



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**



Daniel Peixoto Bergamin

**TRATABILIDADE DA ÁGUA DO RIO GUALAXO DO SUL EM MARIANA-MG -  
PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA PROJETO DE UNIDADES DE  
COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**OURO PRETO, 2017**

---

Daniel Peixoto Bergamin

**TRATABILIDADE DA ÁGUA DO RIO GUALAXO DO SUL EM MARIANA-MG -  
PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA PROJETO DE UNIDADES DE  
COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Aníbal Fonseca Santiago.

**OURO PRETO, MARÇO DE 2017**

B493t

Bergamin, Daniel Peixoto.

Tratabilidade da água do rio Gualaxo do Sul em Mariana-MG  
[manuscrito]: parâmetros otimizados para projeto de unidades de coagulação e  
floculação / Daniel Peixoto Bergamin. - 2017.

60f.: il.: color; graf; tabs; Quadro.

Orientador: Prof. Dr. Ánibal da Fonseca Santiago.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de  
Minas. Departamento de Engenharia Ambiental.

1. Laboratorios - Aparelhos e instrumentos - Jarteste. 2. Método de Pádua.  
3. Mecânica dos fluidos - Gradiente de velocidade médio. I. Santiago, Ánibal da  
Fonseca. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 504

Catálogo: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto:ficha@sisbin.ufop.br)

Daniel Peixoto Bergamin

**TRATABILIDADE DA ÁGUA DO RIO GUALAXO DO SUL EM MARIANA-MG -  
PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA PROJETO DE UNIDADES DE  
COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO**

Trabalho de graduação (Monografia ou Trabalho de Conclusão de Curso) defendida e aprovada em 23/03/2017 pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



---

Anibal Fonseca Santiago – Professor orientador/UFOP



---

Ana Leticia Pilz de Castro – Professor convidado/UFOP



---

Carlos Eduardo Ferraz de Mello – Professor convidado/UFOP

**OURO PRETO, MARÇO DE 2017**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus.

Aos meus pais Jonas e Ana pelo apoio incondicional.

Aos meus irmãos Deivisson e Diogo pelo apoio durante toda a formação.

À todos os professores que ministraram minha passagem ao longo de toda a jornada acadêmica na Universidade Federal de Ouro Preto que tornou possível esta graduação, em especial ao meu orientador, Aníbal Fonseca Santiago, pela paciência, orientação e tempo demandado.

À Fundação Gorceix, por todo apoio e ensino durante a graduação.

À Violeta pelo carinho, apoio e cobrança para a realização desse trabalho.

À República Gandaia, minha segunda família.

Ao Rafael pelo auxílio durante toda a etapa de laboratório no qual se fez possível a continuação do trabalho e a todos que de alguma forma me ajudaram. Muito obrigado!

## RESUMO

O presente trabalho consiste em uma otimização de parâmetros coagulação e floculação segundo metodologia proposta por Pádua (1994), tendo em vista a análise de hipóteses de escalonamento do gradiente de velocidade médio nas câmaras de floclador. Para desenvolvimento do estudo trabalhou-se com cloreto de polialumínio (PAC) como coagulante nos ensaios de bancada (Jarteste). As águas do estudo foram coletada no rio Gualaxo do Sul, situado no município de Mariana. Foi adotado a velocidade de sedimentação igual a  $3,5\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$  para todos os ensaios. Na coagulação observou-se resultados satisfatórios para a remoção de turbidez com valores de pH de coagulação entre 8 e 8,5 e dosagem de coagulante a partir de  $30\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , na etapa de mistura rápida, os valores que apresentaram menor turbidez remanescente foram para um gradiente de velocidade de  $800\text{s}^{-1}$  e um tempo de mistura de 25s. Os resultados obtidos demonstraram que o método utilizado é uma ferramenta eficaz para a otimização dos parâmetros de tratamento da água, tendo em vista que os resultados encontrados com o escalonamento com 3 câmaras em série (1,75uT), como o de 4 câmaras em série (1,89uT) para 20 minutos de floculação para a água de estudo.

Palavras chaves: Jarteste, método de Pádua, gradiente de velocidade médio, coagulação e floculação.

## ABSTRACT

The present work consists of an optimization of coagulation and flocculation parameters according to the methodology proposed by Padua (1994), in order to analyze the hypothesis of scaling of the medium velocity gradient in the flocculator chambers. For the development of the study, polyaluminium chloride (PAC) was used as a coagulant in the bench test (Jarteste). The waters of the study were collected in the Gualaxo do Sul river, located in the municipality of Mariana. The settling velocity of  $3.5\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$  was adopted for all tests. In the coagulation, satisfactory results were observed for the removal of turbidity with coagulation pH values between 8 and 8.5 and coagulant dosage from  $30\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , in the fast mixing step, the values that presented the lowest remaining turbidity were at a velocity gradient of  $800\text{ s}^{-1}$  and a mixing time of 25 s. The results obtained showed that the method used is an effective tool for the optimization of the water treatment parameters, considering that the results obtained with the 3 chamber chambers in series ( $1.75\text{uT}$ ), such as 4 chambers in series ( $1.89\text{uT}$ ) for 20 minutes of flocculation into the study water.

Key words: Jarteste, Padua method, medium velocity gradient, coagulation and flocculation.

**SUMÁRIO**

LISTA DE SÍGLAS .....	v
LISTA DE SIMBÓLOS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE QUADROS .....	ix
1 - INTRODUÇÃO .....	12
2 - OBJETIVOS .....	14
2.1 - Objetivos específicos .....	14
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
3.1 - Tratamento convencional – Etapa de Clarificação .....	15
3.2 – Unidades de Mistura Rápida e de Flocculação .....	17
3.2.1 – Unidades de mistura rápida .....	18
3.2.2 – Unidades de flocculação .....	20
3.3 - Legislação vigente no Brasil .....	22
3.4 - Características físicas da água .....	24
3.5 - Características químicas da água .....	25
3.6 - Gradientes de velocidade em unidades de flocculação – Método de Pádua.....	26
4 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	29
4.1 - Introdução .....	29
4.2 – Detalhamento do manancial e coleta.....	31
4.3 – Materiais e equipamentos.....	32
4.4 - Caracterização da água .....	34
4.5 – Ensaio no equipamento estático (Jarteste) .....	34
4.5.1 – Etapa 1 - Ensaio para determinação de melhor dosagem de coagulante e pH de coagulação.....	35
4.5.2 - Etapa 2 - Otimização dos parâmetros de Mistura Rápida no Jarteste.....	36
4.5.3 – Etapa 3 - Otimização dos parâmetros de flocculação no Jarteste .....	37
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	37
5.1 – Caracterização da água.....	37



5.2 – Escolha dos parâmetros estudados na Etapa 1 (melhor dosagem de coagulante e pH de coagulação).....	38
5.3 - Escolha dos parâmetros estudados na Etapa 2 (Mistura rápida – $T_{mr}$ , $G_{mr}$ ).....	40
5.5 – Escolha dos parâmetros estudados na Etapa 3 (Floculação – $G_f$ , $T_f$ ).....	41
5.6 – Determinação dos gradientes de velocidade médios segundo metodologia proposta por Pádua (1994).....	44
6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## **LISTA DE SÍGLAS**

ETA - Estação de Tratamento de Água

SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto

SINAN - Sistema de Informação de Agravos de Notificação

PIRH - Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

UNT - Unidade Nefelométrica de Turbidez

STD – Sólidos Totais Dissolvidos

## LISTA DE SIMBÓLOS

min : minutos

$T_f$  : tempo de floculação

$G_f$ : gradiente de velocidade de floculação

$T_{mr}$  : tempo de de mistura rápida

$G_{mr}$  : Gradiente de velocidade médio

s : segundos

cm/min = centímetros por minuto

mg/l = miligramas por litro

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> - Tratamento convencional da água.....	15
<b>Figura 3.2</b> - Esquema de indicativo de mistura rápida e floculação .....	17
<b>Figura 3.3</b> - Esquema de agitadores mecânicos .....	18
<b>Figura 3.4</b> - Tipos de hélices usados nas mistura rápida.....	18
<b>Figura 3.5</b> - Ressalto hidráulico .....	19
<b>Figura 3.6</b> - Injetor e malha de fios, e difusores.....	19
<b>Figura 3.7</b> – Floculadores: (1) Chicana vertical (2) Chicana horizontal (3) Alabama.....	21
<b>Figura 3.8</b> - Floculador hidraulico do tipo bandeija.....	21
<b>Figura 3.9</b> - Floculadores mecanicos com eixo vertical, e horizontal respectivamente.....	21
<b>Figura 3.10</b> - Agitadores em formato de turbina (1) e pá (2).....	21
<b>Figura 3.11</b> - Gradientes de velocidade ótimos de floculação .....	27
<b>Figura 4.1</b> - Fluxograma da realização do trabalho.....	30
<b>Figura 4.2</b> – Estrada a esquerda da Rodovia MG-262, 3,4 km antes da entrada de Furquim em direção a Mariana-MG. ....	32
<b>Figura 4.3</b> - Equipamentos utilizados nos ensaios de bancada. ....	33
<b>Figura 4.4</b> – Multiparâmetro. ....	33
<b>Figura 5.1</b> - Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida por gradiente de mistura rápida para o tempo de sedimentação 3,5 cm/min. ....	40
<b>Figura 5.2</b> - Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação; $V_s = 3,5$ min/cm (ensaios de Jarteste). ....	45
<b>Figura 5.3</b> - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação, $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$ (determinação $G_f^2$ ). ....	46
<b>Figura 5.4</b> - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação, $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ (determinação $G_f^2$ ). ....	47
<b>Figura 5.5</b> - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação, $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ (determinação $G_f^2$ ). ....	47
<b>Figura 5.6</b> - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação, $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ (determinação $G_f^3$ ). ....	48
<b>Figura 5.7</b> - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação, $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ (determinação $G_f^4$ ). ....	49
<b>Figura 5.8</b> - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação, $G_f = 30 \text{ s}^{-1}$ (determinação $G_f^2$ ). ....	50

<b>Figura 5.9</b> - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação, $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ (determinação $G_f^2$ ).....	51
<b>Figura 5.10</b> - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação, $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ (determinação $G_f^3$ ).....	52

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> - Parâmetros gerais de projeto de unidades de mistura rápida. ....	23
<b>Tabela 3.2</b> - Parâmetros gerais de projeto de unidades de floculação. ....	23
<b>Tabela 4.1</b> - Parâmetros operacionais utilizados no Jarteste para os experimentos de coagulação e pH de coagulação. ....	35
<b>Tabela 5.1</b> - Valores da caracterização da água de estudo diariamente .....	38
<b>Tabela 5.2</b> - Ensaio 1: Teste sem a presença de alcalinizante .....	38
<b>Tabela 5.3</b> - Concentração de coagulante 22,5 mg/L. ....	39
<b>Tabela 5.4</b> - Concentração de coagulante 25 mg/L. ....	39
<b>Tabela 5.5</b> - Concentração de coagulante 27,5 mg/L. ....	39
<b>Tabela 5.6</b> - Concentração de coagulante 30 mg/L. ....	39
<b>Tabela 5.7</b> - Concentração de coagulante 32,5 mg/L. ....	39
<b>Tabela 5.8</b> - Turbidez remanescente para $V_s = 3,5$ cm/min. ....	41
<b>Tabela 5.9</b> - Valores de turbidez remanescente para $V_s = 3,5$ cm/min .....	42
<b>Tabela 5.10</b> - Tempo de floculação junto aos seus respectivos melhores gradientes e turbidez. ....	44
<b>Tabela 5.11</b> - Interpolação dos valores de turbidez remanescente para $T_f$ igual a 6,77. ....	50
<b>Tabela 5.12</b> - Resumo dos dados obtidos nesse estudo comparados a outros estudos. ....	53

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 5.1</b> - Parâmetros e resultados de outros estudos. ....	43
---	----

## 1 - INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de água (ETA) no Brasil foram projetadas para potabilizar as inúmeras águas naturais de diferentes mananciais, aos padrões de qualidade definidos pelos órgãos de saúde e agências reguladoras do país. A potabilização dessas águas naturais para fins de consumo humano, tradicionalmente tem como função essencial adequar a água bruta aos limites físicos, químicos e biológicos estabelecidos pela norma em vigor no Brasil, tornando o efluente da estação incapaz de transmitir qualquer malefício à população abastecida (Pádua *et al.*, 2009).

Cada água possui características particulares, que devem ser levadas em consideração pelo projetista, e relacionadas à operação e ao desempenho das unidades de tratamento. Como na maioria das vezes as experiências em escala real são onerosas ou de difícil execução, Bratby (1981, apud Di Bernardo, 2005) desenvolveu uma metodologia para otimizar os valores dos gradientes de velocidade médios de floculação em unidades com escoamento contínuo baseado em ensaios realizados em reatores estáticos com longo tempo de sedimentação, por se tratar de um procedimento experimental de baixo custo.

O modelo proposto por Bratby (1981, apud Di Bernardo, 2005) para esse tipo de metodologia, foi estudado por Pádua (1994, apud Di Bernardo, 2005), que propôs uma outra alternativa para estimar os gradientes de velocidade médios de floculação em unidades com escoamento contínuo a partir de ensaios em reatores estáticos. Esses ensaios, realizados em Jartestes, permitem determinar o tipo e dosagem de coagulante, pH de coagulação, gradiente de velocidade médio na mistura rápida e floculação, tempo de agitação na mistura rápida e floculação e eficiência de remoção de turbidez relacionada que será abordado ao longo desse trabalho.

Portanto, para a avaliação de mananciais a serem utilizados para abastecimento público, a aplicação desses procedimentos metodológicos se faz necessária. Conhecer as peculiaridades de uma determinada água bruta é importante para a otimização das unidades de mistura rápida e de mistura lenta no projeto de uma ETA.

O Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Mariana, responsável por oferecer à população serviços de tratamento de água e esgoto na região, vive um grave problema de

distribuição de água no distrito de Furquim e no subdistrito Barroca de Cachoeiro do Brumado. Nessas localidades, para o abastecimento público de água, foram instaladas várias pequenas captações, com tratamento insuficiente (apenas cloração), que, ao longo do ano, têm o comprometimento quali-quantitativo da água. Essas pequenas captações são realizadas em área rural, nas quais esgoto doméstico e a dessedentação dos animais comprometem a qualidade da água, que ao não passar por um tratamento adequado, pode promover agravos à saúde da população que a consome.

Alguns agravantes sinalizam a importância de um tratamento completo de água como por exemplo, as informações fornecidas pela Secretaria de Saúde de Mariana, o Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN), que registrou no período de 2007 a 2014 a ocorrência de duas importantes doenças de veiculação hídrica: a hepatite A (4 casos) e a gastroenterite (5.175 casos), em sua totalidade localizada no distrito sede, fato esse que provavelmente é resultante de um tratamento inadequado da água e que pode se dissimular a medida que a população nos distritos aumentam.

