um aparelho que permite detectar a dosagem ótima de coagulante através da medição de carga. Em geral, a água bruta não tratada possui carga negativa, portanto quando um coagulante catiônico é inserido, produz uma corrente de fluxo positiva, que vai diminuindo à medida que o coagulante reage com as cargas negativas da água. Desse modo, baseando-se no mecanismo de neutralização de cargas, o monitor consegue identificar a dosagem que otimiza o processo de coagulação, isto é, aquela que ao fim do processo gera uma corrente final nula, embora esse valor não seja absoluto, como será explicado posteriormente. De acordo com Lage Filho (2014), embora a corrente de fluxo não seja o potencial zeta, existe uma correlação entre eles que permite obter o mesmo nível de informação para controle de dosagem de coagulante.

Segundo Chemtrac, fabricante do SCM utilizado na ETA do DCTA, a operação do aparelho na medição dessa corrente ocorre da seguinte forma: a água a ser tratada entra em uma câmara de medição, onde ela é movimentada por um pistão. Esse movimento gera uma corrente alternada, definida como corrente de fluxo, devido ao deslocamento das cargas até os eletrodos. Através da medida do valor dessa corrente, ajusta-se uma amplificação do sinal, de modo que uma mudança de dosagem acarrete em alterações no valor da corrente de fluxo. Assim, o valor da corrente de fluxo medido é sempre relativo à amplificação ajustada do sinal primário.

Para que a corrente nula de fato signifique o ponto de neutralização de cargas, utiliza-se uma função do aparelho que pode zerar a leitura da corrente, uma vez que a dosagem ótima tenha sido obtida. Dessa forma, para a calibração inicial do aparelho deve-se conhecer a dosagem ótima e a partir do estabelecimento da referência primária – que não precisa

obrigatoriamente ser zero – verifica-se se é necessário aumentar ou diminuir a dosagem de coagulante na operação de uma ETA (CHEMTRAC SYSTEMS, [201-?]).

Uma vantagem do SCM em relação ao Jar Test é a rápida resposta quando as características da água bruta mudam rapidamente, permitindo ao operador agir para manter a qualidade desejada da água a ser tratada. Comparado ao zetâmetro, o SCM permite medição em fluxo contínuo (LAGE FILHO, 2014).

A fim de se obter um bom funcionamento do aparelho, a vazão e as características da água bruta não devem apresentar grandes variações durante o ajuste do sistema. O ponto de amostragem também deve ser escolhido de forma que o coagulante esteja bem distribuído na água e o monitor consiga detectar mudanças da dosagem, como por exemplo, depois do misturador rápido e antes do tanque de floculação. Além disso, é imprescindível a calibração correta do aparelho, com recalibrações e limpezas periódicas (CHEMTRAC SYSTEMS, [201-?]). A Figura 9 mostra um monitor de corrente de fluxo.

Ainda segundo Gregory (1999), o uso do Streaming Current Monitor só é aplicável quando o mecanismo de neutralização de cargas é o predominante na coagulação. De acordo com Lage Filho (2014), o tempo de resposta do aparelho é retardado para valores de pH e/ou alcalinidade muitos elevados e para pHs acima de 8, o monitor pode não ser sensível a mudanças de dosagem, visto que nessa faixa de pH a varredura é, em geral, o mecanismo predominante de coagulação.

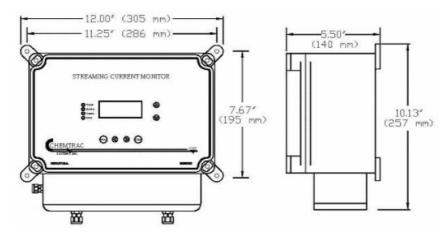


Figura 9 - Monitor de Corrente de Fluxo (CHEMTRAC SYSTEMS, [201-?]).

#### 2.4.3 Zetâmetro

O zetâmetro é um aparelho muito utilizado em ETAs para a automação da dosagem de coagulante, por meio da medição do potencial zeta com o método da microeletroforese.

Constitui-se de uma célula eletroforética onde se aplica a amostra e um microscópio estereoscópio, através do qual observa-se o movimento das partículas submetidas a um campo elétrico. Através da mobilidade eletroforética, definida pela razão da velocidade da partícula pelo valor do campo elétrico, pode chegar-se ao potencial zeta, pela equação de Smoluchowski (RICHTER, 2009):

$$\zeta = \frac{4\pi v}{ED} = 1,256 \times 10^5 \times \frac{\mu M}{D} \ (em \ mV),$$
 (27)

onde v é a velocidade da partícula em  $\mu$ m/s;

 $\mu$  é a viscosidade dinâmica da água em poise;

E o potencial aplicado por unidade de comprimento da célula eletroforética em volt/cm;

M a mobilidade eletroforética em (μm/s)/(V/cm) e

D a constante dielétrica da água.

Com base na teoria DLVO, adota-se como dosagem ideal de coagulante àquela que leva ao potencial zeta nulo, porém como o potencial zeta não corresponde ao potencial na superfície da partícula, nem sempre o valor nulo representa o momento ótimo de ocorrência da coagulação. Entretanto, devido à praticidade de seu uso, o zetâmetro tem sido utilizado no controle do tratamento de água, substituindo o Jar Test, embora apresente alto custo de aquisição. A Figura 10 mostra um zetâmetro.



Figura 10 - Zetâmetro Zeta-Meter 4.0 (ZETA-METER).

#### 2.4.4 Técnicas de monitoramento contínuo

Gregory e Nelson (1984) estabeleceram os fundamentos do monitoramento contínuo da floculação, baseados no princípio das flutuações da turbidez. A turbidez, conforme já definida, é um parâmetro físico que define o grau de atenuação que um feixe de luz sofre ao atravessar um fluido, o que é causado pela absorção e espalhamento da luz pelas partículas em suspensão. Portanto, ao propor um sistema ótico que avalia as variações de turbidez de uma amostra em

fluxo, os autores desenvolveram uma maneira de acompanhar continuamente o processo de floculação, visto que a quantidade e tamanho dos flocos é o que influencia a turbidez da água.

Com base nesse princípio, o aparelho comercial Photometric Dispersion Analyser (PDA 2000) foi criado. Ele é um monitor de suspensões em fluxo, resultado de um trabalho desenvolvido na University College, London. Consiste na passagem de um feixe de luz de comprimento óptico conhecido por uma amostra fluindo em tubo. Uma célula receptora constituída de um fotodetector monitora essa passagem e fornece uma saída elétrica composta por uma componente estável (DC), que representa a intensidade média de luz transmitida e depende da turbidez, e uma componente flutuante (AC), que surge da variação aleatória do número e tamanho de partículas iluminadas pelo feixe de luz (MORUZZI; DE OLIVEIRA; DE JULIO, 2015). A Figura 11 representa um esquema do funcionamento básico de um PDA.

