



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



Renan Pedrosa Fonseca

**TRATABILIDADE DA ÁGUA DOS RIOS DOCE E PIRANGA:
PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA O PROJETO DE UNIDADES DE
COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

OURO PRETO, 2018

Renan Pedrosa Fonseca

**TRATABILIDADE DA ÁGUA DOS RIOS DOCE E PIRANGA:
PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA O 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.

Orientadora: Profa. D.Sc. Ana Letícia de Castro Pilz

Coorientador: Prof. D.Sc. Aníbal da Fonseca Santiago

OURO PRETO, NOVEMBRO DE 2018

F676t

Fonseca, Renan Pedrosa.

Tratabilidade da água dos Rios Doce e Piranga [manuscrito]: Parâmetros otimizados para o projeto de unidades de coagulação e floculação / Renan Pedrosa Fonseca. - 2018.

69f.: il.: color; graf.; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Ana Leticia de Castro Pilz.

Coorientador: Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago.

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

1. Tratabilidade de água. 2. Coagulação. 3. Floculação. 4. Jarreste. 5. Rio Doce e Rio Piranga. I. Pilz, Ana Leticia de Castro. II. Santiago, Aníbal da Fonseca. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

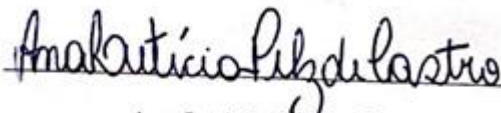
CDU: 504

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

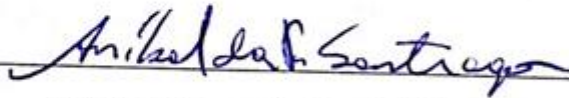
Renan Pedrosa Fonseca

**TRATABILIDADE DA ÁGUA DOS RIOS DOCE E PIRANGA:
PARÂMETROS OTIMIZADOS PARA O PROJETO DE UNIDADES DE
COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO**

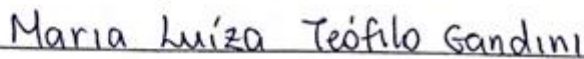
Trabalho de graduação (Monografia ou Trabalho de Conclusão de Curso) defendido e aprovado em 09/11/2018 pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Ana Leticia Pilz de Castro (D.Sc) – Professora orientadora/UFOP



Anibal da Fonseca Santiago (D.Sc) – Professor coorientador/UFOP



Maria Luiza Teófilo Gandini (M.Sc) – Professora convidada/UFOP



Paulo de Castro Vieira (D.Sc) – Professor convidado/UFOP

OURO PRETO, NOVEMBRO DE 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, pelo dom da vida, a saúde e a condição necessária para a realização da graduação e deste trabalho.

Aos meus pais Ricardo e Vera pelo suporte e apoio todos esses anos de faculdade.

À todos os professores da Universidade Federal de Ouro Preto que, dentro e/ou fora da sala de aula, me incentivaram na busca pelo conhecimento ao longo desses anos acadêmicos e contribuíram de maneira incontestável para a minha formação profissional e pessoal.

Aos meus orientadores Ana Letícia Pilz de Castro e Aníbal da Fonseca Santiago pela oportunidade de trabalhar juntos, compartilhando tempo, paciência e conhecimento.

À Fundação Gorceix, por todo suporte durante a graduação e pela oportunidade de aprendizado.

À Patrícia pelo amor, compreensão e ajuda na realização desse trabalho.

À República Oito & Oitenta, minha casa e minha família em Ouro Preto.

À turma da Engenharia Ambiental 12.2 que esteve unida todos esses anos, nos bons e maus momentos, formando uma amizade incondicional e contribuindo positivamente para a minha formação.

À Isabela pelo trabalho em equipe. Ao Daniel que sempre esteve à disposição para me ajudar. Ao Flango, Ktatau, Jagunçu, Makauli e Azia pela ajuda nas coletas de água.

E à todos que, de alguma forma, fizeram possível a realização deste trabalho, o meu agradecimento sem tamanho!!

RESUMO

Essa pesquisa analisa os resultados de ensaios de bancada (Jarteste) com a água dos rios Doce e Piranga, coletadas em setembro de 2017, visando determinar parâmetros otimizados de tratamento para as etapas de coagulação e floculação. A escolha dos dois rios visou estimular uma análise comparativa entre ambos, considerando a contaminação do Rio Doce no desastre da Barragem de Fundão. Foi feita uma caracterização da água bruta dos dois rios, considerando pH, turbidez, alcalinidade e condutividade, que mostrou conformidade dos parâmetros do Rio Doce com as condições anteriores ao acidente. O coagulante utilizado nos ensaios para ambos foi o Policloreto de Alumínio (PAC) e a dosagem ideal para o Rio Doce foi de 32,5 mg/L e para o Rio Piranga, 25 mg/L. O pH ideal de coagulação foi de 8,0 para ambos. Os gradientes e os tempos de mistura rápida ideais foram, respectivamente: 400s^{-1} e 20s, para o Doce; e 600s^{-1} e 25s, para o Piranga. A floculação idealizada seria com tempo total de 20 minutos, com 3 câmaras para o Rio Doce e 4 para o Rio Piranga. A turbidez residual nos respectivos cenários foram 2,53 e 0,88 uT. De acordo com Libânio (2010), para os pontos de coleta das águas e as condições desta pesquisa, esses resultados são satisfatórios.

Palavras Chave: Tratabilidade de água. Coagulação. Floculação. Jarteste. Rio Doce. Rio Piranga.

ABSTRACT

This research analyzes the results of bench tests (Jarteste) with water from the Doce and Piranga rivers, collected in September 2017, in order to determine optimized treatment parameters for the coagulation and flocculation steps. The choice of the two rivers was intended to stimulate a comparative analysis between the two, considering the contamination of the Doce River in the accident of the Fundão Dam. It was made a characterization of the raw water of the two rivers, considering pH, turbidity, alkalinity and conductivity, which showed compliance of the Doce River parameters with the conditions prior to the accident. The coagulant used in the tests for both was Aluminum Polychloride (PAC) and the ideal dosage for the Doce River was 32.5 mg / L and for the Piranga River, 25 mg / L. The ideal coagulation pH was 8.0 for both. The gradients and ideal fast mixing times were, respectively: 400s⁻¹ and 20s, for the Sweet; and 600s⁻¹ and 25s, for the Piranga. The idealized flocculation would be with a total time of 20 minutes, with 3 chambers for the Rio Doce and 4 for the Piranga River. Residual turbidity in the respective scenarios were 2.53 and 0.88 uT. According to Libânio (2010) for the water collection points and the conditions of this research, these results are satisfactory.

Keywords: Water treatability. Coagulation. Flocculation. Jarteste. Doce River. Piranga River.

Sumário

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SIGLAS	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Legislação das Águas no Brasil	4
3.2. Acidente com a Barragem de Fundão.....	4
3.2.1. Impactos na Qualidade da Água.....	5
3.2.2. Impactos no Fornecimento de Água.....	9
3.3. Tratamento de Água: Processo Convencional	10
3.4. Ensaio de Tratabilidade.....	10
3.4.1. Coagulação	11
3.4.2. Policloreto de Alumínio	17
3.4.3. Floculação.....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1. Atividades realizadas	22
4.2. Características dos mananciais	23
4.3. Materiais utilizados.....	25
4.4. Caracterização da água	28
4.5. Ensaio de bancada – Jarteste	28
4.6. Determinação da melhor dosagem de coagulante e pH.....	29

4.7.	Determinação dos parâmetros ótimos de Mistura Rápida no Jarteste.	30
4.8.	Determinação dos parâmetros ótimos de Flocculação no Jarteste.....	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1.	Características dos pontos de coleta e da água coletada.	31
5.2.	Otimização da dosagem de coagulante e do pH de coagulação.	34
5.3.	Otimização dos parâmetros de Tempo e Gradiente de Mistura Rápida.....	37
5.4.	Otimização dos parâmetros de Gradientes Médios de Velocidade e Tempo de Flocculação para a etapa de Mistura Lenta.	39
5.4.1.	Análise da Hipótese 1 para a água do Rio Doce.....	41
5.4.2.	Análise da Hipótese 2 para a água do Rio Doce.....	47
5.4.3.	Análise das Hipóteses 3 e 4 para a água Rio Doce.....	52
5.4.4.	Análise da Hipótese 1 para a água do Rio Piranga.....	53
5.4.5.	Análise da Hipótese 2 para a água do Rio Piranga.....	56
5.4.6.	Análise das Hipóteses 3 e 4 para a água do Rio Piranga.	59
6.	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Pontos de Monitoramento do IGAM e IEMA no Rio Doce.	6
Tabela 3.2 – Limites estabelecidos para os principais parâmetros da qualidade de águas de classe 2.	6
Tabela 3.3 – Comparação dos parâmetros de turbidez e sólidos totais antes e após o acidente.	7
Tabela 3.4 – Comparação dos valores de Ferro e Manganês e após o acidente no Rio Doce.	8
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados no Jarteste para os ensaios de dosagem de coagulante e pH.	29
Tabela 5.1 – Características dos pontos de coleta e da água utilizada nos experimentos.	31
Tabela 5.2 – Ensaio variando a concentração de PAC sem a presença de alcalinizante.	34
Tabela 5.3 – Ensaio com concentração de PAC de 22,5 mg/L.	35
Tabela 5.4 – Ensaio com concentração de PAC de 25 mg/L.	35
Tabela 5.5 – Ensaio com concentração de PAC de 27,5 mg/L.	36
Tabela 5.6 – Ensaio com concentração de PAC de 30 mg/L.	36
Tabela 5.7 – Ensaio com concentração de PAC de 32,5 mg/L.	36
Tabela 5.8 – Ensaio com concentração de PAC de 35 mg/L.	37
Tabela 5.9 – Valores de Turbidez Residual (uT) em ensaios com diferentes tempos de mistura rápida para a água do Rio Doce.	38
Tabela 5.10 – Valores de Turbidez Residual (uT) em ensaios com diferentes tempos de mistura rápida para a água do Rio Piranga.	38
Tabela 5.11 – Parâmetros otimizados para os 2 rios até a etapa de mistura rápida.	39
Tabela 5.12 – Valores de turbidez residuais para os ensaios de mistura lenta do Rio Doce.	40
Tabela 5.13 – Valores de turbidez residuais para os ensaios de mistura lenta do Rio Piranga.	40

Tabela 5.14 – Hipóteses para a otimização dos parâmetros de mistura lenta.	41
Tabela 5.15 – Valores de turbidez residual de todos os gradientes no Rio Doce interpolando para encontrar $T_f = 6,6$ min.....	48
Tabela 5.16 – Parâmetros ideais encontrados para a Hipótese 3 na água do Rio Doce.	52
Tabela 5.17 – Parâmetros ideais encontrados para a Hipótese 4 na água do Rio Doce.	52
Tabela 5.18 – Valores de turbidez residual de todos os gradientes no Rio Piranga interpolando para encontrar $T_f = 6,6$ min.....	56
Tabela 5.19 – Parâmetros ideais encontrados para a Hipótese 3 na água do Rio Piranga.	60
Tabela 5.20 – Parâmetros ideais encontrados para a Hipótese 4 na água do Rio Doce.	60
Tabela 5.21 – Comparação de todos os parâmetros das duas águas deste estudo.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Sedes municipais com abastecimento de água diretamente afetado pelo acidente.....	9
Figura 3.2 – Tipos de unidades de mistura rápida em câmaras com agitadores mecânicos.	13
Figura 3.3 – Tipos de unidades de mistura rápida por meio de injetor e malha de fios e de difusores.....	14
Figura 3.4 – Tipos de unidades de mistura rápida com ressalto hidráulico.....	15
Figura 3.5 – Tipos de unidades de mistura rápida em tubulações com dispositivos especiais.....	16
Figura 3.6 – Dimensões das partículas e microrganismos presentes nas águas naturais.	17
Figura 3.7 – Comparação: turbidez residual em função do pH para o PAC e o Sulfato de Alumínio.....	18
Figura 3.8 – Alguns tipos de flocladores hidráulicos.	21
Figura 3.9 – Alguns tipos de flocladores mecanizados.	21
Figura 4.1 – Fluxograma das atividades realizadas no trabalho.....	22
Figura 4.2 – Localização do ponto de coleta no Rio Doce.....	24
Figura 4.3 – Localização do ponto de coleta no Rio Piranga.	24
Figura 4.4 – Jarteste utilizado nos ensaios de bancada.....	26
Figura 4.5 – Turbidímetro utilizado.	26
Figura 4.6 – Multiparâmetro utilizado.....	27
Figura 4.7 – Condutivímetro utilizado.	27
Figura 5.1 – Valores de turbidez no Rio Piranga (coletados no município de Ponte Nova) entre Janeiro de 2014 e Outubro de 2015.....	32
Figura 5.2 – Valores de turbidez no Rio Doce (coletados no município de Rio Doce) entre Novembro de 2015 e Janeiro de 2017.	32
Figura 5.3 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $70s^{-1}$ na Hipótese 1.....	42

Figura 5.4 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $55s^{-1}$ na Hipótese 1.....	43
Figura 5.5 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 1.....	43
Figura 5.6 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.....	44
Figura 5.7 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $20s^{-1}$ na Hipótese 1.....	45
Figura 5.8 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 1.....	46
Figura 5.9 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.....	46
Figura 5.10 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.....	47
Figura 5.11 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $70s^{-1}$ na Hipótese 2.....	48
Figura 5.12 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $55s^{-1}$ na Hipótese 2.....	49
Figura 5.13 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 2.....	49
Figura 5.14 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 2.....	50
Figura 5.15 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $20s^{-1}$ na Hipótese 2.....	50
Figura 5.16 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 2.....	51
Figura 5.17 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 2.....	51
Figura 5.18 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $55s^{-1}$ na Hipótese 1.....	53

Figura 5.19 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 1.....	54
Figura 5.20 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.....	54
Figura 5.21 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.....	55
Figura 5.22 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.....	55
Figura 5.23 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $55s^{-1}$ na Hipótese 3.....	57
Figura 5.24 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 2.....	57
Figura 5.25 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 2.....	58
Figura 5.26 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 2.....	58
Figura 5.27 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 2.....	59

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas;

cm/min – Centímetros por minuto;

ETA – Estação de Tratamento de Água;

Gf – Gradiente de velocidade médio na floculação (s^{-1});

Gmr – Gradiente de velocidade médio na mistura rápida (s^{-1});

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos;

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas;

pH – Potencial hidrogeniônico;

PAC – Policloreto de Alumínio;

mg/l – Miligramas por litro;

min – Minutos;

s – Segundos;

Tf – Tempo médio de floculação (min);

Tmr – Tempo médio de mistura rápida (s);

Ts – Tempo médio de sedimentação (min);

uT – Unidade de turbidez;

Vs – Velocidade de sedimentação (cm/min);

μ S – microSiemens.