Junto a isso temos o crescimento populacional no qual a cidade já apresenta dificuldades no abastecimento de água. Em Mariana há um total de 54.219 habitantes, sendo 1.638 habitantes na região de Furquim e 2.261 habitantes em Cachoeira do Brumado (IBGE, 2010). Cabe mencionar que, segundo projeções do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce – PIRH (CBH DOCE, 2010), realizadas com base na população observada nos municípios mineiros nos últimos Censos Demográficos estima-se que em 2030 a população de Mariana atingirá 74.317 habitantes, que representa aproximadamente um aumento de 37% em 20 anos e que certamente agravará esse problema.

Vale ressaltar também que Mariana possui 4 ETA's, e todas elas atendendo o distrito sede, responsáveis por realizar o tratamento convencional da água que abastece cerca de 65% da população. O restante da população de Mariana é abastecido por água tratada apenas pelo processo de cloração com hipoclorito de cálcio que neste caso é realizado por meio de bombas dosadoras ou cloradores manuais. A resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) fala que para águas enquadradas na classe 1, é necessário o tratamento simplificado (filtração e desinfecção), o que não ocorre nos distritos de Mariana segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico de Mariana (2014). Este plano indica que há um planejamento de captação de água no rio Gualaxo do Sul, com o objetivo de minimizar os



problemas relacionados à falta de água. Portanto, é justificável o estudo desse manancial, seja da qualidade física, química e microbiológica da água, ou seja, por ensaios objetivando a definição de condições mais adequadas para o projeto de um futuro sistema de tratamento de água.

## **2 - OBJETIVOS**

- Obter parâmetros otimizados de coagulação e floculação na água do Rio Gualaxo do Sul para abastecimento público, usando policloreto de alumínio como coagulante.

### **2.1 - Objetivos específicos**

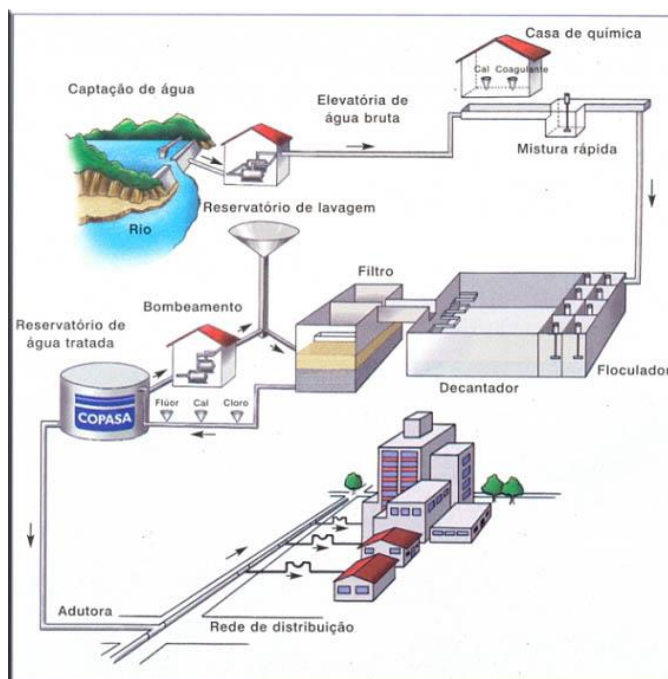
- Caracterização do manancial;
- Selecionar as condições de coagulação (pH e dosagem) melhores para água escolhida no estudo;
- Selecionar as condições de mistura rápida (gradiente de velocidade médio e tempo de mistura rápida);
- Selecionar as condições de floculação (gradiente de velocidade médio e tempo de floculação);
- Propor os melhores gradientes de velocidades nas câmaras do flocculador.

### 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 - Tratamento convencional – Etapa de Clarificação

Tem-se que 2817 municípios brasileiros contam com estações convencionais de tratamento de água no seu sistema de abastecimento e essas estações têm produzido uma margem de 69,2% a água distribuída tratada no país, traduzido em números, 39.282.607 m<sup>3</sup>/dia avaliado em 2008 (IBGE, 2010). Esse processo quando desenvolvido de acordo com as características das águas brutas e das condições operantes é capaz de apresentar resultados adequados às exigências da portaria em vigor (Item 3.3). Seus custos de implantação, operação e manutenção são moderados e apresentam baixo impacto ambiental quando comparados com outras técnicas existentes.

O tratamento apresenta 3 etapas: clarificação, filtração e desinfecção. A Figura 3.1 apresenta um sistema de abastecimento de água, desde a captação, até a distribuição predial, composto por um tratamento convencional. A clarificação é a primeira fase, e o foco do presente trabalho. É nessa etapa que ocorrem a coagulação, floculação e decantação (ou flotação). Esses processos têm como objetivo a remoção dos sólidos suspensos (turbidez), dos sólidos dissolvidos (cor) e de alguns micro-organismos. Geralmente são utilizados coagulantes nessa etapa.



**Figura 3.1** - Tratamento convencional da água.

Fonte: Copasa (2008)

A coagulação é responsável pela desestabilização das partículas coloidais e suspensas a partir de ações físicas e reações químicas. Na unidade onde ocorre a coagulação são adicionados coagulantes, normalmente sais de ferro ou de alumínio, que dissolvem os íons carregados positivamente, acarretando em fortes ligações com hidroxilas da água e liberando íons H<sup>+</sup>, sendo essa etapa denominada hidrólise. Em seguida, com a aproximação e colisão das partículas desestabilizadas, tem-se a formação dos flocos. O processo de coagulação é iniciado na unidade de mistura rápida das ETA's, o qual está presente quase a totalidade das tecnologias de tratamento (Libânio, 2010).

Existem diferentes mecanismos de coagulação que variam de acordo com a dose empregada do coagulante e do pH de coagulação. Os principais mecanismos são: adsorção, desestabilização, varredura, compressão da dupla camada e formação de pontes químicas. Dentre esses, a coagulação por varredura é a mais usual nas ETA's. Ela ocorre em função das doses de coagulante e do pH de coagulação, fazendo com que as partículas coloidais e as suspensas sejam envolvidas pelo precipitado de hidróxido de ferro e/ou de alumínio fazendo com que esse mecanismo passe a predominar. Tal mecanismo conduz a doses mais elevadas e conseqüentemente a formação de flocos com maior peso que se sedimentam com maior facilidade nas unidades de decantação (Libânio, 2010).

Após a dispersão do coagulante tem-se a floculação, que é formação de flocos a partir de um conjunto de fenômenos físicos que faz com que o número de partículas suspensas e coloidais existentes na massa líquida seja reduzido. Para que tal processo ocorra é necessário um maior tempo de detenção (ou de floculação) e um menor gradiente de velocidade, que torna possível a ocorrência de choques entre as partículas anteriormente desestabilizadas pela ação do coagulante e a conseqüente formação dos flocos, que a seguir são removidos por sedimentação ou flotação (Libânio, 2010).

A última fase da clarificação, a decantação, consiste em uma operação unitária onde são fornecidas aos flocos anteriormente formados, condições que permitam que os mesmos sejam depositados por ação da gravidade, com o objetivo de diminuir o afluxo de partículas às unidades filtrantes.

### 3.2 – Unidades de Mistura Rápida e de Floculação

Segundo Di Bernardo (2005) o projeto das unidades de mistura rápida e de floculação de uma estação de tratamento deve se basear em resultados experimentais realizados em instalações com reatores estáticos (Jarteste), ou em instalações piloto de escoamento contínuo.

Nas ETA's, a operação unitária de mistura rápida é usada com a finalidade de misturar os produtos químicos na água para a ocorrência da coagulação e a de mistura lenta (floculação) é responsável pela agregação das partículas desestabilizadas, com a formação de flocos.

Para que as partículas sejam desestabilizadas, deve ocorrer interação entre as partículas coloidais presentes na água bruta e os produtos de hidrólise do coagulante. Essa etapa de colisão ocorre nas três fases indicadas na Figura 3.2.

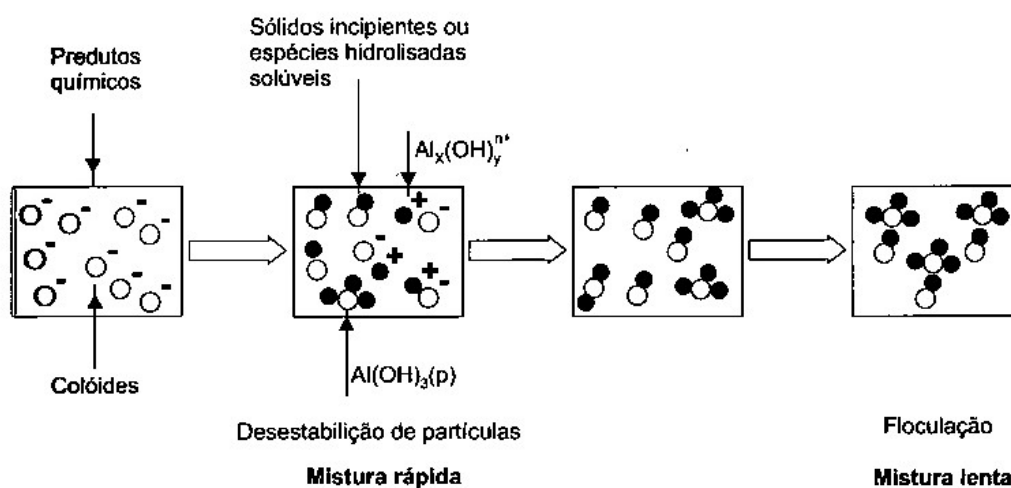
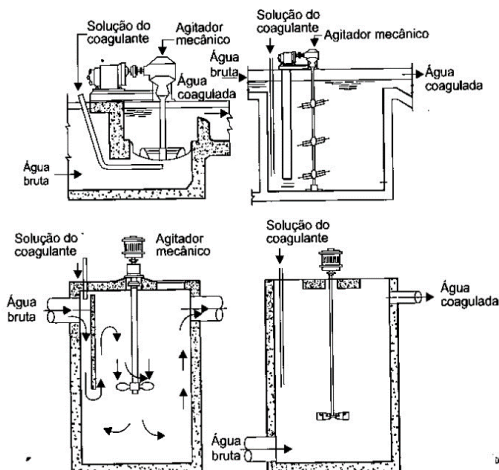


Figura 3.2 - Esquema de indicativo de mistura rápida e floculação.

Fonte: Di Bernardo (2005).

### 3.2.1 – Unidades de mistura rápida

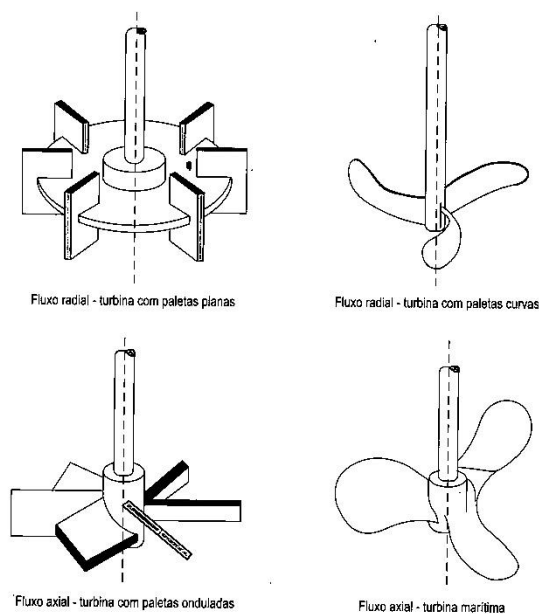
A agitação em unidade de mistura rápida pode ser realizada em dois tipos de dispositivos: mecânicos e hidráulicos. Os mecânicos são normalmente constituídos por uma câmara circular, quadrada ou retangular, e um misturador mecânico de eixo vertical com impulsores tipo turbina (Figura 3.3).



**Figura 3.3** - Esquema de agitadores mecânicos.

Fonte: Di Bernardo (2008).

As condições de mistura dependem do tipo de agitador empregado, este que dirá qual o tipo de escoamento ocorrerá no interior da câmara, axial ou radial. As turbinas de fluxo axial podem ser simples ou dupla, dependendo do tipo da hélice (Di Bernardo, 2008).

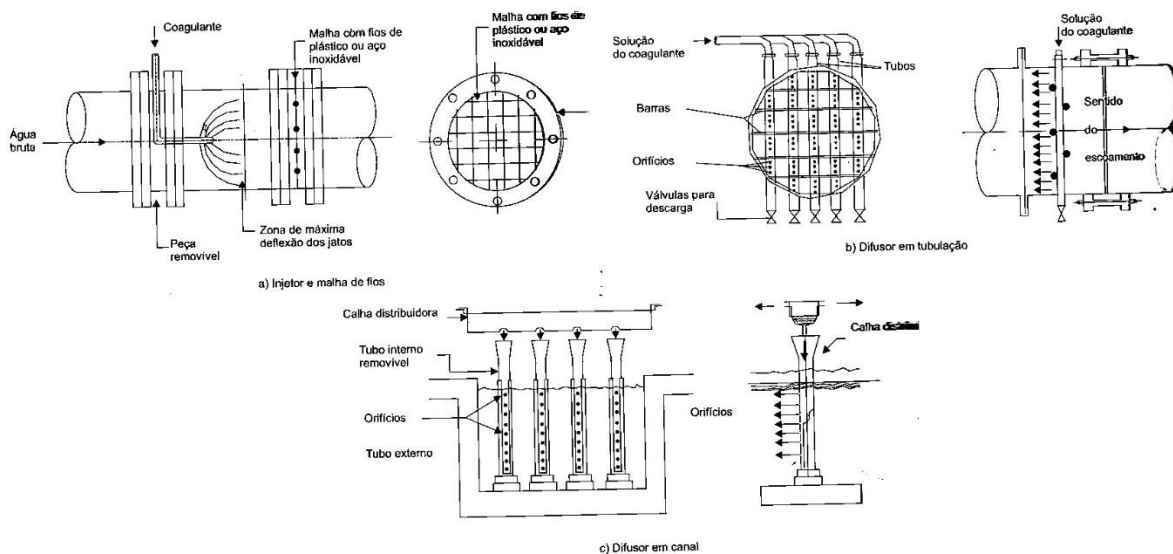


**Figura 3.4** - Tipos de hélices usadas nas mistura rápida.

Fonte: Di Bernardo (2008).