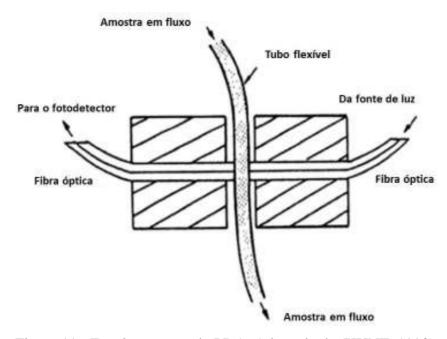


Figura 11 - Funcionamento do PDA. Adaptado de (HUNT, 1993).

A razão do valor médio da raiz quadrada do sinal flutuante (RMS) pela componente estável (DC) é denominada Índice de Floculação (IF).

$$IF = \frac{\sqrt{AC}}{DC} \tag{28}$$

Esse índice é um parâmetro adimensional diretamente relacionado ao estado de agregação das partículas (GREGORY; GUIBAI, 1991; GUIBAI; GREGORY, 1991), que não depende da vazão (GREGORY, 1985) e não é afetado pela contaminação das superfícies óticas (MORUZZI; DE OLIVEIRA; DE JULIO, 2015). Em uma solução heterodispersa, o índice de floculação é dado por:

$$IF = \left(\frac{L}{A_{ef}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum N_{v_i} C_{d_i}^2\right)^{\frac{1}{2}},\tag{29}$$

onde L é o comprimento do caminho ótico,  $A_{ef}$  a área efetiva da seção transversal do feixe de luz,  $N_v$  o número de partículas por unidade de volume e  $C_d$  a área da seção transversal de dispersão da partícula. O índice i engloba todas as partículas, de formatos e tamanhos variados (MORUZZI; DE OLIVEIRA; DE JULIO, 2015).

Segundo Gregory e Hiller, a curva do índice floculação com o tempo pode ser representada como na Figura 12:

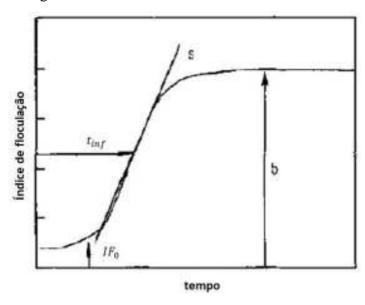


Figura 12 - Curva do índice de floculação no tempo. Adaptado de (GREGORY, 1999).

Nesse gráfico,  $IF_0$  é o valor inicial de IF, antes da ocorrência da floculação e b é o patamar após um longo período de floculação e traduz o tamanho dos flocos, pois quanto maior o b, maiores são os flocos.  $t_{inf}$  é o tempo para atingir o ponto de inflexão da curva, cuja inclinação é máxima e s indica a inclinação nesse ponto. O parâmetro  $t_{inf}$  depende da taxa de agitação da amostra e da natureza do coagulante (GREGORY, 1999).

John Gregory, em 1995, descobriu que a maior inclinação s da curva IF x tempo tem grande correlação com a turbidez residual após o procedimento de Jar Test, com coagulantes férricos e alumínicos em soluções diluídas. Quanto maior a inclinação s, menor era a turbidez residual após o ensaio Jar Test.

Gregory (1999) mostra que as curvas de IF x tempo são maiores quanto maior a quantidade de coagulante utilizados, em uma solução diluída de caulinita 37 mg/L, com turbidez de 50 UNT e pH ajustado para 7 (Figura 13).

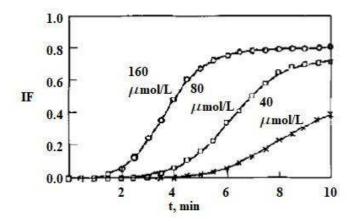


Figura 13 - Mudanças na curva IF x tempo com diferentes doses de coagulante. Adaptado de (GREGORY, 1999).

Espera-se que as curvas de IF sigam o comportamente mostrado na Figura 13 até a dosagem ótima e que a partir dela, as dosagens passem a apresentar menor patamar, indicando que quanto melhor a dosagem, maior o patamar alcançado. Isso representa potencial uso dessas curvas quando o mecanismo de neutralização de cargas é o predominante, visto que as partículas podem ser removidas ao serem retidas no filtro. Além disso, nesse mecanismo a diferença de tamanho de flocos gerados por uma dosagem menor e a dosagem ótima não é tão significativa pois o volume dos flocos é pequeno sendo, portanto, mais vantajoso utilizar a dosagem ótima indicada pelo índice de floculação.

O tempo de espera para que o índice de floculação comece a crescer está relacionado com o tempo necessário para os precipitados de hidróxido crescerem até um tamanho significativo, porém esse tempo não tem efeito sobre o grau de floculação, dado o tempo suficiente para a formação dos flocos.

Já em suspensões concentradas, Gregory (1999) mostra que o índice de floculação tem um comportamento diferente com o tempo: o índice de floculação atinge um pico logo após a adição do coagulante e depois decresce para um valor bem menor que o máximo atingido. A Figura 14 mostra a curva IF x tempo em uma solução de caulinita 30 g/L com adição de um coagulante polimérico catiônico.

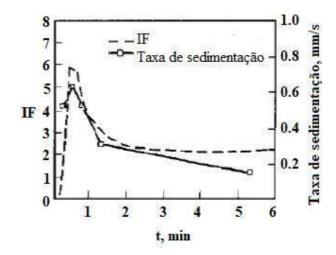


Figura 14 - Índice de floculação em função do tempo em uma solução de caulinita 30 g/L com adição de coagulante polímérico, com taxa de agitação de 120 rpm. Adaptado de (GREGORY, 1999).

Na Figura 14, pode-se observar que a taxa de sedimentação dos flocos segue o mesmo comportamento do índice de floculação, ou seja, quando o índice alcança um valor máximo, maior é a taxa de sedimentação. Isso indica potencial uso dessa curva quando o mecanismo de varredura é o predominante, pois se a taxa de sedimentação é maior quanto maior o índice de floculação, possivelmente a dosagem que tenha maior IF seja a dosagem ótima de coagulação.

Staaks et al. (2011) avaliaram o processo de coagulação em águas com diferentes concentrações de carbono orgânico dissolvido usando o Photometric Dispersion Analyser. Como resultados, verificou-se a correlação positiva já citada anteriormente do crescimento de flocos com a dosagem de coagulante e a indicação favorável do uso do PDA para a avaliação das condições de otimização da coagulação. A Figura 15 mostra o comportamento geral do índice de floculação no tempo. As barras na parte superior do gráfico indicam as etapas de mistura rápida, mistura lenta e sedimentação.