1. INTRODUÇÃO

A água é o componente presente em maior quantidade no organismo dos seres vivos. Por ser um solvente universal, ela atua como meio dispersante dentro das células e, por isso, a maioria das reações metabólicas ocorrem em meio aquoso. No organismo humano, ela integra cerca de dois terços do corpo e ainda atua como reguladora do equilíbrio térmico. Dada tal importância, suas funções são essenciais para os seres humanos e o seu tratamento é imprescindível para o abastecimento público.

O tratamento de água para o consumo humano visa adequar a água bruta nos limites físicos, químicos, biológicos e radioativos estabelecidos pela legislação em vigor no Brasil, de modo que ela seja incapaz de transmitir qualquer malefício à população abastecida. Ele visa a remoção de partículas sólidas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias que venham a ser prejudiciais à saúde da população (LIBÂNIO, 2010).

Como cada manancial de abastecimento tem suas características peculiares e isso reflete de diversas maneiras na qualidade da água, é indispensável que sejam estudos para verificar as condições ideais de tratamento para adequá-la aos padrões de potabilidade exigidos pela legislação no melhor custo-benefício de operação e manutenção. Para isso, foram propostos modelos visando estimar gradientes médios de velocidades de floculação a partir de reatores estáticos, inicialmente por Bratby (1981, apud DI BERNARDO, 2005) e, posteriormente estudado por Pádua (1994, apud DI BERNARDO, 2005). Com esses reatores, como por exemplo, o Jarteste, é possível realizar testes buscando as condições ideais de tratamento para uma água na remoção da sua turbidez, como o melhor coagulante e sua dosagem ideal, a melhor faixa de pH de coagulação, o tempo e o gradiente de mistura rápida e de floculação.

Se por um lado essas metodologias são necessárias na escolha das melhores tecnologias para o tratamento ajudando na projeção de uma nova Estação de Tratamento de Água (ETA) para um município, por outro, elas são importantes para auxiliar o profissional em uma estação já existente na manutenção da potabilidade da água em caso de mudanças repentinas nas condições do manancial de abastecimento. Essas mudanças podem ser desde uma chuva longa e intensa alterando bruscamente a qualidade da água, até um evento que possa mudar inesperadamente as condições da água bruta do manancial.

Em novembro de 2015, a Barragem de Fundão pertencente à SAMARCO entrou em colapso e derramou mais de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos nos arredores, incluindo em corpos d'água que levariam esse material até o Rio Doce e adiante, gerando vários impactos no meio ambiente, alterando repentinamente as condições da água dos mananciais, inviabilizando o seu uso para o abastecimento público. Devido a isso, após interrupções no fornecimento de água em várias cidades, foi necessária a utilização de metodologias como modelagens e ensaios de bancada para avaliar as novas condições para o tratamento da água deturpada pelo rejeito.

Dessa maneira, tendo em vista este evento e os seus impactos nos mananciais de abastecimento de água, especialmente no Rio Doce, este trabalho visa realizar ensaios de bancada para identificar um viés comparativo entre alguns parâmetros importantes no tratamento de água avaliando as características encontradas nos ensaios feitos com a água do próprio Rio Doce, afetada pelo rejeito do rompimento da barragem e da água do Rio Piranga, que é um dos seus principais formadores e não sofreu influência do ocorrido. Considerando o grande impacto causado ao sistema de tratamento de água após a contaminação do Rio Doce, foi desenvolvida uma análise do tratamento de água em escala de bancada deste rio de forma a comparar com o tratamento realizado no rio Piranga, abordando desde a otimização da dosagem de coagulante até a floculação. Utilizando as mesmas amostras de água e os resultados deste trabalho, a aluna Isabela Fernanda Esteves Mascarenhas, da Engenharia Civil, fez a sua monografia, intitulada “Tratabilidade da água do rio Doce e do rio Piranga: parâmetros otimizados para o projeto de unidades de decantação e filtração.” realizando novos ensaios e complementado este estudo.

2. OBJETIVOS

Avaliar, por meio de ensaio de bancada (Jarteste) a tratabilidade da água do Rio Piranga à montante do encontro com o Rio Gualaxo do Norte, e da água do Rio Doce após a sua formação, obtendo, para ambas as águas, a dosagem ideal de coagulante, pH de coagulação e os parâmetros otimizados de mistura rápida e de floculação, visando fazer a comparação dos mananciais sobre o ponto de vista das suas condições de tratamento cerca de 2 anos após a influência do rompimento da Barragem de Fundão.

2.1. Objetivos Específicos

- Avaliar as características da água dos Rios Piranga e Doce nos pontos designados para coleta;
- Analisar as características da água coletada no Rio Doce e os parâmetros obtidos em laboratório com os referentes à época do rompimento da barragem;
- Selecionar a melhor dosagem de coagulante e o pH de coagulação para as águas coletadas;
- Selecionar as melhores condições de tempo e gradiente de mistura rápida e floculação para as águas coletadas e
- Selecionar, com base nos ensaios, o melhor sistema de coagulação e floculação para os dois rios.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Legislação das Águas no Brasil

No Brasil, a portaria de número 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde dispõe sobre as competências, os procedimentos e condições para o controle e a vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2011). Ela estabelece os parâmetros físicos, químicos e biológicos da água e os limites que estes devem atender para que a água possa ser considerada potável e ser utilizada para o abastecimento público. Para isso, a portaria exige um monitoramento contínuo destes parâmetros nas estações de tratamento de água.

A classificação dos rios, segundo os parâmetros de qualidade de água e a indicação da possibilidade de utilização da água para abastecimento e, nesse caso, indicação do método de tratamento da água para tal, é feita pela Resolução CONAMA 357 de 2005. Posteriormente alterada pela Resolução 410 de 2009 e pela 430 de 2011, ela discorre sobre a classificação dos corpos d'água e as diretrizes ambientais para o seu enquadramento e também estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes (BRASIL, 2005). Ela classifica as águas doces, salinas e salobras em classe especial, 1, 2 e 3 (e no caso das águas doces, há também a classe 4) e estabelece limites, de acordo com os parâmetros de qualidade da água, para que elas sejam enquadradas em uma das classificações, indicando também os possíveis tipos de destinação para cada classe. Os rios Doce e Piranga, avaliados nesse trabalho, são considerados Classe 2 e, segundo a Resolução, possuem águas que devem passar pelo tratamento convencional para abastecimento doméstico e também podem ser destinadas à proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário, irrigação de hortaliças e frutíferas e à criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana (BRASIL, 2005).

3.2. Acidente com a Barragem de Fundão

Em 5 de Novembro de 2015, a barragem de rejeitos de Fundão, pertencente ao complexo minerário da SAMARCO, rompeu-se, despejando mais de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos da mineração de ferro no Rio Gualaxo do Norte e arredores (IBAMA, 2015). Esse rejeito percorreu o curso do rio, chegando ao Rio do Carmo e, posteriormente, ao Rio Doce que o carregou até a sua foz no Oceano Atlântico, em Vila de Regência, município de Linhares, no Espírito Santo.

Como consequências imediatas do acidente, houve desalojamento de populações, principalmente nos municípios mais próximos ao local da barragem, como Bento Rodrigues e Barra Longa, devastação de localidades, destruição de estruturas públicas e privadas, interrupção da geração de energia elétrica pelas hidrelétricas atingidas, destruição de áreas de preservação permanente, assoreamento de cursos d'água, interrupção do abastecimento de água, mortandade de biodiversidade aquática, dentre outros impactos (IBAMA, 2015). Além disso, segundo Relatório de Análise do Acidente do Ministério do Trabalho e Previdência Social, foi contabilizada a morte de dezenove pessoas, sendo catorze prestadores de serviços à SAMARCO e cinco moradores do distrito de Bento Rodrigues (BRASIL, 2016).

3.2.1. Impactos na Qualidade da Água

O despejo de rejeitos da mineração de ferro da barragem gerou uma série de impactos na qualidade da água dos rios atingidos. Esses impactos podem ser dimensionados a partir das alterações bruscas nos principais parâmetros de qualidade da água que historicamente são medidos pelo IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) e IEMA (Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos) no Rio Doce e continuaram a ser monitorados depois do acidente. A Tabela 3.1 indica esses pontos de monitoramento e algumas informações. As águas do Rio Doce utilizadas nos ensaios laboratoriais de tratabilidade deste projeto foram coletadas nas proximidades do ponto RD072.

Tabela 3.1 – Pontos de Monitoramento do IGAM e IEMA no Rio Doce.

Ponto	Órgão	Início das coletas	Final das coletas	Município	Distância ao acidente (km)
RD072	IGAM	01/10/2008	21/12/2015	Rio Doce, Santa Cruz do Escalvado	111
RD019	IGAM	02/09/1997	21/12/2015	Rio Casca, São Domingos do Prata	167
RD023	IGAM	16/09/1997	21/12/2015	Marliéria, Pingo-d'Água	217
RD035	IGAM	05/08/1997	21/12/2015	Ipatinga	262
RD033	IGAM	30/07/1997	21/12/2015	Belo Oriente, Bugre	291
RD083	IGAM	08/07/2008	21/12/2015	Fernandes Tourinho, Periquito	335
RD044	IGAM	21/02/2000	21/12/2015	Governador Valadares	374
RD045	IGAM	30/07/1997	21/12/2015	Governador Valadares	388
RD053	IGAM	04/09/1997	21/12/2015	Galiléia, Tumiritinga	415
RD058	IGAM	22/02/2000	21/12/2015	Conselheiro Pena	450
RD059	IGAM	04/09/1997	21/12/2015	Resplendor	486
RD067	IGAM	25/03/1998	21/12/2015	Aimorés	522
RDC1C005	IEMA	23/08/2001	24/11/2015	Baixo Guandu	522
RDC1E010	IEMA	23/08/2001	24/11/2015	Colatina (distrito de Itapina)	546
RDC1D015	IEMA	27/03/2012	24/11/2015	Colatina (montante)	568
RDC1C025	IEMA	22/03/2012	25/11/2015	Linhares	609
RDC1E030	IEMA	28/08/2001	25/11/2015	Linhares	623

Fonte: ANA (2016).

De acordo com a Resolução CONAMA 357/05 e a Deliberação Conjunta COPAM/CERH nº 01/2008, os limites para os principais parâmetros de qualidade da água para os rios de Classe 2, como é considerado o Rio Doce, são listados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Limites estabelecidos para os principais parâmetros da qualidade de águas de classe 2.

Turbidez	pH	Sólidos Totais	Ferro Dissolvido	Manganês Total	Oxigênio Dissolvido
< 100uT	6,0 a 9,0	< 500 mg/L	< 0,3 mg/L	< 0,1 mg/L	> 5 mg/L

Fonte: ANA (2016).

A medição desses parâmetros após o acidente indicou uma alteração brusca na maioria deles, como é possível observar na Tabela 3.3 que mostra uma comparação entre a turbidez e os sólidos totais.

Tabela 3.3 – Comparação dos parâmetros de turbidez e sólidos totais antes e após o acidente.

Ponto	Turbidez média antes do evento (UNT)	Turbidez máx. antes do evento (UNT)	Turbidez máx. após evento (UNT)	Turbidez na última coleta (UNT)**	Sólidos totais média antes do evento (mg/L)	Sólidos totais máx. antes do evento (mg/L)	Sólidos totais máx. após evento (mg/L)	Sólidos totais na última coleta (mg/L)**
RD072	58	604	435.400	453	117	968	112.470	266
RD019	52	318	597.400	502	90	322	221.430	216
RD023	52	310	606.200	622	97	295	344.980	444
RD035	61	382	334.600	381	110	401	124.220	234
RD033	68	955	497.500	572	124	786	204.860	424
RD083	43	537	21.480	348	85	517	9.190	180
RD044	59	794	140.000	400	96	502	20.580	186
RD045	64	797	81.440	425	104	593	20.910	234
RD053	62	560	74.160	393	108	474	30.270	218
RD058	63	417	89.220	455	114	566	15.760	254
RD059	70	764	28.500	417	113	603	6.130	206
RD067	61	540	10.050	479	98	462	3.270	190
RDC1C005	50	200	9560	2460	106	370	*	*
RDC1E010	54	240	1680	1680	106	320	*	*
RDC1D015	29	50	1590	1590	90	142	*	*
RDC1C025	29	87	2090	2090	87	158	*	*
RDC1E030	42	332	1830	1830	94	420	*	*

Fonte: Elaborado a partir de dados do IGAM e IEMA*.