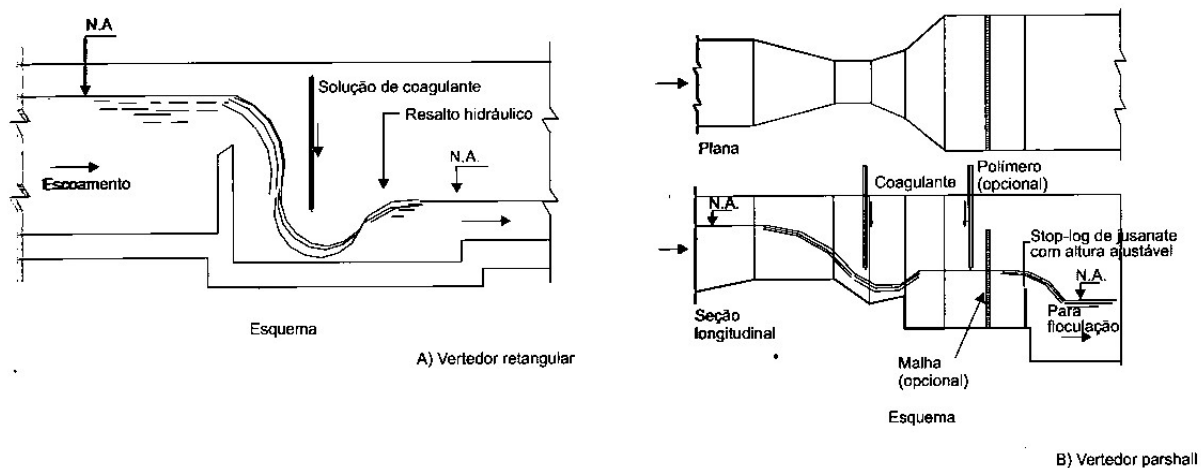
Segundo Sabogal Paz (2007), esses misturadores mecanizados apresentam como principais vantagens que o gradiente de velocidade pode ser modificado conforme a variação da vazão do afluyente à estação, e baixa perda de carga, e a maior desvantagem é o custo de implantação/utilização/manutenção.

As unidades de mistura rápida hidráulica podem ser por injetor e malha de fios, difusores e em ressalto hidráulico (vertedor retangular ou parshall), todos apresentados na Figuras 3.5 e 3.6.



**Figura 3.6** - Injetor e malha de fios, e difusores.

Fonte: Di Bernardo (2008).



**Figura 3.5** - Ressonho hidráulico.

Fonte: Di Bernardo (2008).

Os misturadores hidráulicos do tipo vertedor são extensivamente utilizados nas ETA's do Brasil (Sabogal Paz, 2007 apud Vigneswaran e Visvanathan, 1995). Essas unidades possuem custos muito baixo de implantação e manutenção e não precisam de energia elétrica.

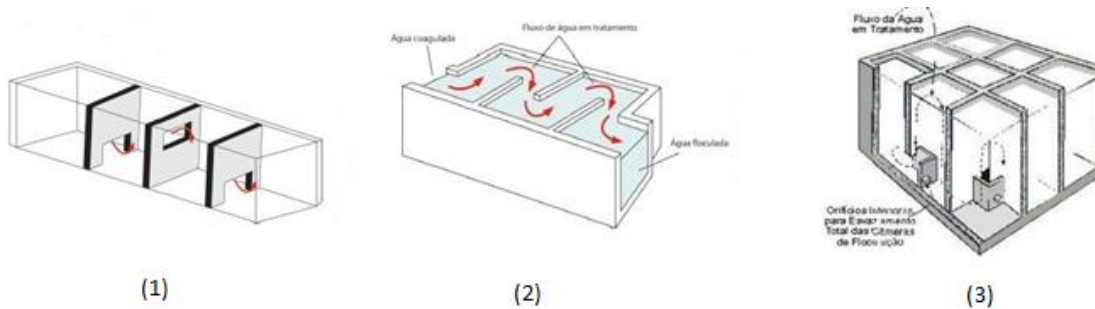
### **3.2.2 – Unidades de floculação**

A floculação vem logo após à mistura rápida. O tempo de percurso da água coagulada até a unidade de floculação deve ser inferior a 1 min., com ressalva a algumas exceções, que podem chegar a 3 min. com ajuda de dispositivos especiais (NBR 12216, 1992).

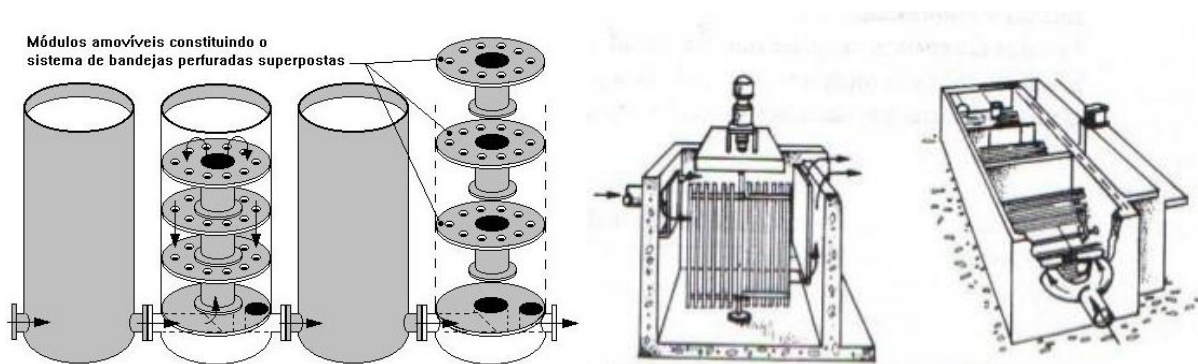
Os sistemas de floculação podem ser classificados em hidráulicos ou mecanizado. Dentre os hidráulicos, os mais comuns encontrados nas estações são os de chicanas com escoamento vertical ou horizontal e, com menor frequência, o tipo alabama (Figura 3.7), e de escoamento helicoidal. Também citado por Vianna (2002) há o floculador de bandeja com objetivo de atender estações de tratamento de água pré-fabricadas.

Já os sistemas mecanizados de floculação, podem possuir equipamentos com eixo vertical ou horizontal, com rotores ou paletas giratórias paralelas ou perpendiculares ao eixo, ou rotores constituídos de turbinas com pás ou hélices. Ao escolher esse sistema deve-se observar diversos pontos como: a qualidade da água bruta, a coagulação, o tamanho das unidades, a vazão, além da necessidade de pessoal qualificado para sua operação e manutenção.

Os sistemas hidráulicos apresentam vantagens e desvantagens quando comparados aos mecanizados. Dentre as desvantagens pode-se citar: a baixa flexibilidade em relação a vazão, a impossibilidade de variar ou ajustar o gradiente e a alta perda de carga. Já entre as vantagens estão os menores custos de implantação e a não exigência de pessoal qualificado na operação e a manutenção do mesmo.

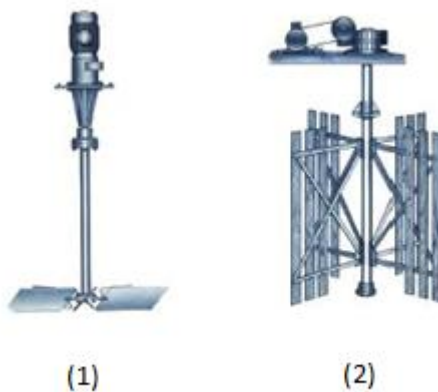


**Figura 3.7 – Floculadores:** (1) Chicana vertical (2) Chicana horizontal (3) Alabama.  
**Fonte :** Revista TAE (2013).



**Figura 3.9 - Floculador hidráulico do tipo bandeja**  
**Fonte :** Revista TAE (2013).

**Figura 3.8 - Floculadores mecânicos com eixo vertical, e horizontal respectivamente.**  
**Fonte:** adaptado de VIANNA (2002).



**Figura 3.10 - Agitadores em formato de turbina (1) e pá (2).**  
**Fonte:** Revista TAE (2013).



Segundo Sabogal Paz (2007) há um diferencial entre os usos dos agitadores. Se tratando por exemplo de gradiente de velocidade, os agitadores de pá são recomendados para gradientes inferiores a  $30 \text{ s}^{-1}$ , e os de turbina maiores que  $30 \text{ s}^{-1}$  e a outra diferença é que os agitadores de pás não são aplicáveis para vazões menores que 25 L/s.

### **3.3 - Legislação vigente no Brasil**

Atualmente vigora no Brasil a Portaria número 2914 do Ministério da Saúde de 12 de dezembro de 2011, a qual estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Ministério da Saúde, 2011). Almejando atender as exigências desta portaria, as estações de tratamento de água possuem programas rotineiros de monitoramento de parâmetros químicos e biológicos.

O projeto de construção de ETA's no Brasil está descrito na NBR 12216 (1992) onde são fixadas as condições para a elaboração de projeto de estação de tratamento de água destinada à produção de água potável para abastecimento público. As condições ideais em termos de gradiente de velocidade médio, tempo de mistura na coagulação e na floculação, velocidade de sedimentação e a concentração do coagulante a ser utilizado devem ser determinadas preferencialmente através de ensaios de laboratório, estes que foram realizados nas etapas seguintes do trabalho. Quando estes ensaios não podem ser realizados, deve ser observada a seguinte orientação: i) gradientes de velocidade entre  $700\text{s}^{-1}$  e  $1100\text{s}^{-1}$ , em um tempo de mistura menor ou igual a 5s; ii) 20 min e 30 min, para floculadores hidráulicos, e entre 30 min e 40 min, para os mecanizados; iii) estações com capacidade de até  $1000 \text{ m}^3/\text{dia}$  igual a 1,74 cm/min, iv) estações com capacidade entre 1000 e  $10000 \text{ m}^3/\text{dia}$ , em que é possível garantir bom controle operacional, 2,43 cm/min; v) estações com capacidade superior a  $10000 \text{ m}^3/\text{dia}$ , 2,80 cm/min.

Para Di Bernardo (2005) os valores usuais em ETA's estão previstas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

**Tabela 3.1** - Parâmetros gerais de projeto de unidades de mistura rápida para coagulação por varredura.

Coagulante	$G_{mr}$ ( $s^{-1}$ )	$T_{mr}$ (s)	$(G_f \times T_f)$	Observação
Sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso clorado, hidroxicloreto de alumínio, tanato, etc.	500 a 1.200	$\leq 60$	10.000 a 30.000	Coagulação por varredura

(\*) Observação:  $G_{mr}$  = Gradiente de velocidade médio na mistura rápida,  $T_{mr}$  = Tempo de mistura rápida,  $G_f$  = Gradiente de velocidade médio na floculação e  $T_f$  = Tempo de floculação.

Fonte: Di Bernardo (2005).

**Tabela 3.2** - Parâmetros gerais de projeto de unidades de floculação.

Parâmetro	Unidade mecanizada	Unidade hidráulica
Tempo de agitação (min.)	20 a 60	5 a 30
Gradiente de velocidade médio ( $s^{-1}$ )	70 a 10	50 a 10
Número de câmaras em série ou de trechos de canais com chicanas	$\geq 3$	$\geq 3$
Produto ( $G_f \times T_f$ )	15.000 a 80.000	6.000 a 40.000

Fonte: Di Bernardo (2005).

Para Di Bernardo (2005), deve-se ressaltar que as tecnologias e implantações de tratamento sugeridas na literatura são frequentemente uma simplificação da realidade que visa apenas a servir de orientação, pois a definição da tecnologia e implementação dependerá muitas vezes da realização de ensaios em laboratório ou em escala piloto.

### 3.4 - Características físicas da água

Neste tópico foram discutidos os principais parâmetros físicos de qualidade da água utilizados nesses estudos.

#### ➤ TURBIDEZ

Segundo Di Bernardo (1993), a turbidez pode ser descrita pela quantidade de partículas em suspensão na água, como por exemplo de natureza orgânica (algas, plâncton) ou inorgânicas (metais, areia, resíduos domésticos e industriais) e são transportadas para o ambiente aquático pela precipitação e outras intempéries. Este parametro físico está muito presente nas águas em gerais, e é medido através da quantificação da resistência da luz ao passar pelo meio em análise, se tornando determinante na aceitação ou rejeição da água tratada, uma vez que a turbidez integra um dos requisitos básicos no controle da potabilidade, na medida em que índices elevados podem indicar um processo de tratamento precário.

São utilizados, na determinação desse parâmetro, aparelhos denominados turbidímetros, constituído de um nefelômetro, e as leituras são expressas em unidade de turbidez (uT) ou unidade nefelométrica de turbidez (UNT). Valores de turbidez acima do aceitável podem prejudicar a etapa de desinfecção, pois partículas suspensas conferem proteção a microrganismos diversos, tornando-os resistentes a agentes desinfetantes como o cloro, além de deixar a água com um aspecto turvo, tornando-a esteticamente indesejável (FRANCO, 2009).

#### ➤ COR

Nas águas naturais, a cor é proveniente da presença de matéria orgânica originada da decomposição de plantas e animais, denominadas substâncias húmicas. Antigamente, a remoção de cor era considerada apenas por motivo estético. Porém, a descoberta de que tais substâncias são precursoras de formação de trihalometanos e de outros compostos organoclorados, se a desinfecção for feita com cloro livre, fez com que este parâmetro tornasse muito

importante. A cor varia com o pH da água sendo mais facilmente removida a pH mais baixo (Di Bernardo, 2005).

A cor pode ser definida como aparente ou verdadeira (amostra sem a presença de turbidez). Em análises laboratoriais, a cor verdadeira pode ser determinada após a submissão da amostra à centrifugação ou filtração, de acordo com Standard Methods (2012).

#### ➤ CONDUTIVIDADE

Segundo Di Bernardo (2005), a condutividade elétrica depende da quantidade de sais dissolvidos na água, sendo aproximadamente proporcional à sua quantidade. A determinação da condutividade elétrica permite estimar de modo rápido a solubilidade de sólidos totais dissolvidos (STD) presentes na água. Para valores elevados de STD, aumenta a solubilidade dos precipitados de alumínio e de ferro, o que influi na cinética da coagulação. Também é afetada a formação e precipitação de carbonato de cálcio, favorecendo a corrosão.

#### ➤ TEMPERATURA

Segundo Pavanelli (2001), a temperatura é um importante fator ao longo do tratamento da água, pois é a mesma que tem considerável influência no desempenho de várias unidades como por exemplo a mistura rápida, a floculação, a desinfecção, as reações de hidrólise do coagulante e a solubilidade dos gases.

O equipamento Jarteste fornece um fator de correção da temperatura da água para que todos os ensaios sejam feitos com temperatura fixa.

### **3.5 - Características químicas da água**

Neste tópico serão discutidos os principais parâmetros químicos de qualidade da água utilizados nesses estudos.

➤ pH

O pH é um parâmetro utilizado na determinação da concentração de íons  $H^+$  no meio analisado. É uma medida muito importante, uma vez que seus valores influenciam reações químicas e bioquímicas, além de indicar se a água em questão é ácida ou alcalina.

A variação nos valores de pH gera um aumento na velocidade de oxidação de metais, fator que é considerado determinante nos processos de corrosão ou entupimento de tubulações das redes de distribuição de água. De acordo com a portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, a água distribuída a população deve apresentar um pH de 6,0 a 9,5.

➤ ALCALINIDADE

Conforme exposto por Pavanelli (2001) e Di Bernardo (1993), a alcalinidade pode ser considerada uma medida de quantificação da capacidade da água de neutralizar os ácidos presentes. A introdução de policloreto de Alumínio, influencia diretamente nos índices de acidez e alcalinidade, tornando necessário a utilização de alcalinizantes para restaurar o equilíbrio dos parâmetros.