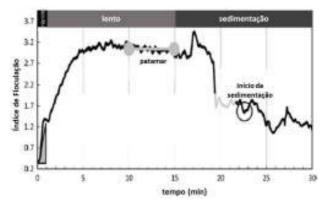


Figura 15 - Dados do índice de floculação com o tempo, indicando as etapas de floculação e sedimentação. Adaptado de (STAAKS et al., 2011).

Portanto, verifica-se que a busca de interpretação física para o índice de floculação através do uso do monitoramento contínuo da floculação tem forte potencial para fornecer informações sobre formação e quebra de flocos e melhoramento das condições de coagulação (pH e dosagem de coagulante).

No Brasil, encontra-se em desenvolvimento com base nos mesmos princípios do PDA o Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF), resultado de uma parceria entre o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) e a Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp). Este equipamento é o que será usado nos testes desenvolvidos nesse trabalho, em busca de uma correlação entre o Índice de Floculação gerado e a dosagem de coagulante que otimize o processo de floculação.

# 3 Metodologia

### 3.1 Materiais

As listas dos materiais empregados nos procedimentos realizados neste trabalho estão apresentadas nas tabelas 1 e 2, com uma pequena descrição de suas aplicações.

Tabela 1 - Lista de equipamentos e materiais.

Equipamento/Material	Descrição	Aplicação
EMCF	ITA (RUSSO, 2017)	Ensaios de coagulação
Jar Test	Nova Ética Modelo LDB	Ensaios de coagulação
Bomba peristáltica	Watson Marlow	Movimentação da amostra entre o jarro e o EMCF
Espectofotômetro	DR 6000 Benchtop Hach	Análises de cor e absorbância
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 para lavagem de materiais ou dissolução de amostras
Capela	SP Labor	Local de preparo de soluções químicas
Balança eletrônica	Shimadzu AUY220	Pesagem de substâncias
Agitador	Fisatom Mod. 752	Homogeneização da amostra para análises
Tubo	MarterflexTygon 06409-16 4 mm	Circulação da amostra entre o jarro e o EMCF
Barrilete	Permution 50L	Armazanamento e homegeneização da água bruta

Tabela 2 - Lista de reagentes.

Reagentes	Descrição	Aplicação
Ácido nítrico	65% - Neon	Acidificação da água bruta
Sufalto de alumínio	$Al_2(SO_4)_3$ . 14,3 $H_2O$ com teor de $Al_2O_3$ de 8,35%	Coagulante
Carbonato de sódio	Anidro 99,5% - Synth	Correção do pH - agente alcalinizante
Ácido sulfúrico	95%-98% - Synth	Análise de alcalinidade
Preto de eriocromo	Qhemis	Análise de dureza
Etilenodiamonotetracético	EDTA Sal dissódico - Synth	
sal dissódico	22 111 Sur dissource Synth	Análise de dureza

Também foram utilizados demais utensílios usuais de laboratório como espátulas, pipetas, balões volumétricos, bureta, béckeres, entre outros.

# 3.2 Água de estudo

Para o presente trabalho, a água de estudo foi a água bruta captada pela Estação de Tratamento de Água do DCTA. Essa água vem do córrego Vidoca, pertencente a bacia do Ribeirão Vidoca, que se localiza na região sul do município de São José dos Campos, no estado de São Paulo. Parte da captação da água bruta da estação também é feita por meio de poços artesianos subterrâneos.



Figura 16 - Bacia do Ribeirão Vidoca. (STEMPNIAK; TEIXEIRA BATISTA; MORELLI, 2007).

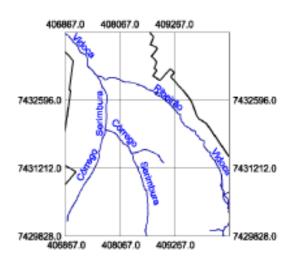


Figura 17 - Parte baixa da bacia do Ribeirão Vidoca (STEMPNIAK; TEIXEIRA BATISTA; MORELLI, 2007).

A Estação de Tratamento de Água do DCTA é responsável pelo abastecimento com água potável do campus GUARNAE-SJ, produzindo aproximadamente 3 milhões de litros de água potável diariamente. Estima-se que a população abastecida seja de cerca de 6000 pessoas.

Dentro da própria ETA existe um ponto de coleta de água bruta, de onde foi retirada a água destinada aos ensaios. A mesma foi colocada em galões, transportada até o laboratório de Saneamento da Divisão de Engenharia Civil do ITA, onde foi armazenada em um freezer a 1,5 °C dentro de um barrilete.

# 3.3 Caracterização da água

A amostra de água bruta coletada foi transferida para um barrilete de 50L e homogeneizada. A partir de uma parte dessa amostra, procedeu-se à caracterização em termos

de cor, absorbância, turbidez, dureza, pH e alcalinidade. Nos tópicos seguintes, serão descritas as metodologias para a determinação de cada parâmetro da água.

#### 3.3.1 Cor

A cor aparente foi determinada através do uso do espectrofotômetro DR 6000 Benchtop da Hach no comprimento de onda de 465 nm. Essa análise baseia-se na metodologia estabelecida no Standard Methods (RICE et al., 1999). Primeiramente, coloca-se água deionizada em um recipiente de vidro e determina-se o zero da leitura. Após, é feita a leitura de cor da água bruta em unidades Hazen. Uma unidade Hazen corresponde a mudança de cor gerada por 1 mg Pt-Co por litro de água.

#### 3.3.2 Absorbância

A absorbância também foi medida com o espectrofotômetro DR 6000. Primeiramente, água deionizada é colocada em uma cubeta retangular de 1 cm de caminho ótico e é feita a leitura para zerar o comprimento de onda. Em seguida, a amostra de água bruta é colocada na mesma cubeta para medição da absorbância.



Figura 18 - Espectrofotômetro DR 6000 Benchtop da Hach para medição de cor aparente e absorbância.

#### 3.3.3 Turbidez

A turbidez mede o grau de atenuação que um feixe de luz sofre ao atravessar a água, causada pelos sólidos em suspensão presentes na mesma. Nesse trabalho, este parâmetro foi medido com o turbidímetro 2100Q da Hach e o resultado expresso em UNT.

#### 3.3.4 pH

O pH da amostra de água foi medido com o phmetro de bancada QX 1500 Plus da Qualxtron. A sonda é introduzida na amostra em questão com leve agitação e anota-se a leitura quando o pH estabiliza-se no leitor.