*Não houve análise de sólidos no monitoramento emergencial realizado pelo IEMA.

** Última coleta considerada no dia 21/12/2015 para os dados do IGAM e no dia 25/11/2015 para o IEMA.

Fonte: ANA (2016).

É possível observar picos de turbidez, principalmente nos pontos de monitoramento mais próximos do local do acidente, que vão de 700 vezes até 1800 vezes maiores do que a máxima já registrada no rio antes do acidente. Ao longo do curso do rio, nos locais mais afastados do acidente, a turbidez apresenta uma característica de decréscimo, talvez explicada pela sedimentação ou retenção das partículas sólidas do rejeito da barragem em alguns pontos do rio, mas mesmo assim são encontrados valores anormais se comparados com os registrados antes do acidente. Da mesma maneira, os sólidos totais apresentam valores na faixa de 200 a 1000 vezes maiores que o valor máximo já encontrado antes do acidente seguindo a mesma tendência da turbidez.

Os valores de Ferro e Manganês também foram monitorados após o acidente e comparados com o valor máximo encontrado antes do mesmo. Essa comparação é ilustrada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Comparação dos valores de Ferro e Manganês e após o acidente no Rio Doce.

Ponto	Fe diss. média antes do evento (mg/L)**	Fe diss. máx. antes do evento (mg/L)*	Fe diss. máx. após evento (mg/L)	Fe diss. na última coleta (mg/L)	Mn total média antes do evento (mg/L)	Mn total máx. antes do evento (mg/L)**	Mn total máx. após evento (mg/L)	Mn total na última coleta (mg/L)*
RD072	0,197	0,538	6,758	0,884	0,209	1,520	15,010	0,348
RD019	0,159	0,488	18,730	1,036	0,160	1,205	32,300	0,287
RD023	0,179	0,490	23,600	1,870	0,161	0,840	936,000	0,543
RD035	0,172	0,510	18,010	1,276	0,171	0,499	351,000	0,271
RD033	0,162	0,390	32,260	1,238	0,164	0,602	857,000	0,411
RD083	0,143	0,381	4,583	0,802	0,059	0,266	21,850	0,141
RD044	0,190	0,573	3,490	1,154	0,115	0,460	67,200	0,158
RD045	0,188	0,610	6,900	1,002	0,109	0,609	40,800	0,188
RD053	0,175	0,476	7,130	1,103	0,109	0,674	31,410	0,154
RD058	0,193	1,040	5,670	1,634	0,129	0,469	19,390	0,140
RD059	0,200	2,070	8,615	1,025	0,118	0,588	4,540	0,135
RD067	0,205	2,020	4,456	1,559	0,096	0,537	1,820	0,052
RDC1C005	*	*	2,126	1,744	*	*	2,761	0,526
RDC1E010	*	*	1,495	1,495	*	*	0,434	0,434
RDC1D015	*	*	1,430	1,430	*	*	0,433	0,433
RDC1C025	*	*	0,891	0,891	*	*	0,428	0,428
RDC1E030	*	*	0,355	0,355	*	*	0,083	0,083

Fonte: Elaborado a partir de dados do IGAM e IEMA*.

* Última coleta considerada no dia 21/12/2015 para os dados do IGAM e no dia 25/11/2015 para o IEMA.

** Série histórica do IEMA anterior ao acidente indisponível para os parâmetros Fe dissolvido e Mn total.

Fonte: ANA (2016).

É comum de se encontrar no rejeito da mineração de ferro, altos teores do próprio ferro, além de quantidades elevadas de manganês, alumínio e sílica. Portanto, era de se esperar uma alteração brusca na concentração desses metais na água do Rio Doce. No caso do Manganês, como demonstrado na tabela, no ponto de monitoramento RD035, ele apresenta um valor mais de um milhão de vezes acima do maior já encontrado para o mesmo local antes do acidente, que já era maior do que o considerado pela Resolução CONAMA 357/05. Da mesma maneira ocorrida com o Ferro, a concentração de Manganês vai diminuindo ao longo do curso do Rio, chegando até encaixar nos padrões estabelecidos pela legislação no último ponto de monitoramento e, segundo a ANA (2015), essa tendência sugere a continuidade no processo de decaimento. Nos casos das concentrações de Alumínio (dissolvido), Cádmiu (total), Chumbo (total) e Níquel (total), houve um aumento expressivo seguindo de um posterior retorno aos valores considerados seguros (ANA, 2015).

O oxigênio dissolvido também foi afetado imediatamente pelo despejo dos rejeitos, sendo quase totalmente consumido e reduzido a zero em vários pontos, mas

recuperou-se em um intervalo de tempo de 3 dias, enquanto o pH da água não sofreu alterações significativas, mantendo-se próximo do neutro (ANA, 2015).

3.2.2. Impactos no Fornecimento de Água

A alteração brusca na qualidade da água causada pela passagem da pluma de rejeitos levou à paralisação total ou parcial do abastecimento de água em várias cidades. Segundo a ANA (2016), 12 cidades que captam água diretamente no Rio Doce foram afetadas, implicando diretamente no abastecimento de uma população de 424 mil pessoas. A Figura 3.1 indica todas essas cidades e as consequências da onda de rejeito no sistema de abastecimento público de água de cada uma delas.

ONDA DE REJEITO	Sede Municipal	UF	População Total (IBGE, 2015)	Dependência do Rio Doce	Efeitos no abastecimento de água durante o evento
noite 08/11	Belo Oriente	MG	25.619	Parcial	Utilização de caminhões-pipa com captação no rio Santo Antônio para abastecimento do distrito de Perpétuo Socorro
	Periquito	MG	7.103	Parcial	Paralisação no distrito de Pedra Comida
	Alpercata	MG	7.478	Total	Paralisação em 08/11 e retomada em 01/12
noite 09/11	Governador Valadares	MG	278.363	Total	Paralisação na área urbana e distrito de São Vitor em 09/11. Abastecimento oficialmente normalizado em 01/12
noite 10/11	Tumiritinga	MG	6.669	Total	Utilização de poços profundos a partir de 09/11
manhã 11/11	Galiléia	MG	7.061	Total	Utilização de caminhões-pipa que trazem água de Conselheiro Pena a partir de 09/11
noite 12/11	Resplendor	MG	17.675	Total	Paralisação na área urbana em 12/11 (captação suspensa por determinação judicial). Distribuição de água do Córrego Barroso por caminhões-pipa
	Itueta	MG	6.087	Total	Captação de água bruta por caminhões-pipa no rio Manhuaçu a partir de 09/11
manhã 16/11	Aimorés	MG	25.694	Parcial	Captação suspensa no distrito de Santo Antônio do Rio Doce
	Baixo Guandu	ES	31.467	Total	Captação de água bruta alterada para o rio Guandu em 09/11
22/11	Colatina	ES	122.646	Total	Paralisação em 17/11 com retomada parcial e normalização em 01/12
	Linhares	ES	163.662	Parcial	Manutenção da paralisação da captação no distrito de Regência, iniciada devido à estiagem e aumento de salinidade. Distribuição de água por poços e caminhões-pipa

Figura 3.1 – Sedes municipais com abastecimento de água diretamente afetado pelo acidente.

Fonte: ANA (2016).

Além da suspensão temporária do abastecimento de água nessas localidades e da urgência por meios provisórios para atender a população, o comércio, os hospitais e outros setores, a alteração na qualidade da água trouxe outras consequências no retorno da operação das estações de tratamento de água. O aporte de sedimentos na água trouxe dificuldades na captação e no tratamento, fazendo com que fosse necessário altos gastos

com produtos químicos como floculantes especiais e cloro, além da limpeza dos filtros com maior frequência (ANA, 2016).

O fornecimento para outros fins também foi altamente afetado. Cerca de 143 outorgas concedidas pela ANA na região tiveram a captação de água interrompidas, sendo 88 para fins industriais, 46 para fins de irrigação, 3 para criação de animais, e 6 para outros usos (ANA, 2016), gerando também impactos socioeconômicos.

3.3. Tratamento de Água: Processo Convencional

O processo do tratamento de água para abastecimento público denominado convencional ou ciclo completo é o mais utilizado no Brasil e consiste nas etapas de coagulação, floculação, decantação (ou flotação), filtração (com escoamento ascendente ou descendente), desinfecção, correção de pH e fluoretação. (LIBÂNIO, 2010). Esta última etapa, entretanto, nem sempre é encontrada nas ETAs do Brasil. Embora esta seja uma importante medida de prevenção na saúde pública, cerca de 60% da população brasileira não tem acesso a esse recurso, sendo o principal motivo dessa desigualdade os custos elevados do produto químico e da instalação do sistema de fluoretação (FRIAS et al., 2006).

Existem também outros métodos para o tratamento de água que, em geral, são derivações do processo por ciclo completo, alterando algumas etapas, principalmente a de filtração. A escolha do método ideal para o tratamento da água para abastecimento público de um município deve ser baseada em ensaios de tratabilidade que vai demonstrar as características da água bruta do manancial a ser utilizado. Outros fatores importantes a serem considerados também são as condições ambientais, sociais, culturais, técnicas e econômicas do município (PEREIRA, 2005). Entretanto, à medida que, a qualidade da água do manancial de abastecimento é pior, é necessária uma aplicação de uma tecnologia mais abrangente como a do tratamento por ciclo completo.

3.4. Ensaio de Tratabilidade

A norma ABNT NBR 12216, intitulada como “Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público”, estabelece as condições exigíveis para a projeção de uma estação de tratamento de água e é o principal documento que norteia os procedimentos para tal feito. Por meio dela, se pode obter a maioria das informações necessárias para dimensionar, projetar e construir uma estação visando o tratamento adequado da água para abastecimento público. Entretanto, é unânime entre todos os

especialistas do assunto a necessidade de se fazer ensaios de tratabilidade para o aperfeiçoamento das condições ideais e dos parâmetros otimizados para o dimensionado da ETA. A própria norma, em vários pontos, aconselha inicialmente a preferência da realização dos ensaios para obtenção dos parâmetros, mas, na ausência destes ou na impossibilidade da sua realização, indica os valores e as condições que devem ser seguidos na elaboração de um projeto.

Na elaboração do projeto, os ensaios de tratabilidade podem ser realizados em escala de bancada, com o uso do Jarreste ou teste de jarros, aparelho utilizado para simular os processos de coagulação, floculação e sedimentação, ou em escala-piloto. A duração dos ensaios de bancada podem durar de duas a três semanas e com baixos custos, enquanto os ensaios em escala-piloto demandam um tempo maior, cerca de um ano e oneram custos maiores (DI BERNARDO et al., 2003).

Os ensaios de tratabilidade indicam a tecnologia de tratamento mais adequada, fornecem informações sobre os produtos químicos mais apropriados, tal como suas dosagens e também sobre parâmetros de projeto ótimos para as unidades de tratamento (BRASIL, 2006). Eles podem também servir para a otimização de condições operacionais já existentes na estação, além de servir de base para a reforma ou para a ampliação da mesma. Eles devem considerar a possibilidade de ocorrerem alterações na qualidade da água do manancial, bem como variações de vazões no abastecimento à ETA (DI BERNARDO et al., 2002).

3.4.1. Coagulação

A coagulação é o processo de desestabilização das partículas suspensas e coloidais que não sedimentam naturalmente, realizada pelas ações físicas e reações químicas do coagulante com a água e as impurezas na unidade de mistura rápida. Ela ocorre devido ao processo de hidrólise, onde os íons de ferro e alumínio provenientes do coagulante, positivamente carregados, liberam átomos de hidrogênio aumentando a concentração do íon H^+ , reduzindo o pH da solução e formando as espécies hidrolisadas. A partir daí, ocorre o contato destas espécies com as impurezas presentes, causando a sua desestabilização ou envolvimento dos precipitados (LIBÂNIO, 2010).

Segundo Pavanelli (2001), os principais coagulantes disponíveis no mercado são: Sulfato de Alumínio ($Al_2(SO_4)_3$), Sulfato Férrico ($Fe_2(SO_4)_3$), Cloreto Férrico ($FeCl_3$) e o Hidroxicloreto de Alumínio ($Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$), também conhecido como

Policloreto de Alumínio (PAC), que foi utilizado neste trabalho. Na coagulação, os principais mecanismos atuantes são: compressão de camada difusa (ou dupla camada); adsorção e neutralização; varredura e adsorção e formação de pontes (PAVANELLI, 2001).

A compressão de dupla camada, ocorre devido ao aumento da força. Os íons de carga positiva atravessam a camada compacta, reduzindo a magnitude do potencial zeta e a espessura da dupla camada, comprimindo-a, o que favorece a aproximação das partículas. Na adsorção e neutralização, as diversas espécies hidrolisadas de cargas positivas que foram formadas na dispersão do coagulante podem ser adsorvidas na superfície das partículas, desestabilizando-as. No mecanismo de varredura, as partículas coloidais são adsorvidas e as suspensas envolvidas pelo precipitado de hidróxido de alumínio ou de ferro. O floco formado adquire maior peso, sedimentando com maior facilidade nas unidades de decantação, tornando esse mecanismo predominante nas estações convencionais. Por fim, a formação de pontes químicas ocorre quando há o emprego de polímeros orgânicos naturais ou sintéticos. As partículas coloidais são adsorvidas na superfície das diversas cadeias dos polímeros cujas moléculas devem ser longas o suficiente para permitir a adsorção em sua superfície e minimizar o efeito repulsivo da dupla camada quando há a aproximação de mais de uma partícula (LIBÂNIO, 2010).