Os valores de alcalinidade influenciam no bom desempenho da coagulação e floculação, sendo necessário que a água em questão não possua valores extremos de alcalinidade. Uma vez que sejam identificados valores muito altos ou baixos deve-se utilizar produtos que são capazes de corrigir de maneira artificial a alcalinidade. Dentre esses produtos pode-se citar a cal hidratado e carbonato de sódio para as situações de baixa alcalinidade, e a acidificação para alcalinidades elevadas. Dessa maneira os mecanismos de coagulação poderão ser ativados e a floculação pode ser realizada com sucesso.

### **3.6 - Gradientes de velocidade em unidades de floculação – Método de Pádua**

A metodologia que será usada no trabalho foi proposta por Pádua (1994, apud Di Bernardo, 2005), a qual consegue determinar os gradientes de velocidade em unidades de floculação em

escoamento contínuo a partir da realização de uma série de ensaios estáticos (em Jarteste). A aplicação sugere a realização de uma série de ensaios em reatores estáticos para diversos gradientes de velocidade e tempos de floculação.

Pádua (1994, apud Di Bernardo, 2005) desenvolveu a metodologia a partir dos dados de Mendes (1989, apud Di Bernardo, 2005), no qual por método gráfico se tem o tempo de floculação em abcissas e os valores da cor remanescente (ou turbidez) remanescente mínima (correspondente aos gradientes de velocidade ótimos de floculação,  $G_f$ ) nas ordenadas, como mostra a Figura 3.11. Então, pode-se fixar o tempo de floculação a ser empregado no projeto de uma ETA, onde é observado que a partir de determinado tempo a turbidez (ou cor aparente) remanescente mínima decresce muito lentamente, não sendo vantajoso exceder a esse tempo, pois implicaria a necessidade de construção de unidades de floculação de maiores dimensões, sem contudo não haver aumento significativo da eficiência da floculação.

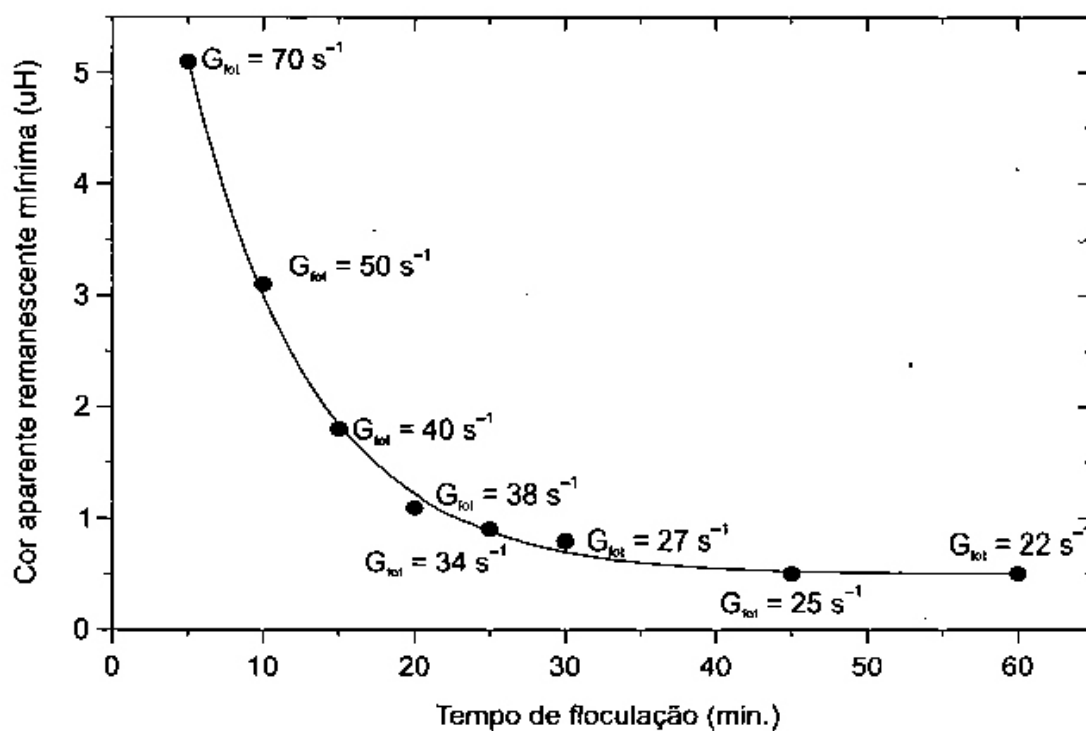


Figura 3.11 - Gradientes de velocidade ótimos de floculação

Fonte: Di Bernardo (2005)

Para a otimização da etapa de mistura rápida, Pádua (1994, apud Di Bernardo, 2005) manteve uma velocidade média na floculação ( $G_f$ ) igual a  $25 \text{ s}^{-1}$ , tempo de floculação ( $T_f$ ) igual 20min. e a velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) igual a  $3,5 \text{ cm/min}$ , e variaram os tempos de mistura rápida

( $T_{mr}$ ) de 5, 15, 30, 45 e 60s, para os gradientes de velocidade médios de reação ( $G_{mr}$ ) de 200, 400, 600, 800, 1000 e 1200  $s^{-1}$ .

Pádua (1994, apud Di Bernardo, 2005) procedeu então à otimização do tempo e gradiente de velocidade médio de floculação. O procedimento descrito no item foi repetido para os tempos de floculação de 5; 7,5; 10; 15; 20; 30; 45 e 60min., variando os gradientes de velocidade médios de floculação em 10, 20, 30, 40, 55 e 70 $s^{-1}$ .

A partir dos resultados dos ensaios de coagulação-floculação-sedimentação nos reatores estáticos, obteve os resultados da turbidez (ou cor aparente) remanescente para diversos gradientes de velocidade e tempos de floculação;

1. Após obter o tempo teórico de detenção  $T_d$  em cada câmara para o tempo de floculação escolhido, obtém-se o gradiente de velocidade médio que resulta na menor turbidez remanescente, se tornando esse o gradiente de velocidade a ser aplicado na primeira câmara;
2. Para a câmara subsequente, sabe-se que o afluente terá a turbidez remanescente igual a anterior. Então é preciso, para cada um dos gradientes de velocidade médios estudados, obter o tempo de floculação ( $T_f$ ) com o qual teoricamente iria resultar a turbidez remanescente igual a anterior, e caso necessário fazendo-se interpolação. A diante esse valor é somado ao valor do tempo teórico de detenção em cada câmara, e determina-se por interpolação, a turbidez remanescente, fazendo esse procedimento para todos os gradientes. E assim sucessivamente até ter o escalonamento completo com o menor valor de turbidez remanescente.

## **4 - MATERIAIS E MÉTODOS**

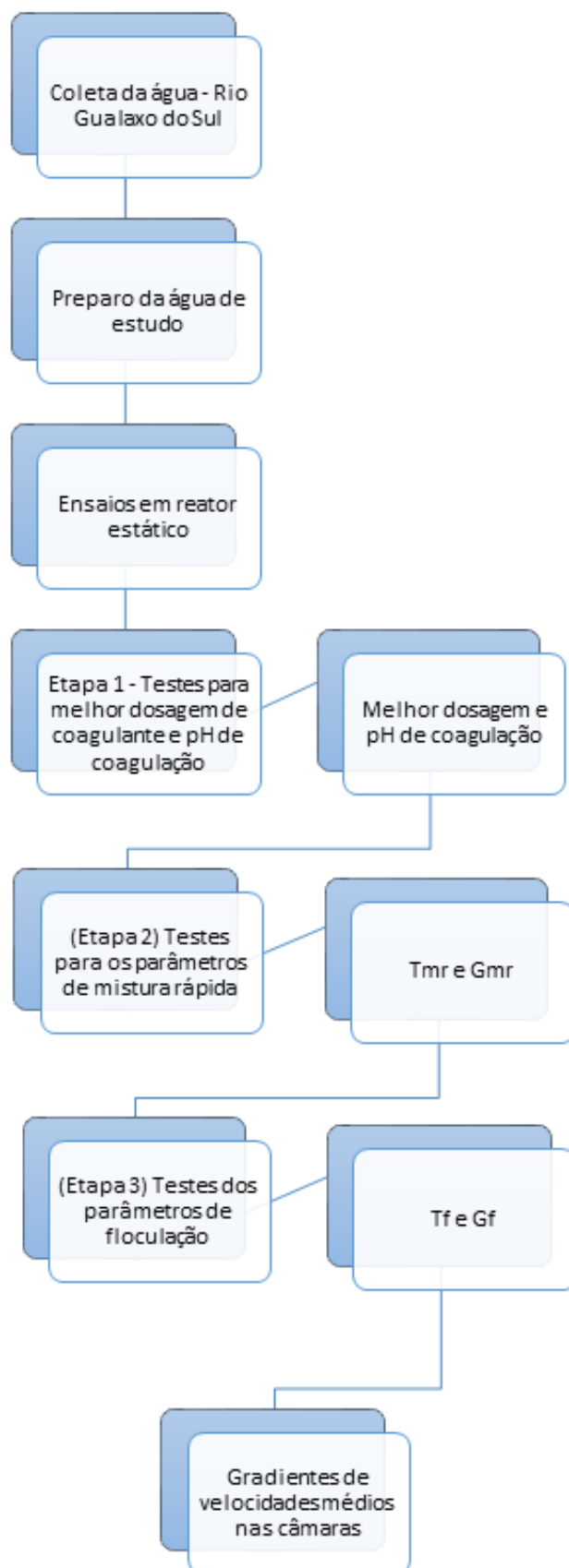
### **4.1 - Introdução**

Neste capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e a metodologia utilizados para a realização do trabalho na seguinte ordem:

1. Escolha do local de coleta da água do rio Gualaxo do Sul.
2. Caracterização da água bruta com base nos valores de turbidez, cor, pH e alcalinidade e condutividade.
3. Os ensaios de Jarteste foram divididos em 3 etapas.
4. Etapa 1: Determinação da melhor concentração de coagulante e pH de coagulação.
5. Etapa 2: Determinação dos melhores parâmetros para mistura rápida.
6. Etapa 3: Determinação dos melhores parâmetros para a floculação.
7. Determinação dos gradientes de velocidade nas câmaras do floculador a partir dos dados gerados nos ensaios.

Essas etapas estão melhor ilustradas no fluxograma apresentado na Figura 4.1.





**Figura 4.1** - Fluxograma da realização do trabalho.

#### 4.2 – Detalhamento do manancial e coleta

As águas naturais escolhidas para os experimentos foram coletadas no rio Gualaxo do Sul um dos principais rios que atravessam o município de Mariana. A bacia do rio Gualaxo do Sul tem sua cabeceira localizada na serra do Espinhaço, na divisa com os municípios de Ouro Preto e Ouro Branco, ambos situados no estado de Minas Gerais, Brasil. O rio Gualaxo do Sul é tributário da margem direita do rio do Carmo, que é um dos afluentes do rio Doce, cuja bacia é considerada uma das mais importantes de Minas Gerais e Espírito Santo (IBGE, 1985).

Segundo o Atlas Digital das Águas de Minas, a bacia do Gualaxo do Sul tem uma área de drenagem de aproximadamente 861,8 km<sup>2</sup>, uma vazão média de longo período de 14,44 m<sup>3</sup>/s e vazão mínima de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) de 3,57 m<sup>3</sup>/s.

O Art. 42 da resolução CONAMA 357/2005, no qual dispõe sobre a classificação dos corpos de água em âmbito federal, adota classe 2 para rios que ainda não passaram por enquadramento, podendo ser destinado ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional. Segundo o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), há uma proposta para enquadrar a região da Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) do rio Piranga – DO1 no qual o rio Gualaxo do Sul faz parte. Diante do exposto o rio pode ser inicialmente classificado com classe 2.

Contudo, uma grande preocupação na escolha da água foi o fato dos rios de Mariana terem alta contaminação por agentes tóxicos (CBH DOCE, 2010), resultante das condições geoquímicas da região e das atividades antrópicas desenvolvidas no entorno da bacia, que promovem o lançamento de esgotos domésticos, descarte inadequado de lixo urbano, rejeitos industriais, supressão da mata ciliar, entre outros. Além disso, a contaminação das águas superficiais é consequência das ações das empresas mineradoras e siderúrgicas, seja pelo aumento de sólidos suspensos, seja pela alteração química da água nas lagoas de decantação, utilizadas no beneficiamento do minério, fator esse que é um ponto positivo para o rio Gualaxo do Sul, por não apresentar muitas atividades minerárias e siderúrgicas, quando comparado ao rio do Carmo.

A coleta da amostra de água foi realizada no dia 26 de outubro de 2016, nas coordenadas geográficas 20° 22' 57" S e 43° 12' O entre o distrito de Furquim e o subdistrito Barroca (distância entre eles de 9,3 km) demonstrado na Figura 4.2. Foram coletados 200 litros de água em bombonas plásticas em polietileno com tampa e capacidade de 10 litros e armazenados em

um tanque de 500 litros no laboratório para manter a amostra sempre que necessário homogeneizada.



**Figura 4.2** – Estrada a esquerda da Rodovia MG-262, 3,4 km antes da entrada de Furquim em direção a Mariana-MG.

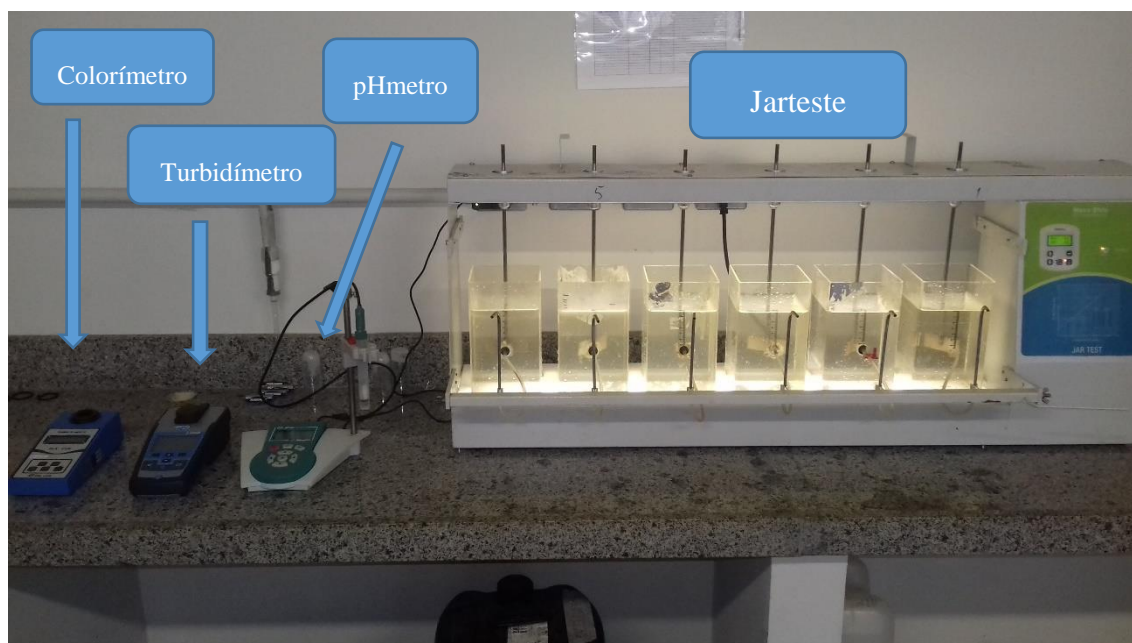
Fonte: Google Earth (2016).