Figura 19 - Turbidímetro 2100Q da Hach.



Figura 20 - pHmetro QX 1500 Plus da Oualxtron.

#### 3.3.5 Dureza

O método empregado de determinação da dureza foi o titulométrico (RICE et al., 1999). Uma solução contendo íons de cálcio e magnésio na faixa de pH 10±0,1 apresenta cor rósea se a ela é adicionada uma pequena quantidade de preto de eriocromo. O EDTA (Etilenodiamonotetracético sal dissódico) em contato com certos metais forma complexos, portanto ao adicioná-lo na amostra de água, os íons de cálcio e magnésio são complexados e a solução fica com uma coloração azul, indicando o fim da reação. Através da quantidade de EDTA gasto para titular a amostra, encontra-se a dureza em  $mg\ CaCO_3/L$ , por meio de estequiometria.

#### 3.3.6 Alcalinidade

A titulação potenciométrica foi utilizada como método de medição (RICE et al., 1999) da alcalinidade da água. Os íons responsáveis pela alcalinidade reagem com um ácido padrão adicionado à amostra. Anota-se o volume de ácido empregado para atingir os pHs de 8,3 e 4,5, usando-se o sistema de dissociação bicarbonato-carbonato e presença de hidróxidos. Assim, determina-se, respectivamente, a alcalinidade parcial  $(OH^- + H^+ \rightarrow H_2O)$  e a alcalinidade total  $CO_3^{2-} + OH^- \rightarrow HCO_3^-$  e  $HCO_3^- + OH^- \rightarrow H_2CO_3$ ) da amostra.

## 3.4 Determinação da dosagem ótima

Antes das realizações dos ensaios, cor, turbidez e absorbância são medidos para então procederem-se os ensaios de estudo da coagulação. Esses ensaios foram realizados com o Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação conectado a um computador para a

transmissão dos dados e acoplado ao sistema de Jar Test modelo LDB da marca Nova Ética. O esquema geral do ensaio pode ser visto na Figura 21.

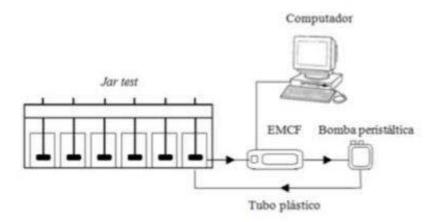


Figura 21 - Esquema da realização dos ensaios (BARTIKO, 2014).

Para a determinação da dosagem ótima, fixou-se o pH da água através da adição de carbonato de sódio a fim de aumentar o pH e/ou ácido nítrico para redução de pH. Uma dose de carbonato de sódio é certamente adicionada para tamponamento da solução. Esse pH é anotado e tomado como valor de referência antes do ensaio. Testam-se então diferentes concentrações de sulfato de alumínio, com base no diagrama de coagulação de (AMIRTHARAJAH; MILLS, 1982) e na dosagem da ETA no dia da coleta. Pode-se caracterizar a qualidade do processo de coagulação segundo a remoção de turbidez ou cor da água original. Neste trabalho, o parâmetro escolhido é a turbidez, assim a dosagem ótima de coagulante ou o pH ótimo de coagulação são aqueles que vão gerar a maior remoção de turbidez da água analisada.

O procedimento do Jar Test se dá da seguinte forma: dois litros da água de estudo são colocados no jarro e o pH é ajustado. O jarro é então colocado no aparelho de Jar Test e bomba peristáltica é acionada, a uma vazão de 15 ml/min, o que faz circular a amostra do jarro até o EMCF e retornar, por meio de um tubo de plástico de diâmetro de 4 mm (MarterflexTygon 06409-16). A posição da bomba em relação ao EMCF foi adotada segundo recomendações de (YUKSELEN; GREGORY, 2004) a fim de evitar a quebra de flocos por forças mecânicas da bomba antes de serem analisados pelo EMCF.

O EMCF é ligado para começar a coleta de dados e após 2 min de espera para estabilização do pH e das leituras do EMCF (YUKSELEN; GREGORY, 2004), o ensaio Jar Test era então iniciado com a adição do com o coagulante sulfato de alumínio isento de ferro  $(Al_2(SO_4)_3 \times 14.3 \ H_2O$  com teor de  $Al_2O_3$  de 8,35%). A agitação da amostra inicia-se com gradiente de velocidade de 55  $s^{-1}$  para homogeneização da amostra e então procedem-se as

misturas rápida e lenta no Jar Test. Os parâmetros de agitação foram os descritos na Tabela 3 (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011). O controle de temperatura não foi realizado durante o ensaio, pois o objetivo era realizar ensaios preliminares para acompanhar a evolução do índice durante o processo.

Tabela 3 - Parâmetros de agitação no ensaio Jar Test.

Parâmetro	Mistura rápida	Mistura lenta
Tempo	10 s	15 min
Gradiente de velocidade	498s <sup>-1</sup>	34s <sup>-1</sup>

Posteriormente a realização das misturas rápida e lenta, os aparelhos são desligados. Os dados coletados pelo software Meguno Pro são armazenados para avaliação e tratamento. Todos os ensaios foram realizados em duplicata. Após 15 min de sedimentação, medem-se novamente pH, cor, turbidez e absorbância da água.

### 3.5 Aquisição dos dados de IF

O Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação, desenvolvido no ITA por alguns alunos de pós-graduação e ultimamente melhorado por Russo (2017), foi o material utilizado para a aquisição dos dados sobre os flocos a fim de avaliar a ocorrência da floculação. Ele é constituído de quatro módulos: dois módulos sensores, um módulo condicionador auxiliar e um módulo de processamento.

O módulo sensor consiste em um diodo emissor de luz infravermelha alimentado for uma fonte de corrente constante e regulável. O feixe de luz emitido atravessa a amostra que passa por uma mangueira e um sensor recebe o sinal. O circuito responsável pela recepção da luz emitida é composto por um fotodiodo acoplado a um amplificador, com melhor resposta para sinais luminosos com comprimento de onda na faixa de 900 nm (RUSSO, 2017).

A presença de dois módulos sensores possibilita a análise de dois IFs simultaneamente, o que é vantajoso para a realização de dois ensaios distintos ou para acompanhar a evolução do processo de floculação em um mesmo ensaio.



Figura 22 - Módulo Sensor (RUSSO, 2017).

Segundo Russo (2017), as componentes do sinal AC e DC do sensor 1 são então encaminhadas ao módulo de processamento onde são separadas, amplificadas, filtradas, digitalizadas e processadas. O módulo condicionador auxiliar serve para realizar as etapas de separação, amplificação e filtração do sinal recebido no sensor 2, que o módulo de processamento termina de digitalizar e processar.