Na correta aplicação dos produtos químicos da coagulação deve haver um sistema que ofereça condições ideais para os fenômenos de dispersão e mistura. Segundo a NBR 12216, como unidade de mistura rápida, pode ser utilizado qualquer trecho ou seção de canal ou de canalização que produza perda de carga compatível com as condições desejadas, em termos de gradiente de velocidade e tempo de mistura. Mas de maneira geral, a mistura rápida é realizada por métodos mecanizados e hidráulico (LIBÂNIO, 2010). A unidade mecanizada consiste na introdução de potência, em função de um gradiente de velocidade, na água por meio de agitadores mecânicos em forma de hélice ou turbina. Já a hidráulica ocorre em unidades que utilizam a energia hidráulica, tais como os vertedores de seção retangular ou triangular e medidores Parshall, de maneira que a dispersão do coagulante possa ocorrer sobre a queda d'água ou imediatamente a montante do ressalto hidráulico (LIBANIO, 2010).

Libânio (2010) afirma que a escolha do mecanismo ideal de mistura rápida está condicionada a fatores como: a localização geográfica em relação aos centros mais

desenvolvidos, que é relevante na necessidade de manutenção e operação do sistema, assim como as características da água bruta quanto a mesma é utilizada como solvente para o preparo da solução de coagulante. A principal vantagem do sistema mecanizado é a flexibilidade de poder variar o gradiente de velocidade da mistura rápida alterando somente a rotação do agitador. Entretanto, o gasto de energia se mostra como a principal desvantagem em relação ao hidráulico. Há também, no caso dos mecanismos hidráulicos, as unidades de mistura por injetor, malha de fios e difusores e também as unidades de mistura em tubulações com dispositivos especiais. Todos estes sistemas são ilustrados nas Figuras 3.2 a 3.5.

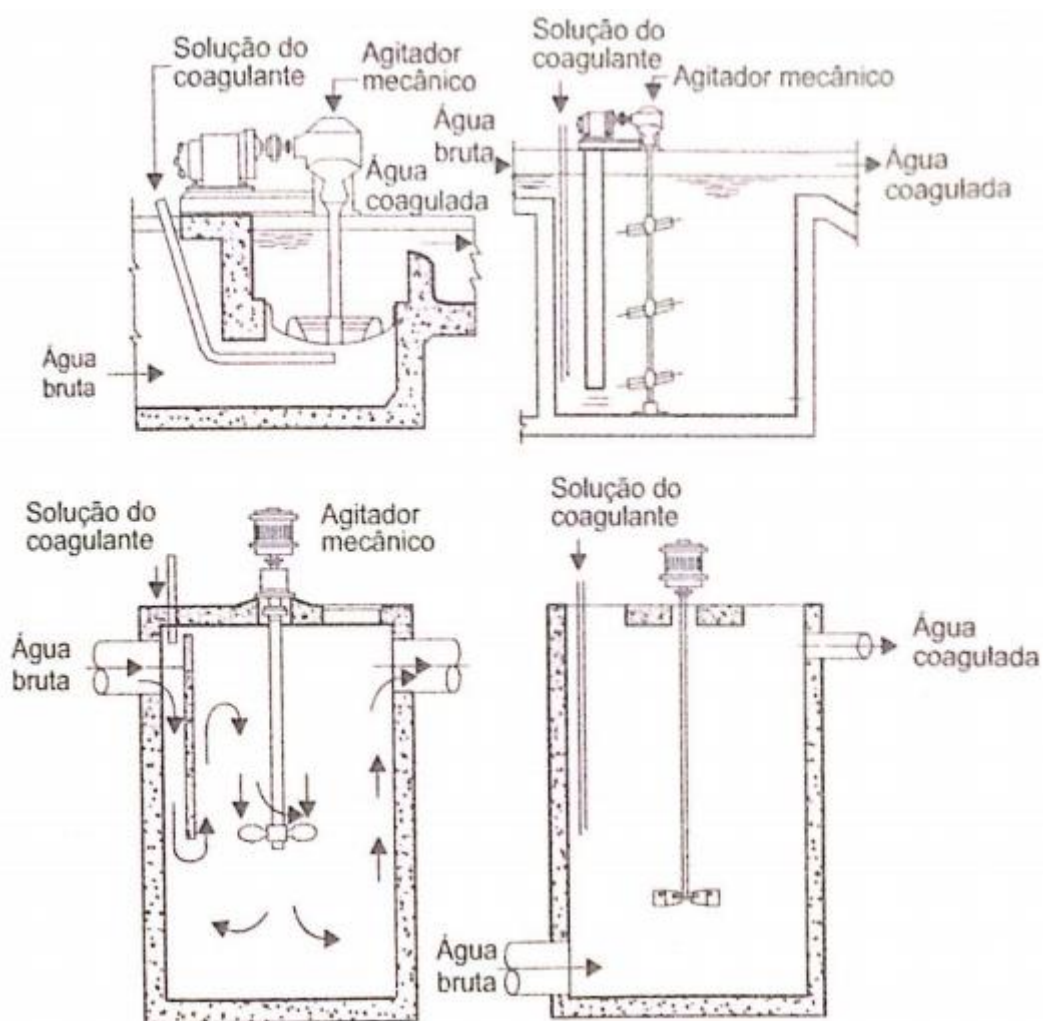


Figura 3.2 – Tipos de unidades de mistura rápida em câmaras com agitadores mecânicos.

Fonte: DI BERNARDO (2005).

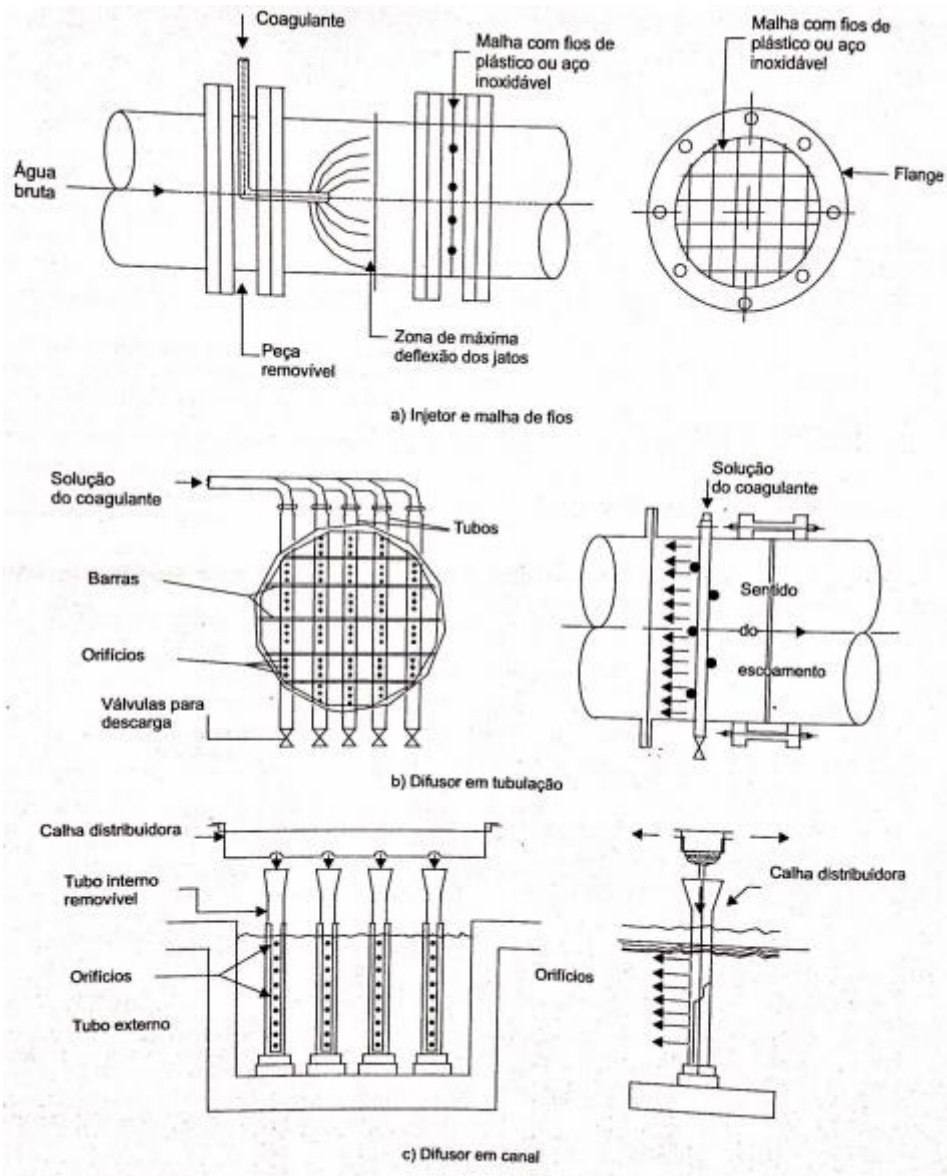


Figura 3.3 – Tipos de unidades de mistura rápida por meio de injetor e malha de fios e de difusores.

Fonte: DI BERNARDO (2005).

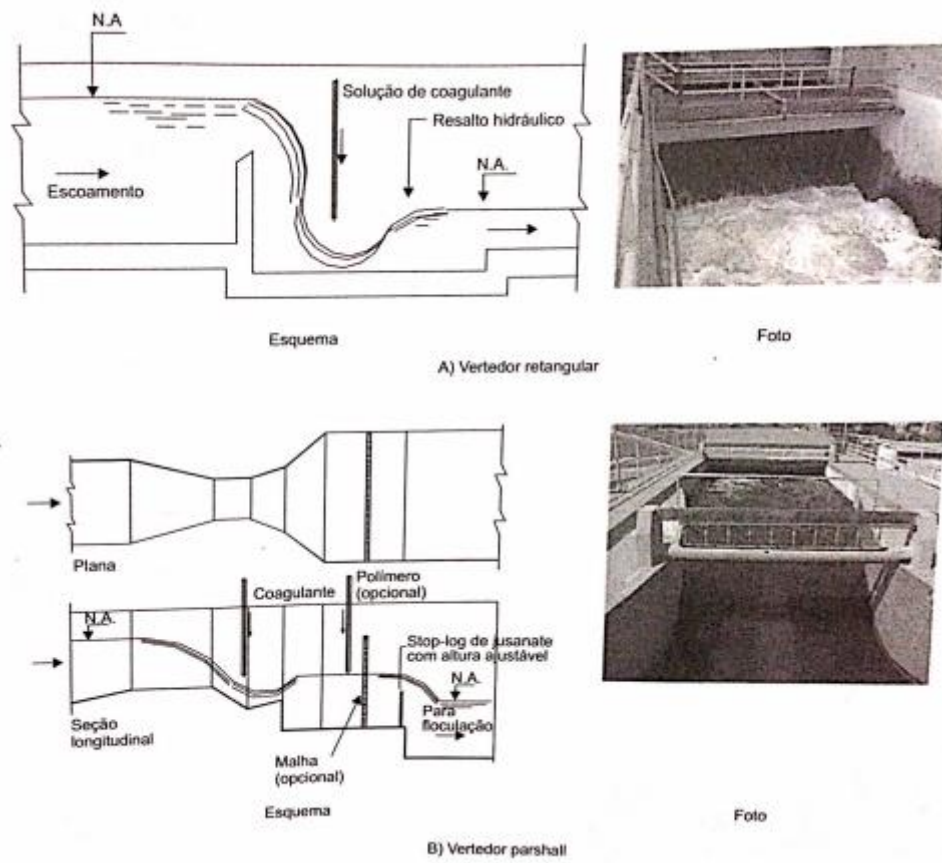


Figura 3.4 – Tipos de unidades de mistura rápida com ressalto hidráulico.

Fonte: DI BERNARDO (2005).