### 4.3 – Materiais e equipamentos

Os equipamentos utilizados para a execução dos ensaios e para medir os parâmetros, estão descritos a seguir.

- Turbidímetro da marca Hack modelo 2100Q (Figura 4.3);
- Reator estático de bancada (Jarteste), da marca Nova Ética, modelo 218-6 LDB, com seis jarros com capacidade de 2L, cada, provido de eixos com paletas e rotações de variação programável entre 20 a 600 rpm. Destaca-se que as rotações deste aparelho são ajustadas por um controlador digital (Figura 4.3);
- Phmêtro digital de bancada da marca Metrohm modelo 827 pH lab, provido de display digital com três dígitos (Figura 4.3);
- Colorímetro da marca Del Lab modelo DLA – COR (Figura 4.3).

- Multiparâmetro Ultrameter 2 da marca Myron L. Company, modelo 6P (Figura 4.4)
- Equipamentos diversos como: Cronômetro digital, vidrarias variadas, termômetro de bulbo e copos descartáveis de 200 ml;



**Figura 4.3** - Equipamentos utilizados nos ensaios de bancada.

Fonte: Próprio autor (2016).



**Figura 4.4** – Multiparâmetro.

Fonte: Próprio autor (2016).

Foi utilizado como coagulante nos experimentos o Policloreto de Alúminio – PAC 18 referente a uma concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (massa/massa) de 16 à 18% cuja fórmula química é

( $Al_n(OH)_mCl_3$ ), fornecido pela empresa Bauminas Química. Este coagulante foi escolhido devido à sua ampla utilização nas ETA's da região, contribuindo, portanto, para aplicar os resultados da pesquisa à realidade.

Para correção de pH foi utilizado o Hidróxido de Cálcio com concentração de ( $Ca(OH)_2$ ) (massa/massa) de 19 à 21%, comercializado com o nome de Geocálcio fornecido pela empresa Miika Nacional. Para cada coagulante, a melhor dose foi sempre atrelada ao melhor pH de coagulação e tempo de coagulação.

#### **4.4 - Caracterização da água**

Todos os aparelhos foram devidamente calibrados no início de cada procedimento e a amostra de água estudada foi sempre homogeneizada. As análises dos parâmetros como cor verdadeira e alcalinidade foram realizados de acordo com os métodos da 22ª edição do Standard Methods (2012).

#### **4.5 – Ensaio no equipamento estático (Jarteste)**

Os ensaios no equipamento estático foram feitos na sequência e de acordo com os procedimentos descritos por Pavanelli (2001) e adaptadas pelo autor:

1. Colocar o coagulante nas cubetas de acordo com dosagem preestabelecida, com a pipetas;
2. Colocar com a pipeta, o alcalinizante ( $Ca(OH)_2$ ) dentro dos jarros, conforme pH desejado;
3. Homogeneizar a água da caixa d'água mexendo com colher de pau;
4. Com uso de medidores de volume encher os jarros com dois litros cada;
5. Ligar o aparelho e descer as paletas de forma a agitar um pouco os jarros, para misturar o alcalinizante, antes de adicionar o coagulante;
6. Programar a rotação da mistura rápida ( $G_{mr}$  – segundo o gráfico do aparelho) e o tempo de mistura rápida, e no mesmo instante que se liga o Programa do Jarteste é adicionado o coagulante;

7. Diminuir a rotação, após o  $T_{mr}$ , para  $G_f$  e ligar o cronômetro no  $T_f$ ;
8. Desligar o aparelho após decorrer  $T_f$ ;
9. O tubo de coleta no jarro está localizado a 7,00 cm abaixo da superfície da água. Determinando-se por esta distância a  $V_s$ . Iniciar com o tempo calculado para  $V_s$  a coleta considerando 12 s antes e 10 s depois, ou seja, 2 s servem para descartar o conteúdo do tubo de coleta, e depois por 20 s servem para coletar a amostra;
10. Medir os parâmetros desejados - pH, turbidez ou cor aparente da amostra nas cubetas de coleta.

#### 4.5.1 – Etapa 1 - Ensaios para determinação de melhor dosagem de coagulante e pH de coagulação

Para realização desses ensaios da melhor dosagem de coagulante e pH de coagulação, foram definidos parâmetros operacionais de acordo com as Tabelas 3.1 e 3.2 propostas por Di Bernardo (2005). Tais parâmetros são apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Parâmetros operacionais utilizados no Jarteste para os experimentos de coagulação e pH de coagulação.

Coagulação		Floculação		Sedimentação
Tempo de mistura rápida (s)	Gradiente de mistura rápida ( $s^{-1}$ )	Tempo de floculação (min)	Gradiente de floculação ( $s^{-1}$ )	Velocidade de sedimentação (cm/min)
10	850	20	35	3,5

Fonte: Di Bernardo (2005).

Primeiro foi feito um teste para analisar o pH da água e necessidade do alcalinizante para garantir o pH de ativação do coagulante. Nesse ensaio variou-se a concentração de coagulante de 10 à 35mg/L. A Velocidade de sedimentação estudada garante mais segurança que as propostas pela NBR 12216 (1992), e é usualmente utilizada segundo o Di Bernardo (2005).

Para os testes seguintes foram feitas variações na dosagem de coagulante visando obter os valores de pH de coagulação e a dosagem de coagulante ótima para água de estudo. As dosagens de coagulante variaram de 22,5 a 32,5mg/L de 2,5 em 2,5mg/L, e o pH de coagulação de 6,5 a 9 de aproximadamente 0,5 em 0,5. O Alcalinizante era adicionado através de conta gotas, garantindo o pH ideal para cada concentração de coagulante.

Com esses valores foram construídas as Tabelas 5.2 a 5.7, em cima da remoção de turbidez remanescente para a velocidade de sedimentação estudada.

A menor turbidez remanescente permitiu definir qual a dosagem de coagulante e pH de coagulação (dosagem de alcalinizante) correspondeu esse resultado se tornando os apropriados para essa água.

#### **4.5.2 - Etapa 2 - Otimização dos parâmetros de Mistura Rápida no Jarreste**

Com a dosagem de coagulante e alcalinizante encontrados no ensaio anterior, foi feita a seleção dos dos parâmetros de mistura rápida ( $T_{mr}$  e  $G_{mr}$ ). Nesta etapa foi fixado o tempo de floculação ( $T_f$ ) em 20 min. e o gradiente de velocidade médio da floculação ( $G_f$ ) em  $20 s^{-1}$  e coletada na velocidade de sedimentação de 3,5 (cm/min).

Foram variados os dois parâmetros de mistura rápida: o tempo de mistura rápida ( $T_{mr}$ ) e o gradiente de velocidade na mistura rápida ( $G_{mr}$ ). Os tempos de mistura rápidas estudados foram de 5, 10, 15, 20, 25 e 30s. O gradiente de velocidade na mistura rápida estudados foram de 400, 600, 800, 1000 e  $1200s^{-1}$ .

Foi construído um gráfico para a velocidade de sedimentação estudada, com o valor de turbidez remanescente para cada par de valor  $T_{mr}$  e  $G_{mr}$ , e foi escolhido o par que teve a melhor remoção de turbidez.

### **4.5.3 – Etapa 3 - Otimização dos parâmetros de floculação no Jarteste**

Uma vez determinados os valores de pH de coagulação, dosagem de coagulante, tempo e gradiente de velocidade médio de mistura rápida, foram realizados os ensaios de parâmetros de floculação ( $T_f$  e  $G_f$ ), coletada na velocidade de sedimentação de 3,5 (cm/min).

Foram variados os dois parâmetros de floculação: tempo de floculação ( $T_f$ ) e o gradiente de velocidade na floculação ( $G_f$ ). Os tempos de floculação estudados foram de 5, 10, 20, 30, 45 e 60 min. Os gradientes de velocidade na floculação estudado foram de 20, 30, 40, 55 e 70  $s^{-1}$ .

Com a obtenção dos valores de turbidez remanescente para o par de valores  $T_f$  e  $G_f$ , foi criado a Tabela 5.9 para a velocidade de sedimentação estudada. Além da Tabela 5.9, foram criados gráficos com os valores de turbidez remanescente ao longo dos tempos de floculação para cada gradiente de velocidade médio de floculação estudado. Esses valores serão analisados para a determinação dos gradientes de velocidade médios nas câmaras, segundo a metodologia proposta.

## **5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo será exposto os resultados dos ensaios, bem como as discussões sobre os mesmos.

### **5.1 – Caracterização da água**

A Tabela 5.1 apresenta os resultados das principais características da água de estudo. Durante cinco dias de ensaios, os parâmetros de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, alcalinidade e pH foram medidos para evitar divergências nas características da água de estudo.



**Tabela 5.1** - Valores da caracterização da água de estudo.

Parâmetro	Valores (números de dias (n) = 5)
pH	7,07 ± 0,2
Turbidez (uT)	14 ± 1
Cor Aparente (uH)	80 a 85
Cor Verdadeira (uH)	21,7 ± 1
Condutividade (µS/cm)	35,5 ± 1
Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	17 ± 2

Fonte: próprio autor (2016).

## 5.2 – Escolha dos parâmetros estudados na Etapa 1 (melhor dosagem de coagulante e pH de coagulação)

Devido à quantidade de água coletada para realização do trabalho e o grande volume necessário para realização dessa etapa, os ensaios foram realizados em cima das melhores faixas de concentração do coagulante em estudo (PAC) comumente utilizada nas ETA's brasileiras.

Foi verificado no primeiro teste (Tabela 5.2) que sem a presença de alcalizante, o pH da água ficou abaixo do pH de ação do PAC, cenário que a formação de flocos é baixa também e como consequência pode até aumentar a turbidez da água de estudo.

**Tabela 5.2** - Ensaio 1: Teste sem a presença de alcalinizante

Jarro	Concentração do coagulante (mg/L)	pH da coagulação	Turbidez (uT)
1	10	6,62	9,14
2	15	6,49	10,5
3	20	6,32	12,5
4	25	6,22	13,4
5	30	6,07	13,8
6	35	5,88	20,2

Fonte: próprio autor (2016).

Ao final, foram realizados seis ensaios, cinco deles com uso de alcalinizante para correção de pH. De posse desses resultados, foi possível a construção das Tabelas 5.3 à 5.7 de coagulação,

no qual apresentou a melhor dosagem de coagulação por pH de coagulação apresentadas a seguir:

**Tabela 5.3** - Concentração de coagulante 22,5 mg/L.

Jarro	Concentração do coagulante	pH da coagulação	Turbidez (uT)
1	22,5 mg/L	6,41	12,8
2		6,89	7,86
3		7,53	9,11
4		8,24	4,8
5		8,51	3,88
6		8,93	3,12

Fonte: próprio autor (2016).

**Tabela 5.4** - Concentração de coagulante 25 mg/L.

Jarro	Concentração do coagulante	pH da coagulação	Turbidez (uT)
1	25 mg/L	6,54	12,8
2		7,1	7,86
3		7,61	9,11
4		8,14	4,8
5		8,67	3,88
6		8,9	3,12

Fonte: próprio autor (2016).

**Tabela 5.5** - Concentração de coagulante 27,5 mg/L.

Jarro	Concentração do coagulante	pH da coagulação	Turbidez (uT)
1	27,5 mg/L	6,46	9,55
2		6,85	7,7
3		7,55	7,47
4		8,08	5,04
5		8,54	8,04
6		8,78	4,51

Fonte: próprio autor (2016).

**Tabela 5.6** - Concentração de coagulante 30 mg/L.

Jarro	Concentração do coagulante	pH da coagulação	Turbidez (uT)
1	30 mg/L	6,51	11,1
2		7,06	5,34
3		7,49	5,48
4		8,29	2,76
5		8,51	3,04
6		9,02	3,58

Fonte: próprio autor (2016).

**Tabela 5.7** - Concentração de coagulante 32,5 mg/L.

Jarro	Concentração do coagulante	pH da coagulação	Turbidez (uT)
1	32,5 mg/L	6,55	11,4
2		6,94	6,12
3		7,51	5,42
4		8,2	3,01
5		8,76	3,24
6		9,12	3,13

Fonte: próprio autor (2016).

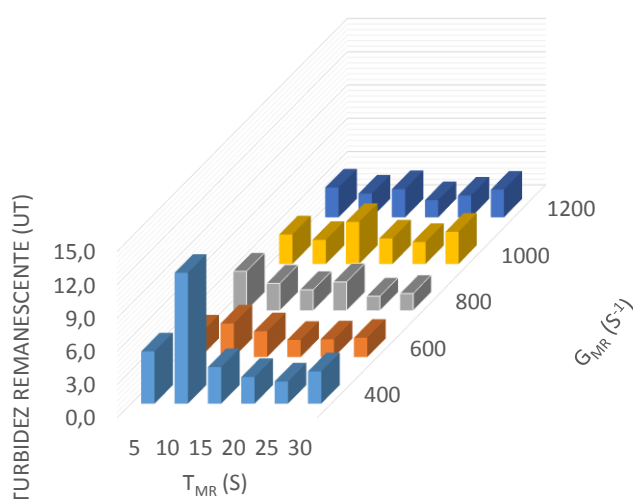
O par de valores “dosagem de coagulante e pH de coagulação” escolhido foi 30 mg/L e 8,29 respectivamente (valor apresentado em cinza na Tabela 5.6). Esse valor de pH correspondeu a faixa em torno de 8 a 8,5 nas etapas seguintes, tentando sempre convergir para o mesmo.

### 5.3 - Escolha dos parametrôs estudados na Etapa 2 (Mistura rápida – $T_{mr}$ , $G_{mr}$ )

Conforme metodologia descrita no item 4.5.2, foram realizados os ensaios para escolha dos parâmetros de mistura rápida. A dosagem de coagulante e o pH de coagulação usados nessa etapa foram os selecionados no item 5.2: 30 mg/L e pH de coagulação  $\approx$  8,30.

Foram analisados os gradientes de velocidade de mistura rápida ( $G_{mr}$ ) de 400, 600, 800, 1000 e 1200  $s^{-1}$ , e os tempos de mistura rápida ( $T_{mr}$ ) de 5, 10, 15, 20, 25 e 30s. Em cada ensaio, o Jarteste foi programado com um gradiente fixo e 30 segundos de mistura rápida, sendo que de cinco em cinco segundos se adicionava o coagulante, fazendo que cada jarro tivesse o tempo de mistura rápida adequado para o mesmo gradiente.