Uma fonte alimenta o módulo de processamento, cuja unidade é baseada na plataforma Arduino. Nessa unidade de processamento, as componentes de sinais analógicas são convertidas em valores digitais, e os valores de IF1 e IF2 são calculados. Esses valores são transmitidos através da porta USB para o computador, onde o software Meguno Pro começa a tratar os dados.

Antes de plotar, o software avalia se a leitura dos valores digitais de AC e DC é menor que cinco vezes a média das últimas quarenta leituras, para detectar e desprezar valores não compatíveis, que podem ser causados por bolhas de ar ou impurezas na amostra. Também é avaliado se o valor da média do sinal DC é negativo, o que torna o índice de floculação negativo. Se sim, IF = 0. Caso contrário, o valor de IF é enviado para plotagem. A plotagem é feita em tempo real, a 4 dados por segundo, e os valores são armazenados e podem ser salvos para avaliações posteriores (RUSSO, 2017).

#### 3.6 Tratamento dos dados de IF

Os dados do índice de floculação no tempo foram coletados em formato .txt e transferidos para uma planilha no Excel. Como foram realizados dois ensaios para cada concentração analisada, o número de dados considerado foi o da repetição que tinha menor número de dados, pois o tratamento de dados inclui uma média dos valores encontrados nas duas repetições.

Após o cálculo da média para cada concentração, utilizou-se o método exponencial para a redução de mudanças abruptas no gráfico. Nesse método, a estimativa do primeiro dado é igual ao dado inicial e as próximas são dadas por:

$$y_{t+1}^* = y_t^* + \alpha (y_t - y_t^*), \quad com \ 0 \le \alpha \le 1$$
 (30)

onde  $y_t^*$  é a estimativa de IF no tempo t,  $y_t$  é o valor de IF no tempo t e  $\alpha$  é o parâmetro de ajuste do método exponencial.

O parâmetro  $\alpha$  é encontrado usando o Solver do Excel, de forma a diminuir a soma do erro médio quadrático de todos os dados.

Os dados então são plotados no tempo. Como há exclusão de alguns valores de IF por não serem coerentes com os valores anteriores, conforme descrito no item 3.5, o tempo de aquisição de cada valor é aproximado, pois não se sabe exatamente qual valor foi excluído e em que segundo. No entanto, no total poucos dados são excluídos, o que não traz uma imprecisão tão grande para a evolução temporal.

Para avaliar o tamanho do patamar alcançado é calculado o valor de IF médio, através da fórmula 31, no primeiro minuto de coleta, antes de ser adicionado o coagulante, e também a partir de 8 min da adição de sulfato de alumínio até o momento final. A diferença entre esses dois valores de índice de floculação médio dá o patamar de crescimento do índice do início ao fim do teste.

A equação 31 (HOPKINS; DUCOSTE, 2003) dá a média ponderada de IF no tempo:

$$\overline{IF} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (IF_i \times tempo_i)}{\sum_{i=1}^{n} (tempo_i)}$$
(31)

# 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Caraterização da água

Os resultados da caracterização da água bruta são apresentados na Tabela 4. Como podese observar, a água tem baixo valor de turbidez, porém cor acentuada e não apresenta dureza. O comprimento de onda observado nas leituras de absorbância foi em torno de 620 nm.

Parâmetro	Valor
Volume inicial (L)	50
Absorbância	0,02
Cor (uH)	146
Turbidez (UNT)	14,1
рН	7,1
Alcalinidade parcial (mg/L em CaCO <sub>3</sub> )	0
Alcalinidade total (mg/L em CaCO <sub>3</sub> )	20
Dureza (mg/L em CaCO3)	0

Tabela 4 - Água bruta: medições iniciais.

Esses parâmetros podem variar por se tratar de uma água bruta proveniente de um rio. Em geral, a água bruta da ETA do DCTA apresenta turbidez baixa, em torno de 15 UNT. Entretanto, quando há chuvas intensas a turbidez chega a 200 UNT. Isso ressalta a importância de um processo de monitoramento contínuo, que possa detectar as variações na qualidade da água e responder prontamente com a dosagem de coagulante adequada.

# 4.2 Determinação da dosagem ótima

O pH de 7,5 foi escolhido pois era o pH da água na ETA antes da adição de sulfato de alumínio. Antes de passar pelo processo de coagulação e floculação são adicionados cloro e carbonato de sódio à água bruta, por isso há esse aumento de pH. As dosagens também foram escolhidas com base na dosagem no dia da coleta, que era de 25,8 mg/L de sulfato de alumínio. Optou-se por testar as dosagens de 20 mg/L, 25 mg/L e 30 mg/L de coagulante e para cada dosagem, foram realizados dois testes.

Os resultados dos ensaios Jar Test são mostrados na Tabela 5 para pH inicial da água de 7,5. Nos testes, cada coluna é relativa aos dados obtidos antes e depois do ensaio.

Tabela 5	Resultados	dos	encaine Iar	Test	nara nH	Linicial'	75
rabera 3 -	Resultados	uos	ciisaios Jai	1 CSt	para pr	imiciai	1,5.

Parâmetro	Tes	te 1	Tes	te 2		
Dosagem de sulfato de alumínio - 20 mg/L						
pН	7,5	7	7,5	7		
Cor (uH)	152	36	145	45		
Turbidez (UNT)	16,1	3,91	15,3	4,75		
Absorbância	0,018	0,004	0,019	0,005		
Dosagem de s	sulfato de	alumínio -	25 mg/L			
pН	7,5	7	7,5	6,9		
Cor (uH)	142	59	141	49		
Turbidez (UNT)	14,9	6,49	14,7	5,82		
Absorbância	0,019	0,008	0,018	0,007		
Dosagem de sulfato de alumínio - 30 mg/L						
pН	7,6	6,7	7,5	6,6		
Cor (uH)	146	66	148	73		
Turbidez (UNT)	15,8	7,44	14,8	8,24		
Absorbância	0,02	0,008	0,02	0,01		

A fim de se comparar os valores inicial e final dos parâmetros, foi feita a Tabela 6, com o cálculo da variação relativa em porcentagem, que foi realizada da seguinte forma:

$$Variação\ relativa = \frac{valor\ final - valor\ inicial}{valor\ inicial} \times 100 \tag{32}$$

Para cada dosagem de coagulante também foi calculada a média das variações relativas das duas réplicas.

Tabela 6 - Variações relativas dos parâmetros em cada teste e na média das réplicas.