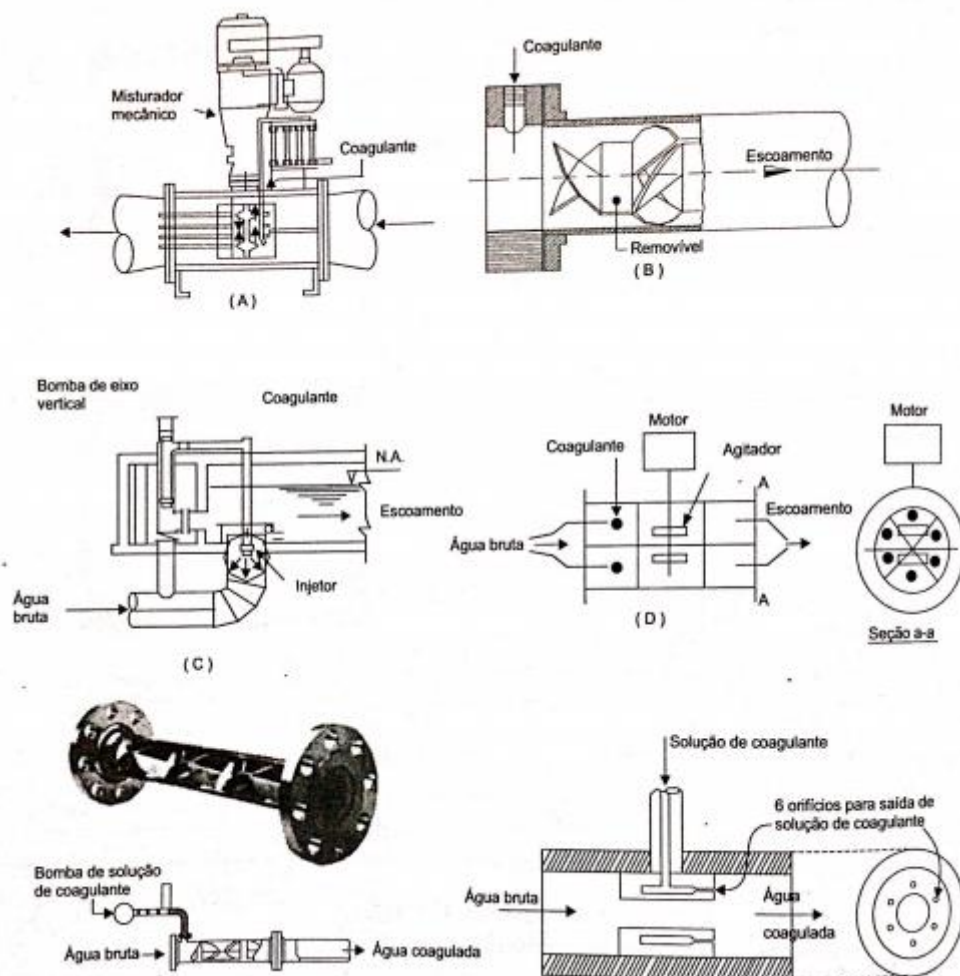


Figura 3.5 – Tipos de unidades de mistura rápida em tubulações com dispositivos especiais.

Fonte: DI BERNARDO (2005).

Um dos principais objetivos da coagulação é a remoção de partículas de dimensões microscópicas que associam-se à microrganismos patogênicos. Os flocos formados a partir da coagulação apresentam dimensões variando entre 2 e 4 μm . Os diferentes tipos de microrganismos apresentam variações de tamanhos tanto acima quanto abaixo das dimensões dos flocos, como por exemplo as bactérias do gênero *Salmonella* e coliformes totais (0,5 a 2,0 μm), os vírus (0,025 a 0,1 μm) e os protozoários (10 a 14 μm para cistos de *Giardia* e 4 a 6 μm para oocistos de *Cryptosporidium*). Porém, espera-se, como consequência da coagulação, que esses seres sejam envolvidos na formação das partículas maiores a serem sedimentadas (LIBÂNIO, 2010). A Figura 3.6 mostra o tamanho de partículas e microrganismos presentes nas águas naturais.

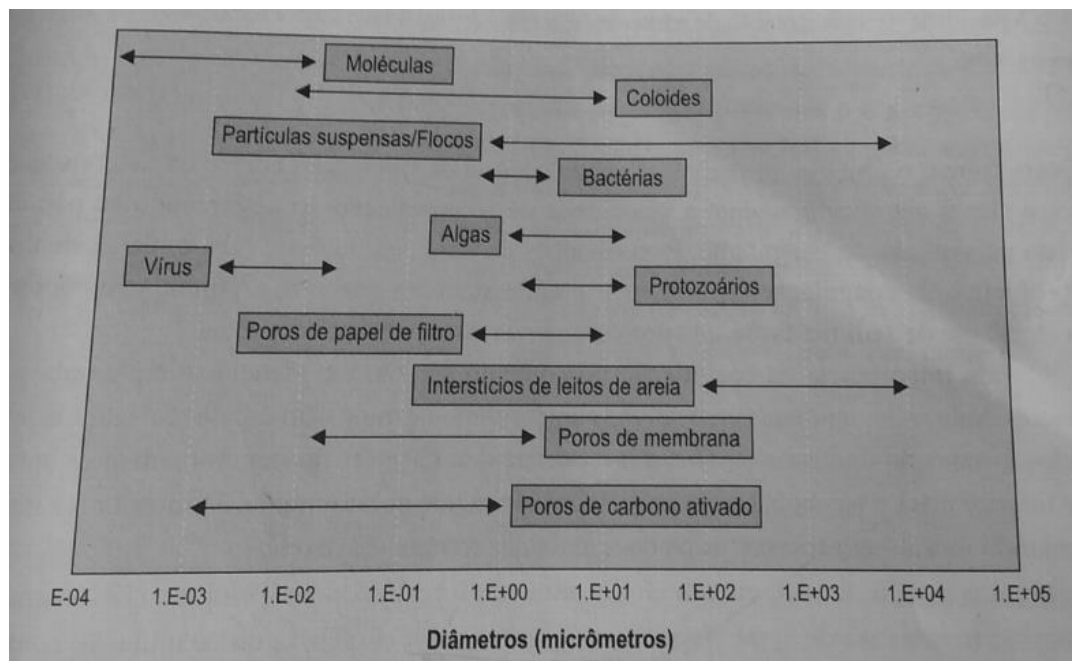


Figura 3.6 – Dimensões das partículas e microrganismos presentes nas águas naturais.

Fonte: LIBÂNIO (2010).

Segundo Borba (2001), os coagulantes apresentam algumas propriedades constituintes das suas características específicas, como por exemplo, a reversão de cargas, razão pela qual eles são eficientes na aglutinação de partículas sólidas e impurezas na água. No caso dos polieletrólitos, experimentos indicam que eles dispensam a adição de alcalinizantes na água, mesmo quando a alcalinidade natural for baixa, o que amplia a faixa de pH ótimo para a coagulação nesses casos. Já com os coagulantes convencionais, estes só irão ser eficientes se a água contiver alcalinidade natural ou adicionada. Além disso, a superfície dos agregados deve ser grande, de maneira que permita a adsorção de substâncias dissolvidas e a aplicação dos coagulantes não devem causar problema à saúde da população que receberá a água tratada (BORBA, 2001).

3.4.2. Policloreto de Alumínio

O Policloreto de Alumínio (PAC), é um complexo polinuclear de íons de alumínio polimerizados. Um tipo de polímero inorgânico de peso molecular medido em centenas de unidades. Ele é geralmente formulado como: $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$, combinado com pequenas quantidades de outros compostos (CONSTANTINO e YAMAMURA, 2009). Os sais de alumínio estão entre os compostos mais usados nas estações de tratamento de água, sendo muito comum a utilização do PAC. Apesar de ser mais caro

que os outros coagulantes, ele é fácil de ser manuseado, estocado e dosado. Ele é o coagulante utilizado pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto de Ouro Preto em todas as estações de tratamento de água do município e foi o escolhido para a utilização neste trabalho.

Experimentos feitos por Constantino e Yamamura (2009), comparando o PAC com o Sulfato de Alumínio indicaram que o primeiro teve ação coagulante muito boa fazendo com que os flocos se formassem primeiro e em tamanhos maiores, facilitando também a decantação. Eles também verificaram que a faixa de pH para a aplicação do PAC foi maior e o consumo de alcalinidade foi menor, em relação ao Sulfato de Alumínio e que “não há necessidade de outros componentes na floculação: vários são os produtos químicos orgânicos e inorgânicos comumente usados como aditivos de floculação, mas geralmente quando se usa o PAC não há necessidade de nenhum outro composto”. Segundo Constantino e Yamamura, o PAC “é geralmente eficaz em uma faixa de pH compreendida entre 6 e 9, mas em alguns casos ele funciona bem em faixas que vão de pH 5 até pH 10.” Essa afirmação pode ser comprovada pela Figura 3.7, que mostra a redução da turbidez residual em mais faixas de pH na utilização do PAC quando comparado com o Sulfato de Alumínio.

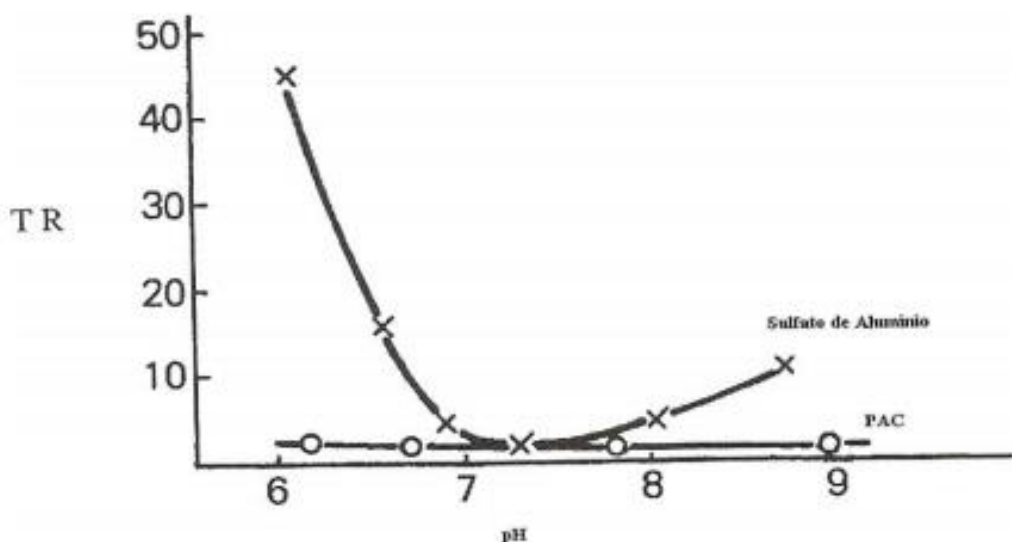


Figura 3.7 – Comparação: turbidez residual em função do pH para o PAC e o Sulfato de Alumínio.

Fonte: CONSTANTINO E YAMAMURA (2009).

Ainda segundo Constantino e Yamamura (2009), a relação $m/3n$ na fórmula do PAC representa a basicidade deste produto. Devido a esta característica, ele libera durante a hidrólise, em igualdade de dosagem em íons metálicos, uma quantidade de

ácido consideravelmente menor do que a liberada pelo Cloreto de Alumínio e pelos coagulantes tradicionais como o Sulfato de Alumínio, Cloreto Férrico e Sulfato Ferroso. Isso faz com que haja uma pouca variação do pH na água que está sendo tratada, de modo a economizar na utilização de agentes neutralizante. Além disso, segundo Furtado (2010), conforme citado por Machado (2011), “o PAC é dosado duas a oito vezes menos que o sulfato de alumínio, gera menos lodo, clarifica melhor a água, necessitando menos cloro e facilitando a filtração, diminuindo a frequência da lavagem de filtros”.

Portanto, como benefícios do PAC, destaca-se a substituição aos outros coagulantes com boa eficiência, é eficaz em larga faixa de pH, pode ser utilizado sem a adição de outros compostos químicos, forma flocos grandes facilitando a posterior sedimentação, na forma líquida é de fácil manuseio e tem boa relação custo benefício.

3.4.3. Flocculação

A flocculação é uma das operações unitárias de clarificação da água, que ocorre imediatamente após a mistura rápida do coagulante e visa, juntamente com a coagulação, reduzir o número de partículas suspensas e coloidais presente na água (LIBÂNIO, 2010). Após a adição do coagulante, das suas reações com a água na formação de espécies hidrolisadas e no transporte destas para estimular o contato com as impurezas presentes na água, é iniciada a flocculação que é o processo de agitação lenta, para que ocorram choques entre estas impurezas, que se aglomeram formando partículas maiores, os flocos, que podem ser removidos por sedimentação, flotação ou filtração rápida (DI BERNARDO, 2005).

Segundo Richter & Azevedo Netto (1991) citados por Silva (2011), a flocculação pode ser pericinética, quando o movimento das partículas se dá através do movimento browniano, ou ortocinética, quando o movimento se dá por gradiente de velocidade gerado por flocculação hidráulica ou flocculação mecânica. Já Libânio (2010) acrescenta que o transporte das partículas pode ocorrer também devido às distintas velocidades de sedimentação dos flocos (sedimentação diferencial). Os parâmetros que condicionam a eficiência da flocculação são: o gradiente de velocidade e o tempo de detenção hidráulico.

Os primeiros contatos entre as partículas desestabilizadas acontecem na unidade de mistura rápida, devido ao movimento Browniano e à ação da gravidade, de modo que elas se chocam e se aglomeram formando pequenos flocos, em geral, menores que 1

μm . É também através do movimento Browniano que pode haver o contato entre os flocos já formados e com maiores dimensões com as partículas desestabilizadas remanescentes, dando relevância à floculação pericinética (LIBÂNIO, 2010).

A sedimentação diferencial acontece devido à desuniformidade de volume e de densidade dos flocos formados, que adquirem velocidades de sedimentação distintas e concorrem para que, na unidade de decantação, ocorram os choques durante o movimento descendente, havendo a conseqüente formação de flocos mais pesados. Esse fenômeno sucede-se com maior intensidade no início da unidade de decantação quando a concentração de flocos afluyente é mais elevada (LIBÂNIO, 2010).

A floculação ortocinética é o único dos mecanismos de transporte das partículas no qual o profissional pode atuar de forma a otimizar a operação. Ela decorre da introdução de energia externa que fomenta a aglutinação das partículas desestabilizadas e dos microflocos, inicialmente formados no movimento Browniano, para a formação de flocos com dimensões maiores para serem sedimentados ou flotados (LIBÂNIO, 2010).