Ao final da etapa foram concluídos cinco testes, um para cada gradiente de mistura rápida para a mesma velocidade de sedimentação adotada no trabalho. Gerou-se ao final deles a Figura 5.1 tridimensional onde seus eixos são: gradientes de velocidade, turbidez remanescente e tempo de mistura rápida.



**Figura 5.1** - Turbidez remanescente em função do tempo de mistura rápida por gradiente de mistura rápida para o tempo de sedimentação 3,5 cm/min.

**Fonte:** Tabela 5.8.

**Tabela 5.8** - Turbidez remanescente para  $V_s = 3,5$  cm/min.

Tempo de mistura rápida (s)	Valores de turbidez remanescente (uT) para $V_s = 3,5$ cm/min				
	$G_{mr}$ 400 $s^{-1}$	$G_{mr}$ 600 $s^{-1}$	$G_{mr}$ 800 $s^{-1}$	$G_{mr}$ 1000 $s^{-1}$	$G_{mr}$ 1200 $s^{-1}$
5	4,71	2,13	3,54	2,66	2,69
10	11,80	3,03	2,45	2,17	2,15
15	3,30	2,32	1,87	3,79	2,55
20	2,40	1,55	2,58	2,30	1,55
25	2,00	1,60	1,29	1,98	1,97
30	2,91	1,74	1,53	2,90	2,50

Fonte: próprio autor (2016).

A análise da Figura 5.1 mostra que os gradientes de velocidade 600 e 800  $s^{-1}$  apresentaram médias de valores muito boas para a água de estudo, seguido do gradiente 1200  $s^{-1}$ . O critério escolhido para a gama de resultados, foi a de menor turbidez remanescente. Assim, o par de valores escolhidos para as próximas etapas foi com o gradiente 800  $s^{-1}$  e tempo de mistura de 25 segundos (em cinza na Tabela 5.8).

Para o tempo de mistura rápida de 10 segundos e o gradiente de velocidade médio de 400  $s^{-1}$  houve uma variação brusca, provavelmente devido a erro na adição de alcalinizante ou coagulante na execução do ensaio.

### 5.5 – Escolha dos parâmetros estudados na Etapa 3 (Floculação – $G_f$ , $T_f$ )

Conforme metodologia descrita no item 4.5.3, foram realizados os ensaios para escolha dos parâmetros de floculação. A dosagem de coagulante e os pH de coagulação usados nessa etapa foram os selecionados no item 5.2: 30 mg/L e pH de coagulação  $\approx 8,30$ . O tempo de mistura rápida e gradiente foram selecionados no item 5.3, ou seja,  $T_{mr}$  de 25 s e  $G_{mr}$  de 800  $s^{-1}$

Foram analisados os gradientes de velocidade de floculação ( $G_f$ ) de 20, 30, 40, 55 e 70  $s^{-1}$  e o tempo de floculação ( $T_f$ ) de 5, 10, 20, 30, 45 e 60 min.. Cada ensaio o Jarresteste foi programado para um gradiente de velocidade de floculação, e rodou-se o ensaio com 60 min. de floculação. Para garantir que cada jarro do experimento tivesse um tempo de floculação diferente, a paleta

correspondente era erguida para o  $T_f$  desejado. Assim em um determinado tempo ora tinha jarros no processo de sedimentação, ora em processo de floculação.

Ao final dessa etapa foram concluídos cinco ensaios, um para cada  $G_f$  proposto, com a velocidade de sedimentação adotada no trabalho. Com os resultados de cada um dos tempos de floculação por gradiente de floculação foi construído a Tabela 5.9, com as turbidezes remanescentes, ao final de cada ensaio.

**Tabela 5.9** - Valores de turbidez remanescente para  $V_s = 3,5$  cm/min

Tempo de floculação (min.)	Valores de turbidez remanescente (uT) para $V_s = 3,5$ cm/min				
	$G_r 20 s^{-1}$	$G_r 30 s^{-1}$	$G_r 40 s^{-1}$	$G_r 55 s^{-1}$	$G_r 70 s^{-1}$
5	11,30	8,04	7,80	8,47	11,20
10	4,39	4,46	7,41	7,31	8,92
20	1,93	4,12	5,86	7,77	9,99
30	2,12	3,85	7,21	11,40	10,20
45	1,77	3,01	6,74	8,04	8,76
60	5,24	7,19	9,68	8,22	9,35

**Fonte:** próprio autor (2016).

Pavanelli (2001), observou que em vários estudos, com diferentes amostras de águas e tempos de sedimentação variados, demonstraram quando otimizados, a diversidade das águas em relação a esses parâmetros de coagulação e floculação, como mostrado no Quadro 5.1.

**Quadro 5.1** - Parâmetros e resultados de outros estudos.

PESQUISA	ÁGUA DE ESTUDO	$T_{mr}$ (s)	$G_{mr}$ ( $s^{-1}$ )	$T_f$ (min)	$G_f$ ( $s^{-1}$ )
MENDES (1989) Coagulante Sulfato de Alumínio	$V_s = 1\text{cm/min}$ Cor Verdadeira: 100 uC Cor Aparente: 131,9 uC Turbidez: 5 uT Alcal.: 40 mg/l de $\text{CaCO}_3$	2 otimizado	500 otimizado	30 otimizado	5,4 otimizado
COSTA (1992) Coagulante Sulfato de Alumínio	$V_s = 2\text{cm/min}$ Cor Verdadeira: 100 uC Cor Aparente: 150 uC Turbidez: 5 uT Alcal.: 30 mg/l de $\text{CaCO}_3$	5 arbitrado	700 arbitrado	40 arbitrado	10 arbitrado
BRITO (1998) Coagulante Sulfato de Alumínio	$V_s = 2,5\text{cm/min}$ Cor Aparente: 150 uC Cor Verdadeira: 12,5 uC Turbidez: 25 uT Alcal.: 33 mg/l de $\text{CaCO}_3$	5 otimizado	400 otimizado	20 otimizado	20 otimizado
BRITO (1998) Coagulante Cloreto Férrico	$V_s = 2,5\text{cm/min}$ Cor Aparente: 210 uC Cor Verdadeira: 20 uC Turbidez: 27 uT Alcal.: 23 mg/l de $\text{CaCO}_3$	15 otimizado	400 otimizado	20 otimizado	35 otimizado
CONCEIÇÃO (1997) Coagulante Sulfato de Alumínio	$V_s = 2,5\text{cm/min}$ Cor Aparente: 150 uC Cor Verdadeira: 70 uC Turbidez: 16 uT Alcal.: 50 mg/l de $\text{CaCO}_3$	20 arbitrado	600 arbitrado	30 arbitrado	20 arbitrado
DI BERNARDO A. S. (2000) Coagulante Sulfato de Alumínio	$V_s = 2,0\text{cm/min}$ Cor Aparente: 195 uC Cor Verdadeira: 32,5 uC Turbidez: 26 uT Alcal.: 25 mg/l de $\text{CaCO}_3$	10 otimizado	1000 otimizado	24 otimizado	25 otimizado
MARINELLI (1999) Coagulante Sulfato de Alumínio	$V_s = 2\text{cm/min}$ Cor Verdadeira: 29 uC Cor Aparente: 209 uC Turbidez: 25uT Alcal.: 25 mg/l de $\text{CaCO}_3$	20 arbitrado	1000 arbitrado	20 arbitrado	20 arbitrado
ESSE ESTUDO Coagulante: Policloreto de Alumínio	$V_s = 3,5\text{cm/min}$ Cor Verdadeira: 21,7 uC Cor Aparente: 80 uC Turbidez: 14 uT Alcal.: 17 mg/l de $\text{CaCO}_3$	25 otimizado	800 otimizado	20 otimizado	20 otimizado

Fonte: Pavanelli (2001), modificado pelo autor.

### 5.6 – Determinação dos gradientes de velocidade médios segundo metodologia proposta por Pádua (1994)

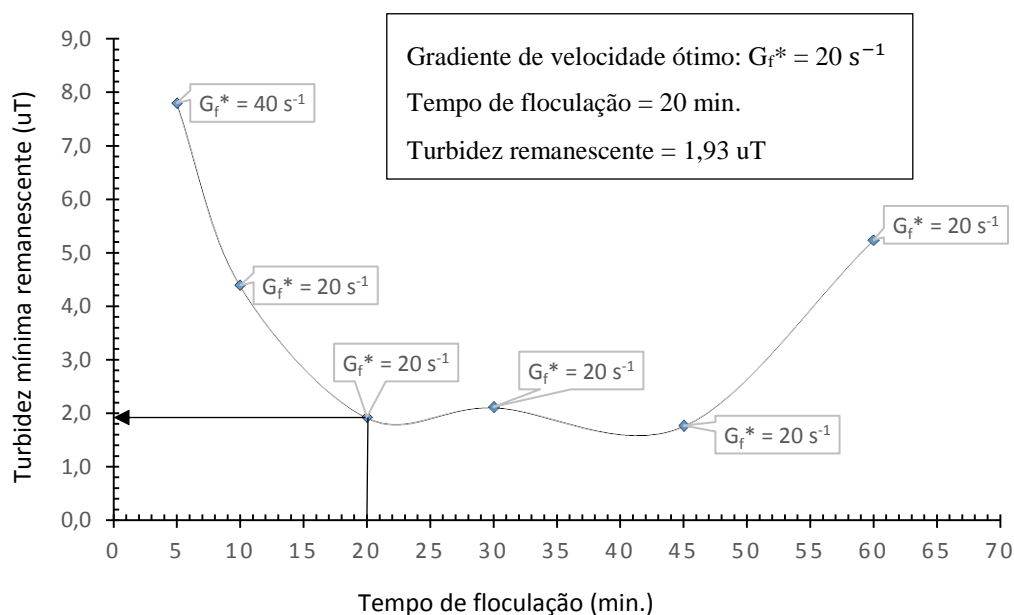
O primeiro passo para determinação do gradiente de velocidade ótimo e do tempo de total de floculação correspondente segundo metodologia proposta foi necessário extrair da Tabela 5.9 os gradientes de velocidade ótimo para cada tempo de floculação estudado e a respectiva turbidez. O resultado foi demonstrado na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10** - Tempo de floculação junto aos seus respectivos melhores gradientes e turbidez.

$T_f$ (min.)	Turbidez remanescente (uT)	$G_{tot}$ ( $s^{-1}$ )
5	7,80	40
10	4,39	20
20	1,93	20
30	2,12	20
45	1,77	20
60	5,24	20

Fonte: Tabela 5.9.

O segundo passo para determinação do gradiente de velocidade ótimo e do tempo de total de floculação é analisar a Figura 5.2, gerada a partir da Tabela 5.9.



**Figura 5.2** - Turbidez mínima remanescente em função do tempo de floculação;  $V_s = 3,5$  min/cm (ensaios de Jarresteste).

**Fonte:** próprio autor (2016).

Percebe-se que na Figura 5.2 que após 20 min. de floculação, houve pouca redução nos valores de turbidez, ocorrendo até um aumento com 30 min. de floculação, e seguido de decréscimo novamente na turbidez remanescente. Logo o tempo ideal para floculação dessa água foi de 20 min. de floculação e gradiente de velocidade de  $20 s^{-1}$ , com turbidez remanescente igual a 1,93 uT. Esses foram os parâmetros escolhidos para representar a condição perfeita de floculação com gradiente para água de estudo.

Deste modo foi primeiramente pensado a hipótese com quatro câmaras de floculação em série e tempo de floculação de 20 min., correspondente a 5 min. de floculação em cada câmara no qual os gradientes resultaram na menor turbidez remanescente.

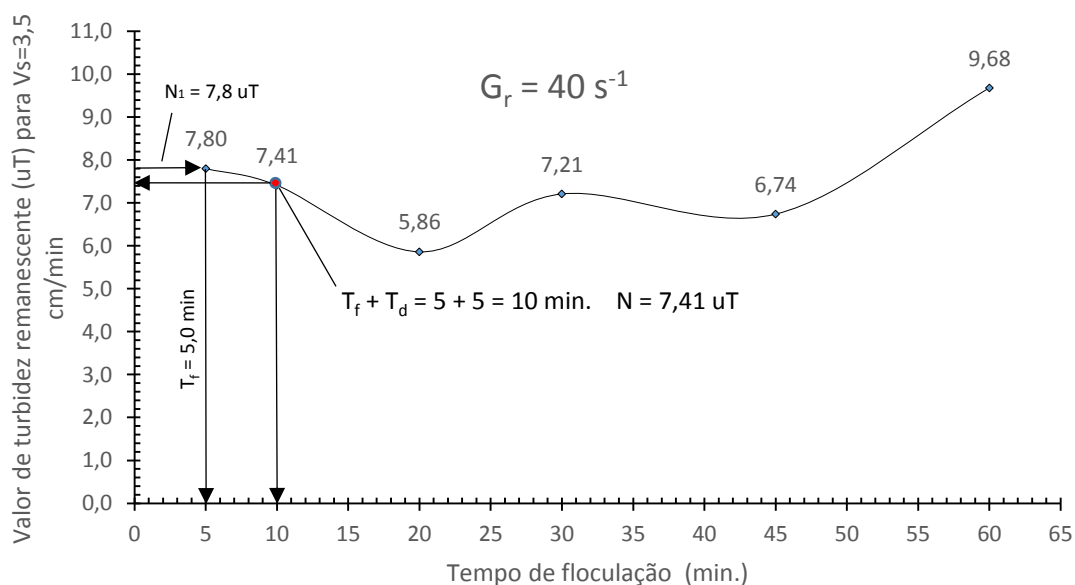
Na Tabela 5.10 pode ser observado o gradiente de velocidade da primeira câmara para o tempo de floculação igual a 5 min. ( $T_d = T_f / n^\circ$  câmaras = 5 min.) que é  $G_f^1 = 40 s^{-1}$  e também a turbidez remanescente igual a 7,80 uT.