Variação relativa (%)	Teste 1	Teste 2	Média				
Dosagem de sulfato de alumínio - 20 mg/L							
pН	-6,67	-6,67	-6,67				
Cor	-76,32	-68,97	-72,64				
Turbidez	-75,71	-68,95	-72,33				
Absorbância	-77,78	-73,68	-75,73				
Dosagem de sulfat	to de alum	únio - 25 r	ng/L				
pН	-6,67	-8,00	-7,33				
Cor	-58,45	-65,25	-61,85				
Turbidez	-56,44	-60,41	-58,43				
Absorbância	-57,89	-61,11	-59,50				
Dosagem de sulfat	Dosagem de sulfato de alumínio - 30 mg/L						
pН	-11,84	-12,00	-11,92				
Cor	-54,79	-50,68	-52,74				
Turbidez	-52,91	-44,32	-48,62				
Absorbância	-60,00	-50,00	-55,00				

Todos esses dados são melhor resumidos nas Figuras 23, 24, 25 e 26. Pode-se observar na Figura 23 que quanto maior a dosagem, maior a redução de pH com o ensaio, o que é esperado, pois o alumínio forma compostos hidroxilados, aumentando a acidez da amostra.

Em relação à redução de cor, turbidez e absorbância, os gráficos mostram o mesmo padrão, indicando que a dosagem ótima é a de 20 mg/L de sulfato de alumínio, seguida da de 25 mg/L e por fim a de 30 mg/L. Como a menor dosagem testada acabou mostrando-se como a ótima, o comportamento desses parâmetros foi monotônico. O ideal seria que dosagens menor que 20 mg/L ainda fossem testadas para se melhor avaliar o destaque da dosagem ótima tanto nos resultados de Jar Test como nos gráficos de índice de floculação.

O fato de não ter se encontrado a mesma dosagem ótima da ETA pode ser explicado pela diferença de temperatura de trabalho, assim como de gradientes de velocidades utilizados.

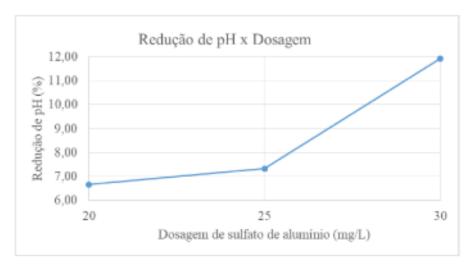


Figura 23 - Redução de pH x Dosagem com o ensaio Jar Test, ph inicial 7,5.

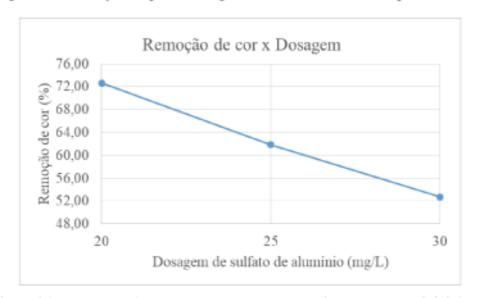


Figura 24 - Remoção de cor x Dosagem com o ensaio Jar Test, pH inicial 7,5.

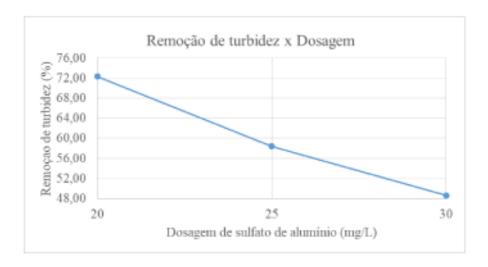


Figura 25 - Remoção de turbidez x Dosagem com o ensaio Jar Test, pH inicial 7,5.

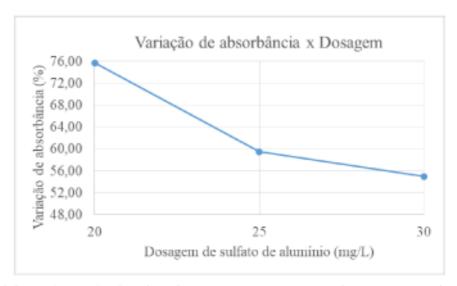


Figura 26 - Redução de absorbância x Dosagem com o ensaio Jar Test, pH incial 7,5.

A título de visualização, as Figuras 27 e 28 mostram a comparação da água logo no ínicio do Jar Test e após algum tempo de floculação. É possível ver na Figura 28 que já há formação de flocos visíveis.



Figura 27 - Início do Jar Test.



Figura 28 - Formação de flocos após um tempo de ensaio.

As Figuras 29 e 30 mostram a água bruta antes e depois da realização do ensaio Jar Test. É possível observar a remoção de cor e turbidez a olho nu. Na Figura 30, os flocos sedimentados estão depositados no fundo do recipiente.



Figura 29 - Água bruta antes da realização do ensaio Jar Test.

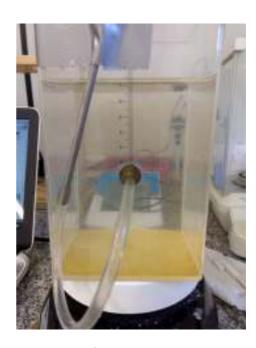


Figura 30 - Água bruta após ensaio Jar Test e 15 minutos de sedimentação.

#### 4.3 Tratamento dos dados de IF

A Figura 31 mostra a variação do índice de floculação com o tempo para a amostra testada. Essas curvas são resultado das médias dos índices de floculação obtidos nas duas réplicas de cada ensaio com as diferentes dosagens após o tratamento de dados explicitado no item 3.6.

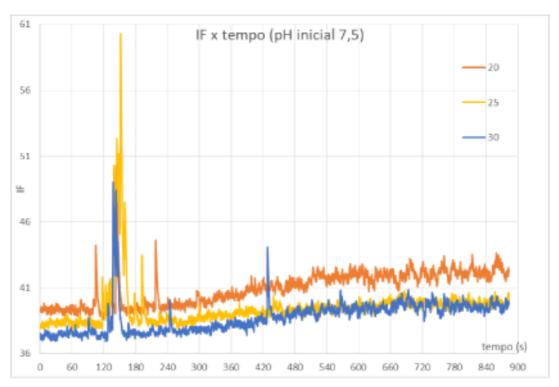


Figura 31 - IF x tempo, pH inicial 7,5.

Os picos encontrados logo depois da adição do coagulante lembram o comportamento na solução de caulinita concentrada, mostrado na Figura 14. Entretanto, após esse pico, há um crescimento lento do índice de floculação com o tempo, tal como mostrado na Figura 13. Mudando a escala do gráfico da Figura 31, a fim de observar o comportamento após o pico inicial, temos como resultado a Figura 32.