Os sistemas de floculação podem ser classificados em hidráulicos ou mecanizados. Os primeiros apresentam algumas vantagens, como: menor custo de implantação, operação e manutenção e não exigir qualificação pessoal para operar o sistema. Apesar disso, são pouco flexíveis em relação à variação de vazão, tendo perda de carga relativamente alta e impossibilitando variar ou ajustar o gradiente de velocidade, o que é a principal vantagem do floculador mecanizado. A escolha do sistema deve considerar fatores como: a qualidade de água bruta, o mecanismo de coagulação, o tamanho das unidades a existência de pessoal qualificado para operação e manutenção, o regime de funcionamento, etc (DI BERNARDO, 2005). As figuras 3.8 a e b e 3.9 a; b; c e d mostram tipos de floculadores hidráulicos e mecanizados, respectivamente.

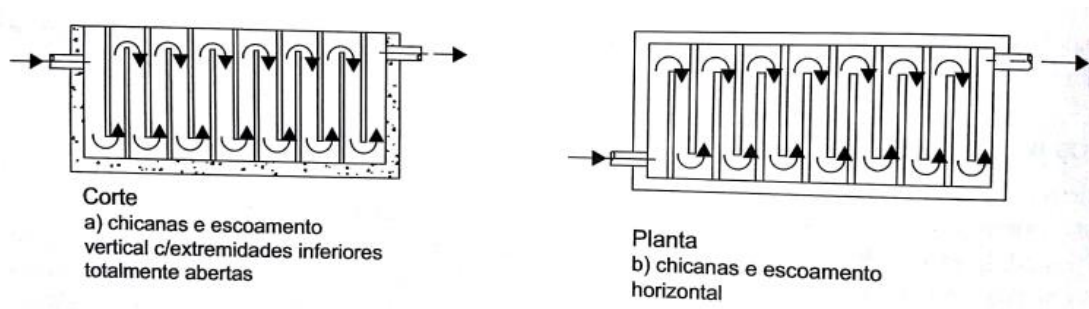


Figura 3.8 – Alguns tipos de flocladores hidráulicos.

Fonte: DI BERNARDO (2005).

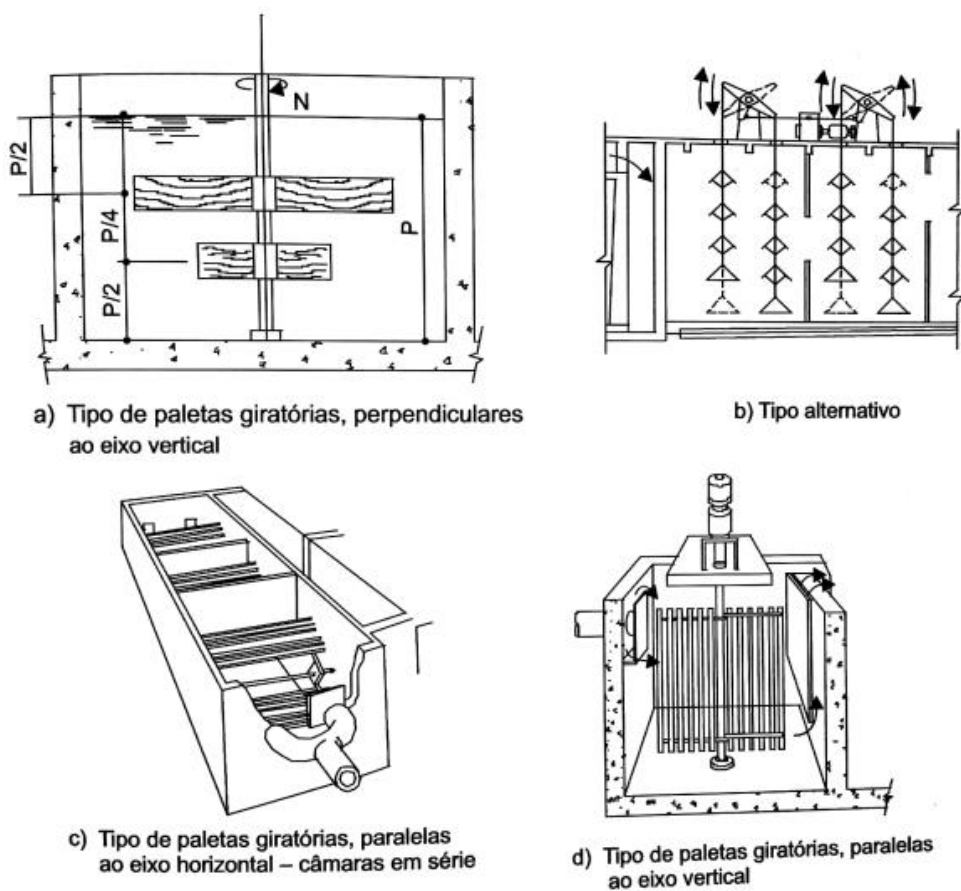


Figura 3.9 – Alguns tipos de flocladores mecanizados.

Fonte: DI BERNARDO (2005).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Atividades realizadas

As atividades do projeto foram realizadas inicialmente com a escolha dos locais ideais para a coleta de água nos Rios Doce e Piranga. As amostras de água foram colhidas no final do período de seca, dia 14 de Setembro de 2017 no Rio Doce e 29 de Setembro do mesmo ano no Rio Piranga. Após a coleta foi feita uma caracterização da água coletada, determinando parâmetros de turbidez, pH, cor, condutividade e alcalinidade. Posteriormente, foram feitos ensaios de bancada com o Jarrest (teste de jarros) para a determinação da melhor concentração de coagulante, do pH ótimo de coagulação e dos melhores parâmetros de mistura rápida e floculação.

As etapas das atividades realizadas estão descritas na Figura 4.1.

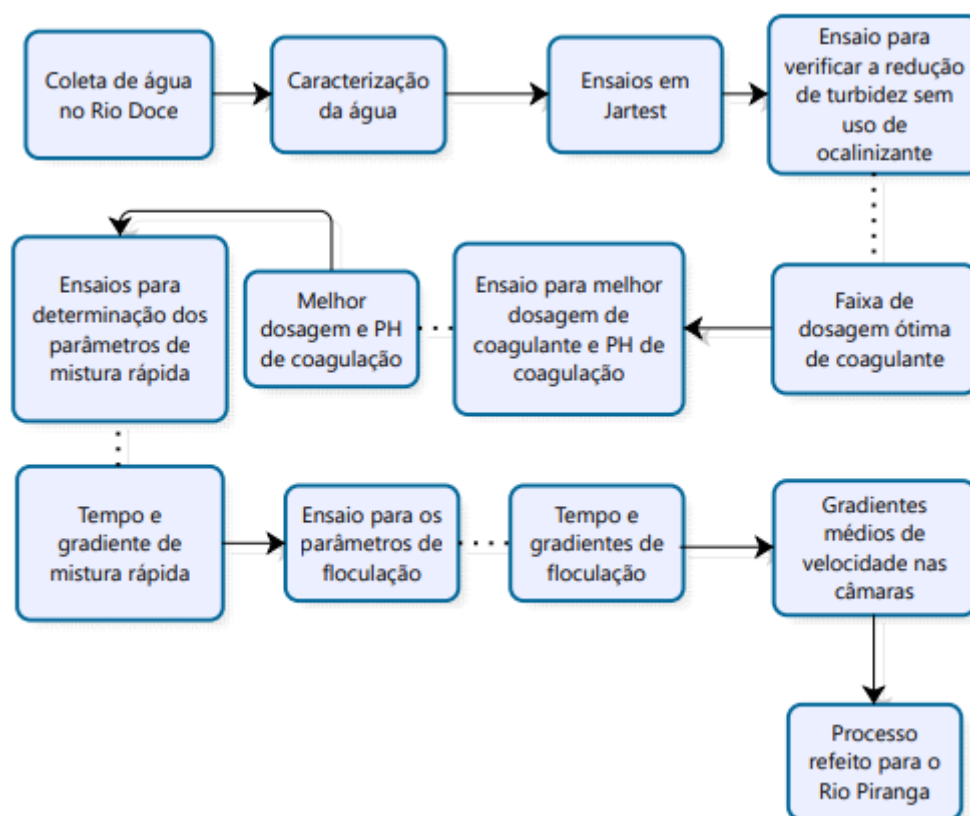


Figura 4.1 – Fluxograma das atividades realizadas no trabalho.

Fonte: AUTOR (2018).

4.2. Características dos mananciais

A bacia hidrográfica do rio Doce possui área de drenagem de 86.715 quilômetros quadrados, sendo que 86% situa-se no leste mineiro e o restante no nordeste do Espírito Santo. O rio Doce tem extensão de 879 quilômetros e suas nascentes estão em Minas, nas Serras da Mantiqueira e do Espinhaço. Ele recebe esse nome após a confluência do rio do Carmo com o rio Piranga, em local próximo ao município de rio Doce. No passado, uma das principais atividades econômicas era a extração de ouro. Hoje, o sistema de drenagem é importante em sua economia, fornecendo água para uso doméstico, agropecuário, industrial e geração de energia elétrica. A população da bacia do rio Doce é estimada em torno de 3,5 milhões de habitantes e está distribuída em 228 municípios, sendo 200 mineiros e 28 capixabas (CBH DOCE, 2016).

Já a bacia hidrográfica do rio Piranga insere-se totalmente no estado de Minas Gerais, ocupando uma área de 17.571 quilômetros quadrados, estando sua maior parte nas regiões da Zona da Mata e Campos das Vertentes. Ela é a microbacia do rio Doce com maior número de municípios, abrangendo 77 cidades. É composta pelos rios Piranga, do Carmo, Casca e Matipó e por áreas de drenagem de outros córregos menores, como os rios do Peixe, Sem Peixe e Sacramento e ribeirões Mombaça, do Turvo e do Belém. O rio Piranga nasce no município de Ressaquinha e percorre 470 quilômetros. Seus principais afluentes são os rios São Bernardo, Xopotó, Turvo Limpo e Oratórios. Estima-se, com base no Plano de Ação de Recursos Hídricos do Comitê da Bacia do Rio Piranga, que a população total da bacia é de cerca de 700 mil pessoas. Na economia, há predominância do setor de serviços, seguido da indústria e agropecuária. A pecuária ocupa 53%, com destaque para a criação de suínos, atividade que demanda ações de controle e tratamento de dejetos. Já a agricultura ocupa 41% da área da unidade (CBH PIRANGA, 2013).

Os locais de coleta nos rios foram escolhidos visando a maior proximidade e facilidade de acesso possível às estações RD072, no rio Doce e RD013, no Rio Piranga, onde é feita coleta periódica da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, respectivamente, visando o monitoramento contínuo dos parâmetros de qualidade da água. As coordenadas geográficas dos pontos de coleta no rio Doce são 20° 14' 53,40" Sul e 42° 53' 06,07" Oeste, debaixo da ponte na chegada ao município de mesmo nome do manancial, e no

rio Piranga são: 20° 23' 01" Sul e 42° 54' 08" Oeste, debaixo da ponte próxima à Ponte Nova e ao trevo que dá acesso à BR-120. As localizações são ilustradas nas Figuras 4.2 e 4.3.



Figura 4.2 – Localização do ponto de coleta no Rio Doce.

Fonte: GOOGLE EARTH (2017, ADAPTADO PELO AUTOR).



Figura 4.3 – Localização do ponto de coleta no Rio Piranga.

Fonte: GOOGLE EARTH (2017, ADAPTADO PELO AUTOR).

Em ambos os rios foram coletados 15 galões com capacidade para 20 litros de água, totalizando 300 litros. A água foi levada para o laboratório, armazenada em uma caixa d'água e homogeneizada sempre antes da realização dos ensaios.

4.3. Materiais utilizados

Para a realização dos ensaios laboratoriais e medição dos parâmetros necessários neste trabalho, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Jarteste: reator de bancada para ensaios da marca Ethiktechnology, modelo 218-6 LDB, com seis jarros de capacidade de 2L cada, contendo paletas com rotações de variação programável entre 20 a 600 rpm e ajustáveis por controlador digital (Figura 4.4);
- Turbidímetro: leitor de turbidez da marca Hach, modelo 2100Q (Figura 4.5);
- Multiparâmetro: medidor de multifunções da marca Hach, modelo HQ40D, com dois canais para pH (Figura 4.6);
- Condutivímetro: medidor digital de condutividade da marca Digimed, modelo DM-32 (Figura 4.7);
- Coagulante: foi utilizado o Policloreto de Alumínio – PAC, de fórmula química $(Al_n(OH)_mCl_3)$, com concentração de 16 a 18%, fornecido pelo SEMAE OP, que é utilizado pela prestadora de serviços de saneamento nas estações do município de Ouro Preto;
- Alcalinizante: para fazer o ajuste do pH nos ensaios, foi utilizado o Geocálcio, nome comercial do Hidróxido de Cálcio $(Ca(OH)_2)$ com concentração de 19 a 21%. Ele também foi fornecido pelo SEMAE OP;
- Equipamentos diversos: termômetro, cronômetro e vidrarias de laboratório.