A seguir determinou-se o gradiente de floculação da segunda câmara, sabendo-se que deve apresentar turbidez remanescente igual a 7,8 uT resultante no final da primeira câmara para a velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) em estudo. Dessa maneira foi preciso fazer para todos os



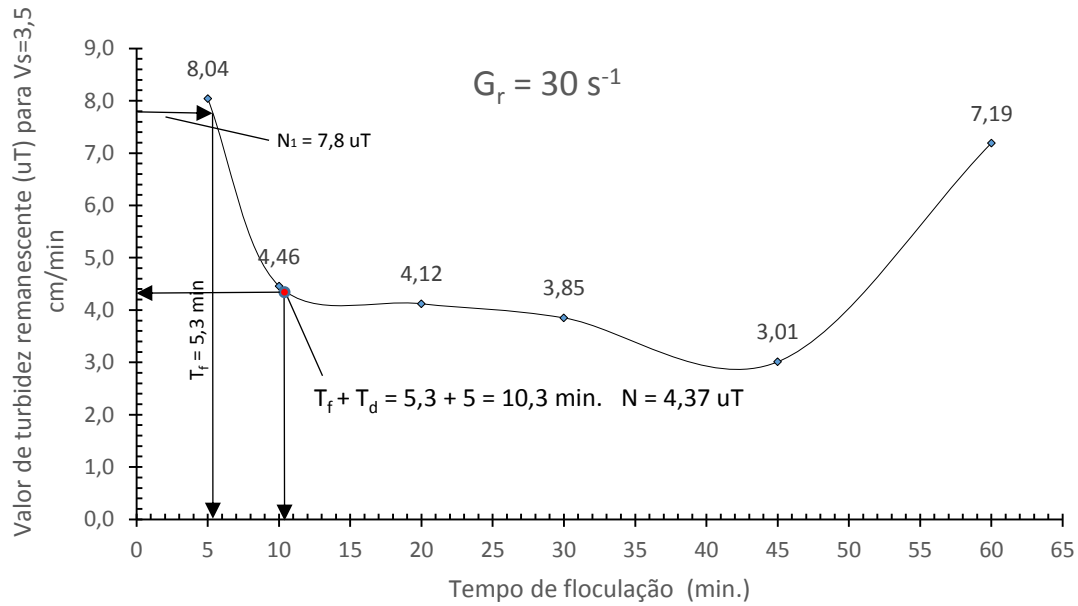
gradientes de velocidade médios estudados para a obtenção do tempo de floculação ( $T_f$ ) com o qual resultou a turbidez remanescente igual a 7,8 uT e interpolando caso necessário (Figuras 5.3 à 5.5). Somou-se a este tempo o valor do tempo teórico de detenção em cada câmara, no caso,  $T_d = 5$  min, e determinou-se, novamente por interpolação, a turbidez remanescente para cada um dos gradientes de velocidade (turbidez remanescente do efluente da segunda câmara  $N_{(2,40)}$ ). O gradiente de velocidade médio de floculação para o qual resultar o menor valor de turbidez remanescente será utilizada na segunda câmara. Esse método se repetiu até obter os valores de  $G_f$  para as demais câmaras da unidade de floculação ( $N_{(2,30)}$  e  $N_{(2,20)}$ ).

Vale ressaltar que não foi preciso estudar valores de gradiente de velocidade maiores que o determinado na primeira câmara de floculação, pois não é possível valores de turbidez remanescente menores em ordem crescente dos gradientes.



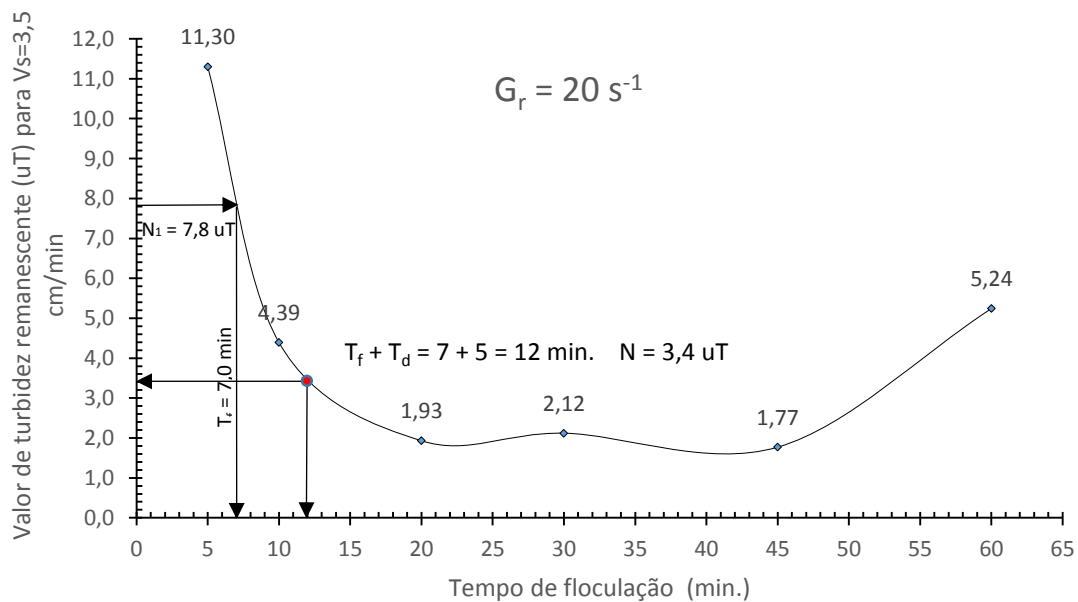
**Figura 5.3** - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação,  $G_f = 40 \text{ s}^{-1}$  (determinação  $G_f^2$ ).

**Fonte:** próprio autor (2016).



**Figura 5.4** - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação,  $G_r = 30 \text{ s}^{-1}$  (determinação  $G_r^2$ ).

Fonte: próprio autor (2016).

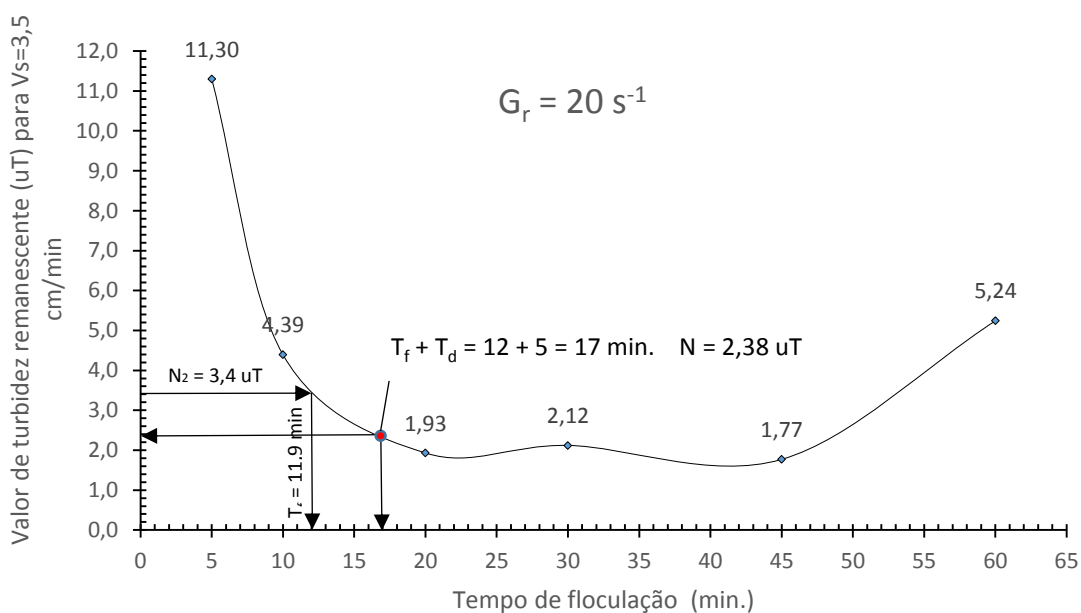


**Figura 5.5** - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação,  $G_r = 20 \text{ s}^{-1}$  (determinação  $G_r^2$ ).

Fonte: próprio autor (2016).

Portanto, o gradiente de velocidade ótimo na segunda câmara de floculação deve ser de  $20 \text{ s}^{-1}$ , uma vez que resultou em menor turbidez remanescente ( $N_{(2,20)} = 3,4 \text{ uT} < N_{(2,30)} = 4,27 \text{ uT} < N_{(2,40)} = 7,41 \text{ uT}$ ).

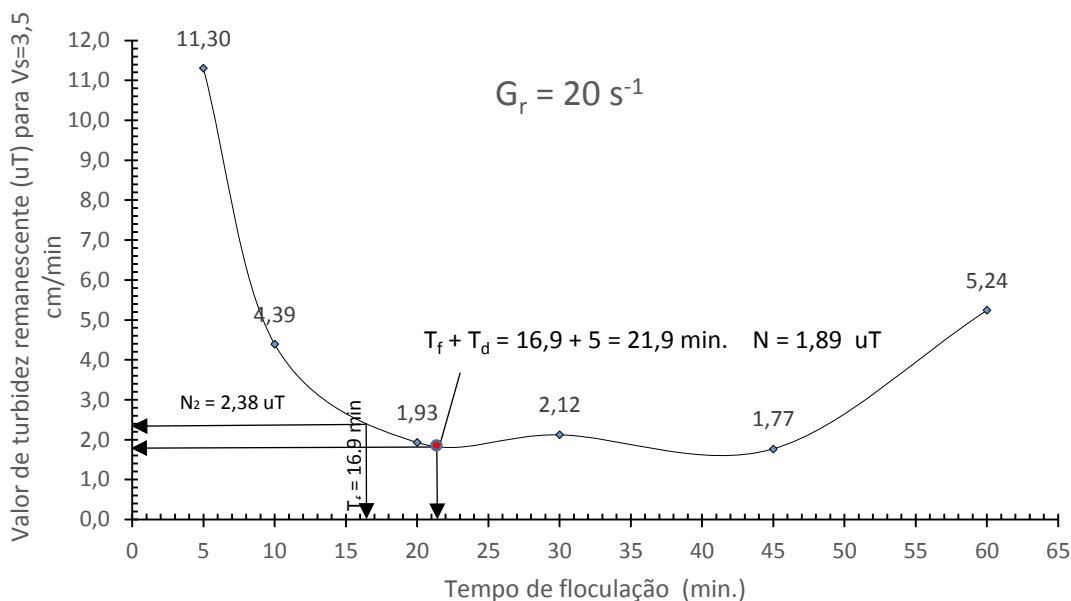
De mesmo modo o procedimento descrito para a determinação de velocidade na segunda câmara foi utilizado para determinação do gradiente na terceira câmara de floculação ( $G_f^3$ ). Como o gradiente na segunda câmara era de  $20 \text{ s}^{-1}$ , foi estudado apenas o gradiente de  $20 \text{ s}^{-1}$  (Figura 5.6).



**Figura 5.6** - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação,  $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$  (determinação  $G_f^3$ ).

**Fonte:** próprio autor (2016).

Então, o gradiente de velocidade na terceira câmara de floculação deve ser de  $20 \text{ s}^{-1}$  e a turbidez na saída da terceira câmara de floculação resultou em  $2,38 \text{ uT}$ . De mesmo modo para a quarta câmara teremos:



**Figura 5.7** - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação,  $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$  (determinação  $G_f^4$ ).

**Fonte:** próprio autor (2016).

A combinação ótima de gradientes para a água em estudo, com quatro câmaras em série e tempo de floculação de 20 min. foi igual a  $40 \text{ s}^{-1}$  na primeira, e  $20 \text{ s}^{-1}$  nas outras três.

Foi testado a hipótese do floculador com três câmaras e os mesmo parâmetros ótimos de floculação, ou seja, 20 min. de floculação com gradiente de velocidade de  $20 \text{ s}^{-1}$  e turbidez remanescente igual a 1,93 uT.

Esse tempo de floculação de 20 min. corresponde a 6,67 min. de floculação em cada câmara para determinar a combinação dos gradientes nas três câmaras que resulta menor turbidez remanescente.

O gradiente de velocidade da primeira câmara pode ser identificado fazendo interpolação dos valores na Tabela 5.9, para o tempo de floculação igual a 6,67 min ( $T_d = T_f / n^\circ \text{ câmaras} = 6,67 \text{ min.}$ ) resultando  $G_f^1 = 30 \text{ s}^{-1}$  e turbidez remanescente igual a 6,77 uT (Tabela 5.11).

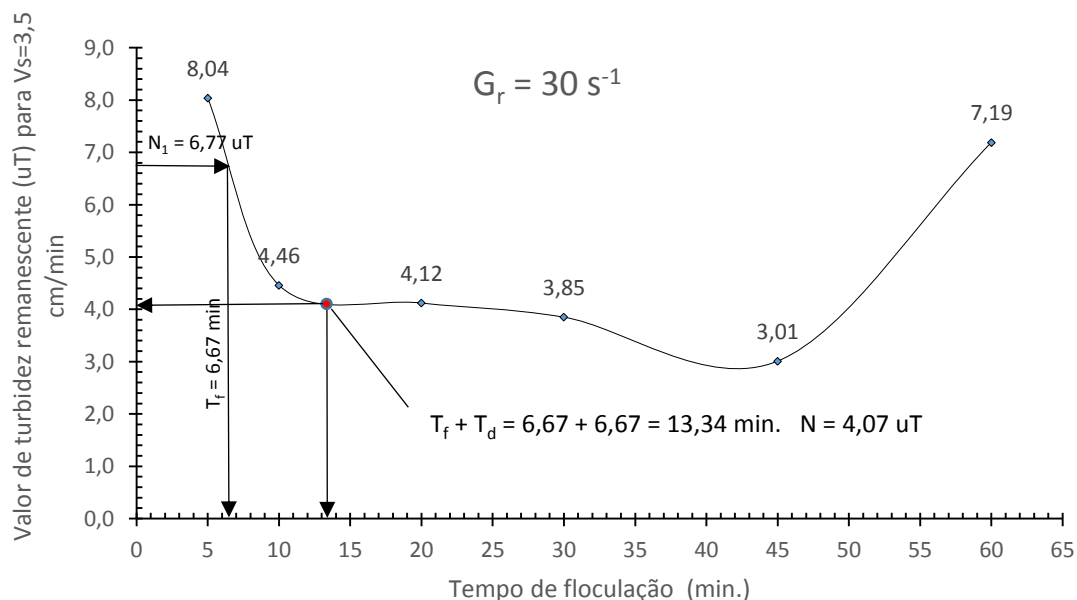
**Tabela 5.11** - Interpolação dos valores de turbidez remanescente para  $T_f$  igual a 6,77.