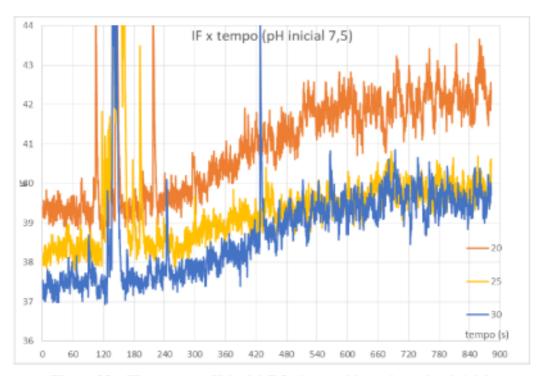


Figura 32 - IF x tempo, pH incial 7,5, desconsiderando o pico inicial.

A Tabela 7 traz os cálculos dos índices de floculação médios no início e no fim do ensaio com as diferenças de patamar para cada dosagem testada.

Tabela 7 – Cálculos de  $\overline{IF}$  e diferença patamar para cada dosagem.

Cálculo/Dosagem (mg/L)	20	25	30
$\overline{IF}$ a partir de 8 min	42,113	39,839	39,595
$\overline{IF}$ no minuto inicial	39,350	38,405	37,503
Diferença de patamar	2,764	1,434	2,092

Como pode-se observar, a dosagem ótima de 20 mg/L apresentou maior crescimento de IF com o tempo, confirmando a hipótese de que como o IF está relacionado ao estado de agregação e tamanho dos flocos, provavelmente a dosagem ótima apresentará maior evolução de IF com o tempo, pois ela é a que causa maior remoção de turbidez a amostra.

A demora para haver o aumento do índice de floculação com o tempo pode ser devido a ausência de gradiente necessário para promover a floculação na mistura lenta. Sugere-se então, para trabalhos futuros, que esse gradiente seja aumentado de forma a promover a floculação mais rapidamente, aproximando-se então da curva esperada, que foi mostrada na Figura 15.

Além disso, pelo fato de a água ter sido armazenada no congelador e o ensaio contar com uma variação de temperatura de 4°C a 10°C, aproximadamente, fez com o que o gradiente se fosse menor que o esperado, pois quanto menor a temperatura menor o gradiente para uma rotação em rpm fixa, e além disso, fosse variável. Mesmo com essa falta de controle de temperatura, os resultados mostrados foram positivos ao relacionar a dosagem ótima com o maior crescimento do índice de floculação.

# 5 Conclusões

Foi verificada relação do aumento do índice de floculação com o tempo com a dosagem ótima obtida em Jar Test, apesar da falta de controle de condições experimentais como a temperatura e o fato do gradiente de velocidade aplicado parecer ser baixo durante a etapa lenta de mistura.

O gradiente utilizado foi tomado com base na literatura, entretanto esse valor foi usado para uma solução de caulinita, preparada sinteticamente. A água bruta tem composição mais complexa que uma solução padronizada e provavelmente, mais diversos tipos de colóides. Por conta disso, deve ser necessário esse aumento do gradiente para a ocorrência de floculação mais rapidamente.

Em relação à variação de temperatura, sugere-se seguir o controle presente nos ensaios da literatura, pois a temperatura é um fator que interfere no gradiente de velocidade aplicado, visto que para uma rotação fixa em rpm da pá no Jar Test, o gradiente corresponte tem influência da temperatura em que a amostra se encontra.

Pelo fato de o comportamento geral das curvas estarem de acordo com os estudos da literatura, a hipótese de que o Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação pode auxiliar no controle da dosagem de coagulante em água bruta não é descartada, no entanto são necessários mais ensaios para se comprovar a validade dessa relação do índice de floculação com a dosagem ótima.

De uma forma geral, pode-se concluir que o objetivo geral desse trabalho de graduação foi alcançado ao realizar as caracterizações e ensaios previstos na metodologia e por apresentar resultados preliminares sobre o comportamento do índice de floculação no tempo, visando o auxílio à determinação da dosagem ótima de coagulante.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Podem-se proceder ensaios com outros tipos de coagulante para a validação do equipamento, bem como se estudar as variações de comportamento do índice de floculação de acordo com os mecanismos predominantes de coagulação.

Além disso, assim como a dosagem ótima, pode-se determinar o pH ótimo de floculação através da mesma metodologia. Ajusta-se o pH da amostra em uma faixa de valores desejados e realizam-se os ensaios com uma concentração fixa de sulfato de alumínio. O pH com o qual verifica-se maior remoção de turbidez é o pH ótimo procurado. O ideal é após a determinação

da dosagem ótima, fixar essa dosagem e verificar o pH ótimo de coagulação. Assim, tem-se o par (dosagem, pH) que otimiza a floculação para a amostra em estudo.

# 6 Referências bibliográficas

AMIRTHARAJAH, Appiah; MILLS, Kirk M. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. **Journal (American Water Works Association)**, p. 210-216, 1982.

ARGAMAN, Y. A. Pilot-plant studies of flocculation. **Journal (American Water Works Association)**, p. 775-777, 1971.

BARTIKO, D. Avaliação da influência de diferentes gradientes de velocidade e tempos de quebra sobre a potencialidade de recrescimento de flocos empregando um equipamento de monitoramento contínuo da floculação. 2014. Tese de Mestrado - Instituto Tecnológico de Aeronaútica, São José dos Campos.

BRATBY, John. Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. IWA publishing, 2006.

CHEMTRAC SYSTEMS. Manual de operação do Monitor de Corrente de Fluxo com sensor remoto DuraTrac. [S.l.: s.n.], [201-?]. 45 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. [s.l.] RIMA, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. **LDiBE Editora. São Carlos**, 2011.

DUAN, Jinming; GREGORY, John. Coagulation by hydrolysing metal salts. **Advances in colloid and interface science**, v. 100, p. 475-502, 2003.

ENZLER, S. M. **History of water treatment**. [S.l.; s.n.], [entre 2005 e 2017]. Disponível em: <a href="http://www.lenntech.com/history-water-treatment.htm">http://www.lenntech.com/history-water-treatment.htm</a>> Acesso em: 19 mai. 2017.

LAGE FILHO, Frederico. Coagulação de água bruta de excelente qualidade: monitoria via potencial zeta e medidor de corrente. **Revista TAE**. 2014. Disponível em: <a href="http://www.revistatae.com.br/8566-noticias">http://www.revistatae.com.br/8566-noticias</a> Acesso em: 13 jul. 2017.

FITZPATRICK, Caroline S.; GREGORY, John. Coagulation and filtration. **The handbook of water and wastewater microbiology. Academic, London**, 2003.