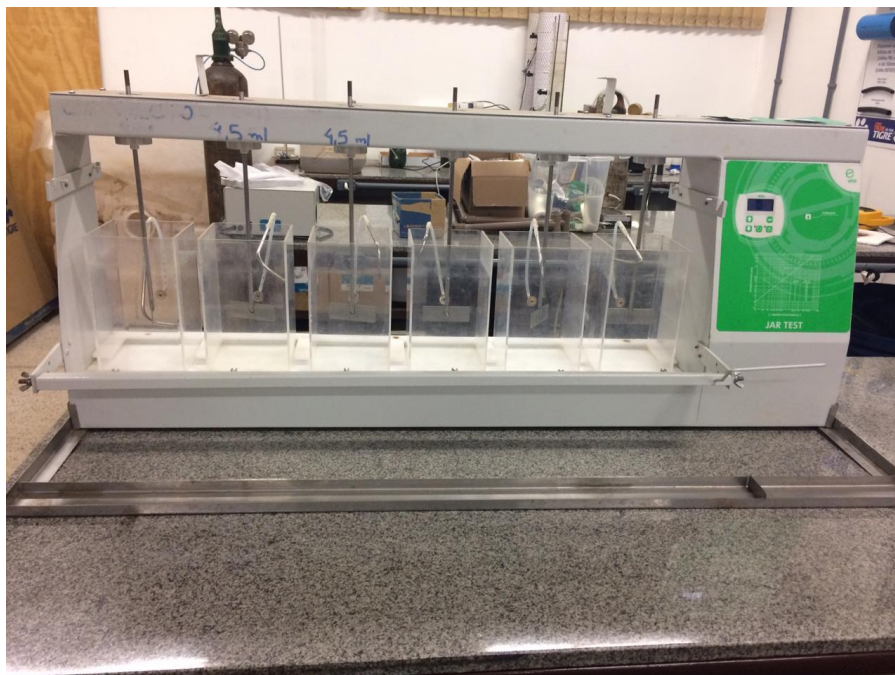


Figura 4.4 – Jarteste utilizado nos ensaios de bancada.

Fonte: AUTOR (2018).



Figura 4.5 – Turbidímetro utilizado.

Fonte: AUTOR (2018).



Figura 4.6 – Multiparâmetro utilizado.

Fonte: AUTOR (2018).



Figura 4.7 – Condutivímetro utilizado.

Fonte: AUTOR (2018).

4.4. Caracterização da água

Antes de se iniciar os ensaios de bancada, foi feita uma caracterização da água bruta coletada com base nos parâmetros de turbidez, pH, condutividade e alcalinidade. Os três primeiros parâmetros foram medidos pelos equipamentos devidamente calibrados, enquanto a alcalinidade foi realizada conforme o procedimento descrito no manual de análises do laboratório feito com base na 22ª edição do *Standard Methods* (2012).

4.5. Ensaio de bancada – Jarteste

Os ensaios no Jarteste foram realizados com base nos procedimentos realizados por Pavanelli (2001) e Bergamin (2017):

1. Pipetar o coagulante nas cubetas conforme a dosagem preestabelecida;
2. Colocar 2 litros da água previamente homogeneizada em cada jarro do Jarteste;
3. Pipetar o alcalinizante dentro dos jarros, conforme pH desejado;
4. Descer as paletas e ligar o Jarteste, deixando-as agitar um pouco os jarros, para misturar o alcalinizante, antes de adicionar o coagulante;
5. Ajustar o programa do equipamento para os parâmetros desejados (tempos e gradientes de mistura rápida e floculação);
6. Ligar o equipamento e disparar o cronômetro;
7. Adicionar o coagulante em tempo preestabelecido visando obter o tempo de mistura rápida (T_{mr}) desejado;
8. Diminuir a rotação, após o T_{mr} , para o gradiente de floculação desejado;
9. Desligar o aparelho após decorrer o tempo de floculação (T_f) desejado;
10. Aguardar 1 minuto e 52 segundos para que o flocos formados possam decantar. Este tempo se equivale à velocidade de sedimentação de 3,5 cm/min que foi previamente estabelecida para todos os ensaios.
11. 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;
12. Medir a turbidez da água coletada em cada jarro.

4.6. Determinação da melhor dosagem de coagulante e pH

Para a realização dos primeiros ensaios, que visaram a determinação da dosagem ideal de coagulante e do melhor pH de coagulação, foram fixados os parâmetros de funcionamento do Jarteste com base nos limites indicados por Di Bernardo (2005) e nos estudos feitos por Bergamin (2017), que utilizou o mesmo coagulante (PAC) em água com condições semelhantes. Dessa forma, os parâmetros escolhidos foram:

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados no Jarteste para os ensaios de dosagem de coagulante e pH.

Tempo de Mistura Rápida – Tmr (s)	Gradiente de Mistura Rápida – Gmr (s^{-1})	Tempo de Floculação – Tf (min)	Gradiente de Floculação – Gf (s^{-1})	Velocidade de Sedimentação – Vs (cm/min)
10	800	20	35	3,5

Fonte: DI BERNARDO (2005) apud BERGAMIN (2017, ADAPTADO).

Di Bernardo (2005) indica que, para a coagulação por mecanismo de varredura, considerando diversos tipos de coagulantes, o Gmr varie entre 500 a $1.200 s^{-1}$ com um Tmr menor ou igual a 60 segundos e uma relação Gf x Tf variando entre 10.000 e 30.000.

Inicialmente, variando-se a dosagem de coagulante entre 10 e 35 mg/L, foi realizado um ensaio sem a presença de alcalinizante, para verificar a necessidade do mesmo visando obter um pH dentro da faixa de ação do PAC para melhor eficácia na redução da turbidez. A partir deste ensaio, foi possível gerar a Tabela 5.2, observar as dosagens de coagulante que obtiveram melhor redução na turbidez e utilizá-las para a variação da concentração de coagulante nos próximos testes.

Os próximos ensaios foram realizados variando a faixa de pH de 6,5 a 9, variando 0,5 em cada jarro, e as dosagens de coagulante em torno daquelas de melhor resultado no ensaio anterior. A faixa de variação escolhida foi de 22,5 a 32,5 mg/L de coagulante, variando de 2,5 mg/L. Nos ensaios do rio Doce essa faixa foi estendida até a concentração de 35,0 mg/L, pois, tendo em vista que o melhor resultado para essa água foi com o valor de 32,5 mg/L, fez-se necessário verificar se, aumentando a dosagem, obter-se-ia um resultado melhor de turbidez, o que não aconteceu. As menores turbidez residuais de cada água determinaram qual foi o pH ideal e a dosagem ótima

de coagulante para cada uma. Estes resultados constam nas Tabelas 5.3 a 5.8 e foram utilizados nos ensaios posteriores.

4.7. Determinação dos parâmetros ótimos de Mistura Rápida no Jarteste.

Tendo os parâmetros otimizados de dosagem de coagulante e pH de coagulação, resultantes da última etapa de ensaios, os ensaios para a determinação dos parâmetros de mistura rápida (T_{mr} e G_{mr}) foram realizados com o tempo de floculação (T_f) de 20 minutos, o gradiente médio de velocidade de 20 s^{-1} , mantendo-se a velocidade de sedimentação (V_s) de $3,5 \text{ cm/min}$.

O tempo de mistura rápida foi variado de 5 a 30 segundos, em cada jarro, variando de 5 em 5 segundos. Para isso, foi fixado no sistema do Jarteste o valor de T_{mr} de 30 segundos. Ao iniciar o processo, a cada espaço de tempo de 5 segundos era adicionado o coagulante nos jarros em sequência, de maneira que cada jarro obteve tal tempo de mistura rápida do coagulante. Os gradientes de mistura rápida avaliados foram os de $400, 600, 800, 1000$ e 1200 s^{-1} .

Os resultados destes ensaios estão demonstrados nas Tabelas 5.9 e 5.10. O menor valor de turbidez indica o tempo e o gradiente de mistura rápida ideal para cada água. Esse par de parâmetros será utilizado na etapa de mistura lenta.

4.8. Determinação dos parâmetros ótimos de Floculação no Jarteste

Por fim, com os parâmetros de dosagem de coagulante, pH, tempo e gradiente de mistura rápida de cada água determinados, foram realizados os últimos ensaios de bancada que objetivaram avaliar os parâmetros da floculação. Foram variados o tempo de floculação em cada jarro e os gradientes de velocidade, com a velocidade de sedimentação de $3,5 \text{ cm/min}$. O tempos estudados foram de 5, 10, 20, 30, 45 e 60 minutos. O Jarteste era programado com o tempo máximo de 60 minutos e a água era coletada em cada jarro, respeitando esse tempo. Os gradientes de velocidade utilizados nos ensaios foram de $20, 30, 40, 55$ e 70 s^{-1} . Com os resultados de turbidez residuais obtidos, foram criadas as Tabela 5.12 e 5.13 para a velocidade de sedimentação estudada. Além disso, foram gerados gráficos com os diferentes gradientes estudados e a interpolação dos valores de turbidez residual no tempo de floculação de 60 minutos, visando determinar o sistema ideal de câmaras de floculação para ambos os casos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão expostos os resultados obtidos nos experimentos em laboratório e serão feitas discussões sobre os mesmos.

5.1. Características dos pontos de coleta e da água coletada.

A Tabela 5.1 contém informações sobre os pontos de coleta no rio Doce e no Rio Piranga tal como parâmetros de pH, Turbidez, Alcalinidade e Condutividade da água bruta coletada nestes respectivos pontos e utilizada nos experimentos posteriores.

Tabela 5.1 – Características dos pontos de coleta e da água utilizada nos experimentos.

Curso d'água	Rio Doce	Rio Piranga
Data da Coleta	14/09/2017	28/09/2017
Altitude (m)	334	402
Descrição	Rio Doce, logo após sua formação.	Rio Piranga à jusante de Ponte Nova
pH	8,34 ± 0,20	8,39 ± 0,20
Turbidez (uT)	8,35 ± 1,00	4,27 ± 1,00
Condutividade (µS/cm)	83,67 ± 1,00	137,38 ± 1,00
Alcalinidade (Mg/L CaCO ₃)	29,57 ± 2,00	19,59 ± 2,00

Fonte: AUTOR (2017).

Nota-se que o pH das águas tem valores praticamente iguais e próximos da neutralidade, já inclusive estando dentro do padrão exigido pela portaria 2.914 de 2011 para água tratada. Pode-se verificar também que o pH do Rio Doce, mesmo após a contaminação com o rejeito da Barragem de Fundão, se manteve dentro do indicado pela legislação. Os registros feitos pelo IGAM, em um relatório de monitoramento de junho de 2017 também comprovam esse fato.

A turbidez do rio Doce se mostrou maior do que a do rio Piranga, mas em valores que considerados normais, tendo em vista os valores registrados pouco depois do acidente e também a média histórica do local. Em uma monografia, Affonso (2016) fez medições entre Janeiro de 2014 e Outubro de 2015, da turbidez do Rio Piranga. Os valores conseguidos por ele, para o mesmo ponto de coleta de deste estudo, em Ponte Nova, são mostrados na Figura 5.1:

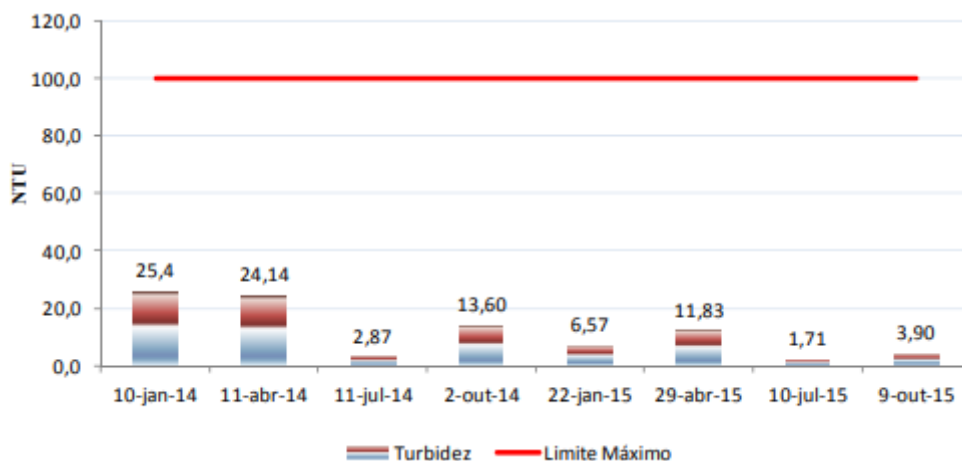


Figura 5.1 – Valores de turbidez no Rio Piranga (coletados no município de Ponte Nova) entre Janeiro de 2014 e Outubro de 2015.

Fonte: AFFONSO (2016).

Em um relatório técnico de monitoramento das águas do Rio Doce feito pelo IGAM em Junho de 2017, tem-se a Figura 5.2 com a variação da turbidez de 7 de novembro de 2015, dois dias após o rompimento da barragem, à janeiro de 2017 no mesmo ponto onde a água deste estudo foi coletada. Segundo o próprio instituto, a média histórica nesse ponto é de 57,1 uT.