Tempo de floculação (min.)	Valores de turbidez remanescente (uT) para $V_s = 3,5$ cm/min				
	$G_r 20 \text{ s}^{-1}$	$G_r 30 \text{ s}^{-1}$	$G_r 40 \text{ s}^{-1}$	$G_r 55 \text{ s}^{-1}$	$G_r 70 \text{ s}^{-1}$
5	11,30	8,04	7,80	8,47	11,20
6,67	8,40	6,77	7,62	8,06	10,39
10	4,39	4,46	7,41	7,31	8,92

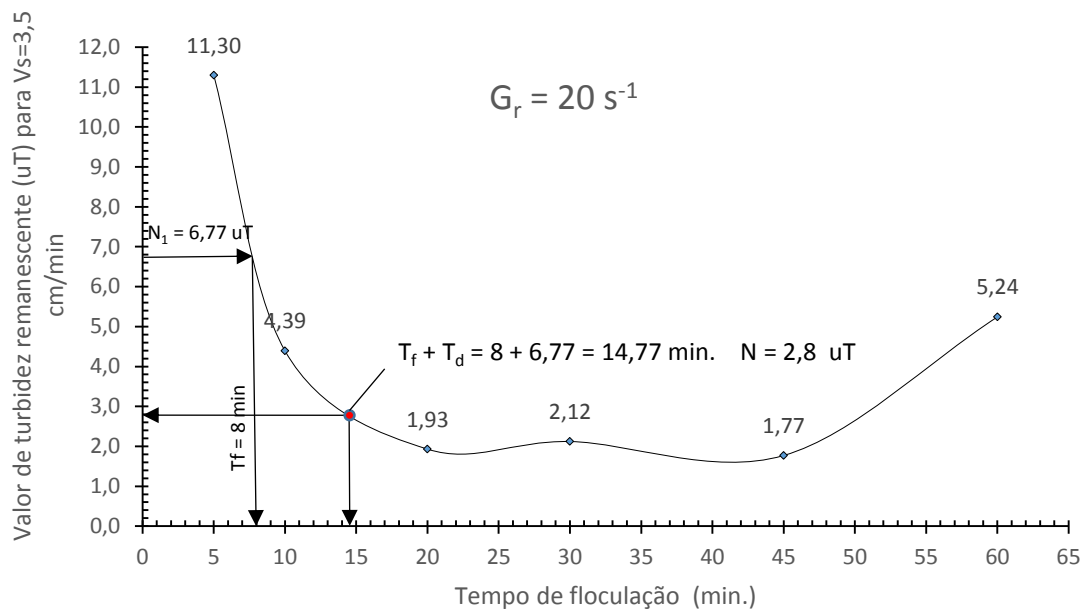
Fonte: Tabela 5.9.

Para determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara de floculação ( $G_r^2$ ) são feitas interpolações gráficas nas Figuras relativas aos resultados dos ensaios de floculação com gradientes de 30, 20  $\text{s}^{-1}$ . Vale resaltar novamente que não se devem ser estudados valores de gradiente de velocidade maiores que o determinado na primeira câmara de floculação.

O procedimento utilizado foi o mesmo descrito quando feito com quarto câmaras. Nas Figuras 5.8 e 5.9 são mostrados os resultados para determinação do gradiente na segunda câmara de floculação ( $G_r^2$ ).

**Figura 5.8** - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação,  $G_r = 30 \text{ s}^{-1}$  (determinação  $G_r^2$ ).

Fonte: próprio autor (2016).

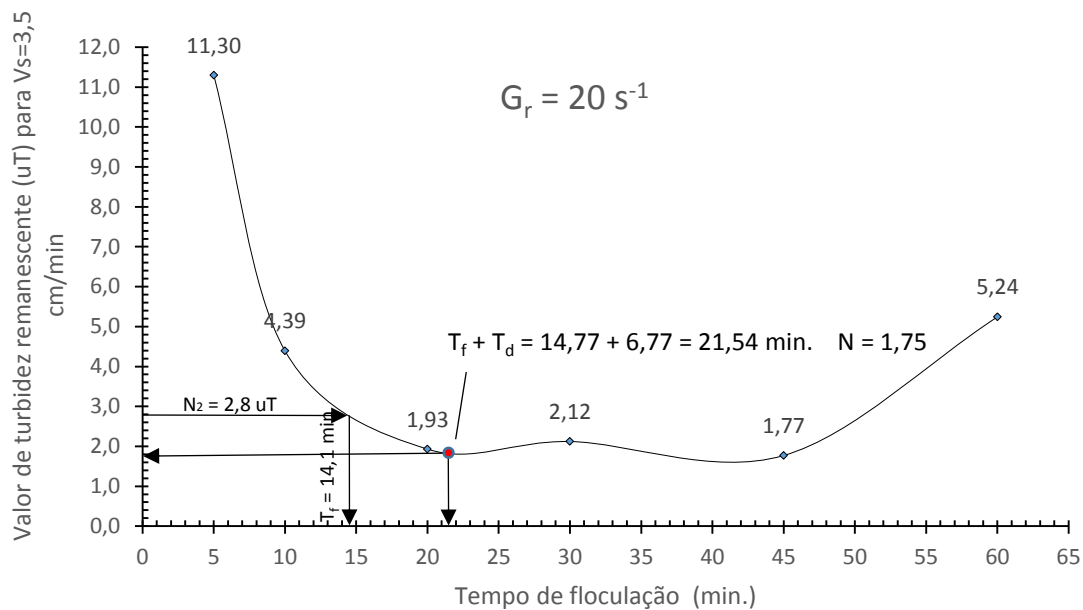


**Figura 5.9** - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação,  $G_r = 20 \text{ s}^{-1}$  (determinação  $G_r^2$ ).

**Fonte:** próprio autor (2016).

O gradiente de velocidade ótimo na segunda câmara são segundo as interpolações acima é de  $20 \text{ s}^{-1}$ , uma vez que resultou menor turbidez remanescente ( $N_{(2,20)} = 2,2 \text{ uT} < N_{(2,30)} = 4,07 \text{ uT}$ ).

De mesmo modo descrito para determinação do gradiente de velocidade na segunda câmara foi utilizado para determinação do gradiente na terceira câmara de floculação. Como o gradiente na segunda câmara era de  $20 \text{ s}^{-1}$ , foi estudado apenas o gradiente de  $20 \text{ s}^{-1}$  (Figura 5.10).



**Figura 5.10** - Turbidez remanescente em função do tempo de floculação,  $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$  (determinação  $G_f^3$ ).

**Fonte:** próprio autor (2016).

Com três câmaras em série e 20 min. de floculação, obtivemos a combinação ótima dos gradientes para água em estudo foi de 30, 20 e  $20 \text{ s}^{-1}$ , na primeira, segunda e terceira câmara respectivamente.

A fim de avaliar a influência da variação de  $G_f$  nas câmaras de floculação acima, foram comparados aos ensaios realizados com escoamento contínuo com  $G_f$  constante e igual a  $20 \text{ s}^{-1}$  (ver Tabela 5.10) para o tempo total de floculação de 20 min..

Na Tabela 5.12 é apresentado o resumo dos dados obtidos.

**Tabela 5.12** - Resumo dos dados obtidos nesse estudo comparados a outros estudos.

Gradiente na floculação		Hipótese 1	Hipótese 2	Pádua (1994)	Brito(1998)
Gradiente constante	Tempo de floculação (min.)	20		20	25
	Gradiente de velocidade ótimo ( $s^{-1}$ )	20		20	20
	Turbidez remanescente (uT)	1,93		1,4	0,2
Gradiente escalonado	Número de câmara de floculação em série	4	3	4	4
	Tempo total de floculação (min.)	20	20	20	20
	Combinação ótima de gradientes de velocidade ( $s^{-1}$ )	40, 20, 20 e 20	30, 20 e 20	55, 30, 20 e 20	50, 20, 20 e 20
	Turbidez remanescente na saída da última câmara de floculação (uT)	1,89	1,75	1,3	0,8

**Fonte:** próprio autor (2016).



Di Bernardo (2001) fez o uso da metodologia de Pádua (1994), em cima dos ensaios de Brito (1998) e do próprio Pádua (1994), ambos mostrados na tabela 5.12. Para os dados de Pádua, as interpolações resultaram nos valores de 55, 30, 20 e 20  $s^{-1}$  e turbidez remanescente igual a 1,4 uT, e no estudo do Brito (1998), o tempo ótimo de floculação foi de 25 min. porém ele fez uma redução no tempo de floculação diminuindo 5 min. de floculação, devido a margem que a água do Brito (1998) apresentava em seus resultados pré escalonamento, e os resultados para 4 câmaras foram de 50, 20, 20, 20  $s^{-1}$  e turbidez remanescente 0,8 podendo chegar a marcas menores ainda se mantido o tempo de 25 min., sendo estes bem próximos dos valores encontrados no presente trabalho.

Vale a pena ressaltar que cada água tem suas próprias características, e passaram por diferentes, coagulantes, parâmetros e as condições que pelo qual foram submetidos. Porém, vale ressaltar a proximidade dos resultados, estes que são satisfatórios quando olhados para o gradiente constante.

As duas hipóteses obtiveram valores muito bons, e seriam utilizáveis caso fossem instaladas em uma ETA, porém vale destacar que a hipótese 2 (30, 20 e 20 $s^{-1}$ ) é mais viável economicamente tendo em vista que só possui 3 câmaras, além do fato de ter uma menor turbidez remanescente.

## 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões do trabalho foram as seguintes:

- a) O melhor par de valores encontrado nos ensaios de Jarreste para a etapa de coagulação foram: pH de coagulação igual a 8,3 e dosagem de coagulante de 30mg/l;
- b) Para os parâmetros de mistura rápida o melhor par de valores (para turbidez remanescente) encontrado foi:  $T_{mr}$ : 25s e  $G_{mr}$ :  $800\text{ s}^{-1}$ ;
- c) Para os parâmetros de floculação o melhor par de valores (para turbidez remanescente) encontrado foi:  $T_f$  : 20 min. e  $G_f$ :  $20\text{ s}^{-1}$ ;
- d) O melhor escalonamento das câmaras do floculador encontrados nas interpolações gráficas foi : 30, 20 e  $20\text{s}^{-1}$ , no qual resultaram uma turbidez remanescente igual a 1,75 uT.
- e) O método de Pádua (1994) é altamente recomendado para otimização das câmaras dos floculadores, tendo em vista que o gradiente escalonado teve valores menores de turbidez remanescente do que o apresentado pelo gradiente constante para o determinado tempo de floculação.
- f) O equipamento estático é aconselhável para otimização dos parâmetros de coagulação, mistura rápida e mistura lenta, visando uma grande economia de coagulantes, custos na implantação da obra e área útil necessária para implantação e por fim ganho na eficiência do tratamento.

As recomendações do trabalho são:

- a) Fazer um estudo mais completo do manancial em relação aos parâmetros de qualidade de água ao seu enquadramento tendo em vista a grande relevância no

sistema de abastecimento de água, com influência direta na quantidade/qualidade da água a ser captada, tratada e distribuída;

- b) Realizar o estudo em outras épocas do ano, afim de garantir amostras no período chuvoso, de chuvas críticas e de seca, visando melhor otimização dos parâmetros estudados em diferentes padrões de qualidade;
- c) Fazer o uso do diagrama de coagulação, para achar as regiões otimizadas de turbidez remanescente. Também realizar os ensaios com outros tipos de coagulantes, visando encontrar o melhor para água de estudo, e menor consumo do mesmo;
- d) Abordar outras velocidades de sedimentação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – *Projeto de Estação de Tratamento de Águas para Abastecimento Público*, NBR 12216, Rio de Janeiro: ABNT 1992.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. Resultados. Disponível em: <[http://www.atlasdasaguas.ufv.br/atlas\\_digital\\_das\\_aguas\\_de\\_minas\\_gerais.html](http://www.atlasdasaguas.ufv.br/atlas_digital_das_aguas_de_minas_gerais.html)>. Acesso em: jan, 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Norma de Qualidade de água para Consumo Humano*. Portaria 2914. Dezembro de 2011.

BRATBY, J.R. Interpreting laboratory results for the design of rapid mixing flocculation systems. *Journ. AWWA*, vol.73, n.6, p.318-25, Jun. 1981.

BRITO, S.A. *Influência da velocidade de sedimentação na determinação dos coeficientes de agregação e ruptura durante a floculação*. São Carlos. 189p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil. 1998.

CBH DOCE – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. *Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce*. Volume I, Relatório Final. Elaborado pelo Consórcio ECOPLAN-LUME. 472 p., 2010.

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. *Estabelece a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. Data da legislação: 17/03/2005 - Publicação DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63 Status: Alterada pelas Resoluções nº 370, de 2006, nº 397, de 2008, nº 410, de 2009, e nº 430, de 2011. Complementada pela Resolução nº 393, de 2009. Brasília, 2005.

CONCEIÇÃO, R. A. P. *Influência da acidez do coagulante na eficiência da coagulação e decantação de água*. São Carlos. 136p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade do Estado de São Paulo, 1997.

COSTA, E. R. H. *Estudo do uso de polímeros naturais como auxiliares de floculação com base no diagrama de coagulação do sulfato de alumínio*. São Carlos. 123p.

Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade do Estado de São Paulo, 1992.

DI BERNARDO, A. S. *Influência das condições de aplicação de polímeros catiônicos na eficiência da floculação*. São Carlos. 207p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

DI BERNARDO, A; DI BERNARDO, L. *Redução do tempo de floculação em função do escalonamento do gradiente de velocidade*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, João Pessoa, ABES, 2001

DI BERNARDO, L. ; DANTAS, A. D. B. . *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 2.ed. São Carlos: Rima Editora, 2005. v. 2. 1584 p.

DI BERNARDO, L. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. Volumes I e II. Associação Brasileira de engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. 481p. Rio de Janeiro, 1993.

DI BERNARDO, L; SABOGAL-PAZ, L.S. *Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água*. São Carlos, Ed. LDIBE LTDA, Vol 1, 2008.

FRANCO, E. S. *Avaliação da Influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estação de tratamento de água*. Ouro Preto. 207p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Minas, Univerdade Federal de Ouro Preto, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cartas do Brasil. Disponível em: < <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/mapas/GEBIS%20-%20RJ/SF-23-X-A-III-4.jpg> >. Acesso em: dez, 2016.

\_\_\_\_\_. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm> . Acesso em: nov, 2016.

\_\_\_\_\_. Pesquisa nacional de saneamento básico - 2008. RIO DE JANEIRO: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Infohidro. Disponível em: < <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/gestao-das-aguas/enquadramento>>. Acesso em: jan, 2017.

LIBÂNIO, M. *Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água* 3ª Edição. São Paulo: Editora Átomo. 2010. 494 folhas.

MARINELLI, P. S. *Aplicação de amidos catiônicos de milho como auxiliares de floculação no tratamento da água*. São Carlos. 207p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

MENDES, C.G.N. *Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis*. São Carlos. 144p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade do Estado de São Paulo, 1989.

PÁDUA, V. L. (Coord.) *Remoção de micro-organismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano*. 1ª Edição: Rio de Janeiro: ABES, 2009. 391 folhas.

PÁDUA, V. L. *Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de ensaios em reatores estáticos*. São Carlos. 165p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.

PAVANELLI, G. *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

REVISTA TAE, Ação dos floculadores. Disponível em: < <http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=5464>>. Acesso em: jan, 2017.

SABOGAL-PAZ L. P. *Modelo Conceitual de Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água para abastecimento de Comunidades de Pequeno Porte*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SINAN – SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE AGRAVOS DE NOTIFICAÇÃO. Disponível

em:<<http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php?area=0203&id=29878153>>.  
Acesso em: jan, 2017.

STANDART METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (2012). American Public Health Association – APHA 22th.

VIANNA, M R. *Hidráulica aplicadas as estações de tratamento de água*, 3a ed, Belo Horizonte, Imprimatur, 2002.

VIGNESWARAN, S; VISVANATHAN, C. (1995) Water Treatmant Processes: Simples Options. CRC Press Inc. Florida. USA. 215p