GREGORY, John. Particle monitoring techniques for water treatment applications. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 11, n. 3, p. 328-333, 1999.

GREGORY, John. Turbidity fluctuations in flowing suspensions. **Journal of colloid and interface science**, v. 105, n. 2, p. 357-371, 1985.

GREGORY, John; GUIBAI, L. I. Effects of dosing and mixing conditions on polymer flocculation of concentrated suspensions. **Chemical Engineering Communications**, v. 108, n. 1, p. 3-21, 1991.

GREGORY, J.; NELSON, D. W. A new optical method for flocculation monitoring. **Solid-liquid separation**, p. 172-182, 1984.

GUIBAI, Li; GREGORY, John. Flocculation and sedimentation of high-turbidity waters. **Water research**, v. 25, n. 9, p. 1137-1143, 1991.

HAHN, Hermann H.; STUMM, Werner. Kinetics of coagulation with hydrolyzed AI (III): The rate-determining step. **Journal of colloid and interface science**, v. 28, n. 1, p. 134-144, 1968.

HAN, Mooyoung; LAWLER, Desmond F. The (relative) insignificance of G in flocculation. **Journal (American Water Works Association)**, p. 79-91, 1992.

HOPKINS, D. Cory; DUCOSTE, Joel J. Characterizing flocculation under heterogeneous turbulence. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 264, n. 1, p. 184-194, 2003.

HUNT, Trevor M. **Handbook of wear debris analysis and particle detection in liquids**. Springer Science & Business Media, 1993. Disponível em: <a href="https://books.google.com.br/books?id=vm\_bQwSWxyoC&printsec=frontcover&hl=pt-bR#v=onepage&q&f=false">https://books.google.com.br/books?id=vm\_bQwSWxyoC&printsec=frontcover&hl=pt-bR#v=onepage&q&f=false</a> Acesso em 20 jul. 2017.

JIN, Yan. Use of a high resolution photographic technique for studying coagulation/flocculation in water treatment. 2005. Tese de Doutorado.

MORUZZI, Rodrigo Braga; DE OLIVEIRA, Andre Luiz; DE JULIO, Marcelo. Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração. **Revista DAE**, n. 200, p. 25-36, 2015.

RICE, E. W. et al. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. [s.l], 1999 . Disponível em: <a href="https://www.mwa.co.th/download/file\_upload/SMWW\_4000-6000.pdf">https://www.mwa.co.th/download/file\_upload/SMWW\_4000-6000.pdf</a>>. Acesso em: 23 jul. 2017.

RICHTER, Carlos A. Água: métodos e tecnologia de tratamento. Edgard Blucher, 2009.

RUSSO, A.C. Desenvolvimento e aplicação de sistema de monitoramento contínuo de tamanho de flocos visando a otimizaçãodos processos de coagulação e floculação de uma Estação de Tratamento de Água. 2017. Qualificação da tese de doutorado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

SMOLUCHOWSKI, M. von. Study of a Mathematical Theory for the Coagulation Kinetics of Colloidal Solutions. ARMY BIOLOGICAL LABS FREDERICK MD, 1968.

STAAKS, Christian et al. Coagulation assessment and optimisation with a photometric dispersion analyser and organic characterisation for natural organic matter removal performance. **Chemical engineering journal**, v. 168, n. 2, p. 629-634, 2011.

STEMPNIAK, André; TEIXEIRA BATISTA, Getulio; MORELLI, Ademir Fernando. Avaliação da transformação da paisagem na bacia do ribeirão Vidoca, São José dos Campos, SP, Brasil. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 2, n. 3, 2007.

SWIFT, David L.; FRIEDLANDER, S. K. The coagulation of hydrosols by Brownian motion and laminar shear flow. **Journal of colloid science**, v. 19, n. 7, p. 621-647, 1964.

THOMAS, D. N.; JUDD, S. J.; FAWCETT, N. Flocculation modelling: a review. **Water research**, v. 33, n. 7, p. 1579-1592, 1999.

YUKSELEN, Mehmet Ali; GREGORY, John. The reversibility of floc breakage. **International Journal of Mineral Processing**, v. 73, n. 2, p. 251-259, 2004.

ZETA-METER. **Zetâmetro 4.0**. Disponível em: <a href="http://www.zeta-meter.com/">http://www.zeta-meter.com/</a> Acesso em: 17 jul. 2017.

# FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO <sup>1</sup>. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <sup>2.</sup> data REGISTRO N° N° DE PÁGINAS TC DCTA/ITA/TC-116/2017 21 de novembro de 2017 67 . TÍTULO E SUBTÍTULO: Aplicação do índice de floculação no controle da dosagem de sulfato de alumínio na água bruta da Estação de Tratamento de Água do DCTA. b. AUTOR(ES): Dafne de Brito Cruz 7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Índice de floculação, Água bruta, Coagulação. 9.PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Floculação; Tratamento de água; Monitoramento de saúde estrutural; CTA (São José dos Campos); Engenharia sanitária. <sup>10.</sup> APRESENTAÇÃO: Internacional (X) Nacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. PhD Ten Cel Eng Márcio Antônio da Silva Pimentel. Publicado em 2017. 11. RESUMO: O monitoramento da qualidade da água em processo de tratamento é importante para garantir pronta reposta quando há variações das características da água bruta. Esta análise pode ser feita atráves do Equipamento de Monitoramento Contínuo da Floculação (EMCF), utilizado nesse trabalho como alternativa aos aparelhos usuais, visando testar sua trabalhabilidade com água bruta, além de avaliar o uso do índice de floculação como dosador do coagulante sulfato de alumínio.

Desta forma, submeteu-se a água bruta da Estação de Tratamento de Água do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial a ensaios Jar Test para a avaliação de sua qualidade durante os processos de coagulação e floculação. O aparelho de testes foi conectado a um EMCF, por onde se acompanhava a evolução do índice de floculação no tempo.

Os resultados apontam para a importância da continuidade de testes que possam validar a hipótese de que o índice de floculação atinge maior patamar quanto melhor a dosagem de coagulante utilizada, isto é, a que causa maior remoção de turbidez à amostra. As curvas encontradas estão de acordo com as curvas de referência da literatura e a dosagem ótima encontrada no ensaio Jar Test de fato apresentou maior patamar no tempo de análise.

O controle da temperatura e o ajuste do gradiente de velocidade são adaptações propostas para um acompanhamento dos dados mais preciso, a fim de que se possa confirmar a hipótese e validar o uso do índice dessa maneira.

<sup>12.</sup> GRAU DE SIC	GILO:			
	(X ) OSTENSIVO	( ) RESERVADO	( ) <b>SECRETO</b>	