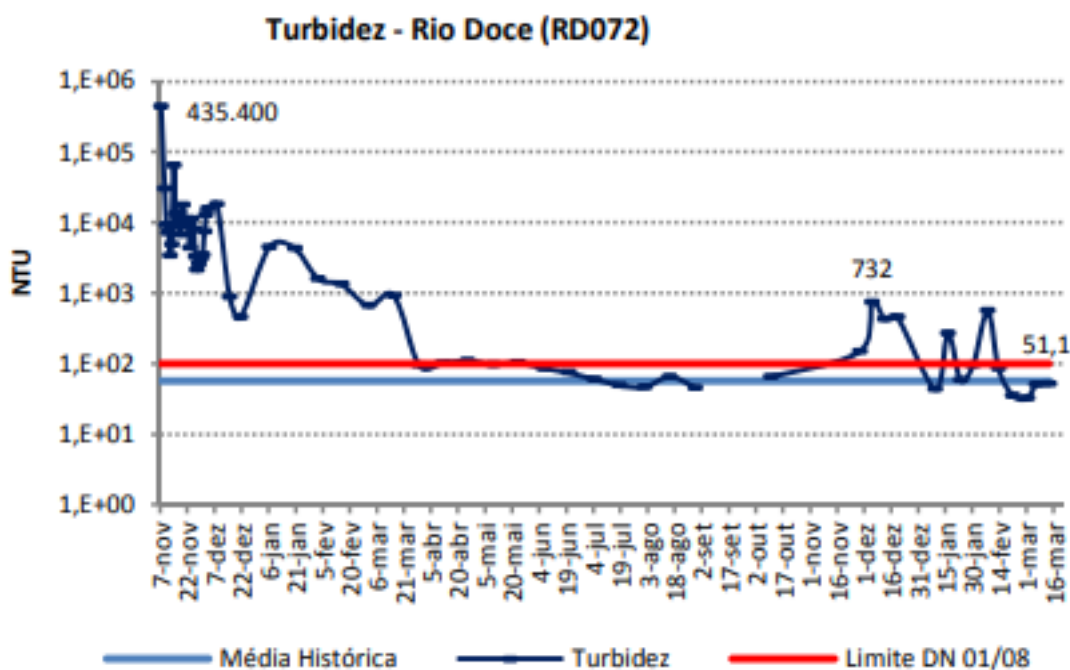


Figura 5.2 – Valores de turbidez no Rio Doce (coletados no município de Rio Doce) entre Novembro de 2015 e Janeiro de 2017.

Fonte: IGAM (2017).

Estes dados demonstram o quanto a turbidez no Rio Doce foi exponencialmente aumentada em virtude dos sedimentos da barragem rompida e o quanto ela variou durante o ano, chegando a 435.400 uT após o acidente e a menos de 100 uT no período de estiagem do ano seguinte. Ainda segundo o IGAM (2017), para o mesmo ponto de coleta da água, a turbidez máxima registrada entre janeiro de 2000 e outubro de 2015 foi de 604 uT e a mínima, 1 uT. Após o acidente, a turbidez mínima registrada foi de 10 uT, no período entre novembro de 2016 e agosto de 2017, exatamente antes da realização da coleta para este trabalho. Como água bruta do Rio Doce nesse estudo foi coletada em setembro de 2017 e registrou turbidez de 8,35 uT, nota-se também que, 2 anos após o acidente, houve uma melhora considerável nesse parâmetro ao longo do tempo, sendo registrado um valor menor do que os já encontrados pelo IGAM após a contaminação do rejeito.

No caso do Rio Piranga, o valor da turbidez encontrado na água coletada para este trabalho foi menor que a maioria dos valores apresentados no estudo demonstrado acima. Na comparação entre os gráficos acima e também com a média histórica da turbidez no Rio Doce, pode-se notar também que, acidente à parte, historicamente, a turbidez do Rio Doce é maior que a do Rio Piranga, o que contribui para as diferenças nos valores de turbidez neste estudo.

Quando à alcalinidade, não foram encontrados registros sobre este parâmetro nos rios Piranga e Doce. Segundo Libânio (2010), as águas superficiais no Brasil possuem alcalinidade, em geral, inferior a 100 mg/L CaCO_3 . Como não existe um padrão de potabilidade exigido para este parâmetro na legislação brasileira e os valores encontrados para as águas deste estudo estão abaixo da referência citada, eles foram considerados normais, de modo a não interferir nas condições dos ensaios. Apesar disso, em alguns casos, a alcalinidade pode influenciar na floculação, uma vez que os coagulantes são ácidos e abaixam o valor do pH da água durante o tratamento.

A condutividade elétrica é a capacidade que substâncias dissolvidas na água, geralmente ferro e manganês, têm de transmitir uma corrente elétrica. Tal como a alcalinidade, ela também não dispõe de padrão de potabilidade exigido pela legislação brasileira, mas ainda assim é um importante indicador da qualidade da água, se relacionando com os Sólidos Dissolvidos Totais (SDT). Os resultados encontrados neste estudo mostram a condutividade do Rio Piranga maior que a do Rio Doce e também que o valor usual para as águas naturais: 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (MASCARENHAS, 2018). Isso pode

ocorrer em locais próximo a áreas urbanas com alta concentração de sólidos dissolvidos totais provenientes de matéria orgânica. Após o desastre no Rio Doce, segundo o IGAM (2015), a condutividade no ponto de coleta deste estudo, que possui média histórica de 50,57 $\mu\text{S}/\text{cm}$, atingiu 244,80 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o que é normal, tendo em vista que a concentração de Ferro e Manganês aumentou rigorosamente. Dias após esse aumento, a condutividade voltou a bater valores considerados normais.

5.2. Otimização da dosagem de coagulante e do pH de coagulação.

Inicialmente foi testada a ação do coagulante (PAC) em diferentes concentrações (entre 10 e 35 mg/L) na floculação das partículas suspensas, sem a presença do alcalinizante, tendo verificado também o pH de coagulação da água. Estes resultados encontram-se na Tabela 5.2. Com isso, interpretou-se que o pH tanto da água do Rio Doce, quanto do Rio Piranga, não atingiu os valores usuais nas ETAs para a ação do coagulante, mas mesmo assim, em alguns casos, foi possível reduzir a turbidez pela metade. Todos os ensaios foram realizados sempre com a mesma velocidade de sedimentação: 3,5 cm/s.

Tabela 5.2 – Ensaio variando a concentração de PAC sem a presença de alcalinizante.

Jarro	Concentração (mg/L)	pH – Rio Doce	Turbidez (uT) – Rio Doce	pH – Rio Piranga	Turbidez (uT) – Rio Piranga
1	10	5,42	4,76	4,83	2,17
2	15	5,36	4,63	4,78	1,68
3	20	5,43	5,72	4,74	1,52
4	25	5,40	4,35	4,73	1,58
5	30	5,52	3,73	4,73	1,18
6	35	5,29	4,39	4,95	1,51

Fonte: AUTOR (2017).

Posteriormente, foram realizados outros cinco ensaios com a concentração de coagulante finamente ajustada para a faixa onde se obteve maior redução de turbidez: 22,5 e 35 mg/L para o Rio Doce e 22,5 e 32,5mg/L para o Rio Piranga. O pH de coagulação foi fixado com alcalinizante em cada jarro, entre aproximadamente 6,5 e 9, faixa onde, usualmente, o PAC obtém os melhores resultados de coagulação, segundo os operadores de ETAs da região. Os resultados são demonstrados nas tabelas 5.3 a 5.8:

Tabela 5.3 – Ensaio com concentração de PAC de 22,5 mg/L.

Jarro	Concentração (mg/L)	pH – Rio Doce	Turbidez (uT) – Rio Doce	pH – Rio Piranga	Turbidez (uT) – Rio Piranga
1	22,5	6,52	10,30	6,55	2,98
2	22,5	7,03	9,42	6,95	2,75
3	22,5	7,49	12,5	7,48	3,25
4	22,5	7,91	5,06	8,08	3,38
5	22,5	8,55	5,47	8,42	2,13
6	22,5	8,98	6,84	9,05	2,71

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 5.4 – Ensaio com concentração de PAC de 25 mg/L.

Jarro	Concentração (mg/L)	pH – Rio Doce	Turbidez (uT) – Rio Doce	pH – Rio Piranga	Turbidez (uT) – Rio Piranga
1	25	6,48	5,68	6,55	2,31
2	25	7,03	8,34	6,98	2,85
3	25	7,53	5,99	7,47	2,51
4	25	8,05	6,37	7,95	1,99
5	25	8,13	5,53	8,50	2,30
6	25	9,02	6,41	9,06	3,07

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 5.5 – Ensaio com concentração de PAC de 27,5 mg/L.

Jarro	Concentração (mg/L)	pH – Rio Doce	Turbidez (uT) – Rio Doce	pH – Rio Piranga	Turbidez (uT) – Rio Piranga
1	27,5	6,50	4,82	6,49	4,17
2	27,5	7,01	4,28	7,05	4,77
3	27,5	7,56	4,89	7,58	4,37
4	27,5	8,01	4,17	8,04	5,24
5	27,5	8,48	4,42	8,60	4,57
6	27,5	8,99	4,08	8,97	3,86

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 5.6 – Ensaio com concentração de PAC de 30 mg/L.

Jarro	Concentração (mg/L)	pH – Rio Doce	Turbidez (uT) – Rio Doce	pH – Rio Piranga	Turbidez (uT) – Rio Piranga
1	30	6,54	7,80	6,58	5,33
2	30	7,04	8,38	7,10	3,49
3	30	7,49	7,46	7,44	3,31
4	30	8,06	6,53	7,90	3,78
5	30	8,56	5,88	8,44	3,15
6	30	9,03	6,71	8,99	2,80

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 5.7 – Ensaio com concentração de PAC de 32,5 mg/L.

Jarro	Concentração (mg/L)	pH – Rio Doce	Turbidez (uT) – Rio Doce	pH – Rio Piranga	Turbidez (uT) – Rio Piranga
1	32,5	6,60	3,25	6,59	2,64
2	32,5	7,03	3,67	6,94	2,59
3	32,5	7,60	4,19	7,59	4,56
4	32,5	7,98	3,24	7,90	2,62
5	32,5	8,44	4,84	8,48	2,55
6	32,5	9,02	3,86	8,90	3,38

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 5.8 – Ensaio com concentração de PAC de 35 mg/L.

Jarro	Concentração (mg/L)	pH – Rio Doce	Turbidez (uT) – Rio Doce
1	35	6,56	5,93
2	35	7,09	6,18
3	35	7,56	6,28
4	35	8,05	6,39
5	35	8,43	4,22
6	35	9,05	5,01

Fonte: AUTOR (2017).

Os valores otimizados para pH e concentração de coagulante foram, respectivamente, 7,98 e 32,5 mg/L para a água do Rio Doce e 7,95 e 25,0 mg/L para a água do Rio Piranga, como pôde-se observar em destaque nas Tabela 5.7 e 5.4. Observa-se que, nessas condições destacadas, a turbidez residual no Rio Piranga teve valor maior do que a nas condições iniciais (sem correção de pH com alcalinizante). Isso pode ser atribuído à utilização, no teste inicial, de uma água menos turva coletada em algum galão no trabalho de campo ou em algum erro na homogeneização da água a ser utilizada no Jarreste.

Os valores otimizados serão utilizados como base nos procedimentos seguintes visando a obtenção dos outros parâmetros no tratamento da água.

5.3. Otimização dos parâmetros de Tempo e Gradiente de Mistura Rápida.

Com os valores ideais de pH (aproximadamente 8,00 nos 2 casos) e concentração de coagulante (32,5 mg/L para o Rio Doce e 25,0 mg/L para o Rio Piranga) foi possível realizar experimentos para a determinação do Tempo e do Gradiente de Mistura Rápida (Tmr e Gmr) conforme descrito no item 4.7 da metodologia.

Dessa maneira, foram realizados mais 5 ensaios com valores de Tmr variando de 5 em 5 segundos, desde 5 segundos no jarro 1 a 30 segundos no jarro 6. Cada ensaio foi realizado com um valor diferente de Gmr: 400, 600, 800, 1000 e 1200 s⁻¹ e a mesma velocidade de sedimentação (Vs = 3,5cm/s). Os valores para o Rio Doce são representados na Tabela 5.9 e para o Rio Piranga, na Tabela 5.10:

Tabela 5.9 – Valores de Turbidez Residual (uT) em ensaios com diferentes tempos de mistura rápida para a água do Rio Doce.

Valores p/ $V_s = 3,5$ cm/s e pH = 8		Turbidez residual (uT)				
Jarro	Tempo de MR (s)	400s ⁻¹	600s ⁻¹	800s ⁻¹	1000s ⁻¹	1200s ⁻¹
1	5	3,18	3,11	5,03	5,50	9,94
2	10	2,38	3,50	4,31	4,11	8,04
3	15	2,65	4,52	4,39	4,16	9,67
4	20	2,14	4,35	6,30	4,17	3,70
5	25	2,58	5,23	3,99	3,11	3,78
6	30	2,65	3,45	4,06	3,45	4,38

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 5.10 – Valores de Turbidez Residual (uT) em ensaios com diferentes tempos de mistura rápida para a água do Rio Piranga.

Valores p/ $V_s = 3,5$ cm/s e pH = 8		Turbidez residual (uT)				
Jarro	Tempo de MR (s)	400s ⁻¹	600s ⁻¹	800s ⁻¹	1000s ⁻¹	1200s ⁻¹
1	5	3,37	3,67	5,58	4,57	3,53
2	10	3,57	2,38	4,83	3,94	2,35
3	15	3,88	2,01	2,48	2,58	1,92
4	20	3,58	1,41	1,90	3,24	2,57
5	25	3,43	1,07	1,62	3,05	2,69
6	30	2,77	1,11	1,42	2,38	2,75

Fonte: AUTOR (2017).

Com os dados das tabelas 5.9 e 5.10, a partir do menor valor de turbidez residual nos ensaios, considerou-se como valores ótimos de tempo e gradiente de mistura rápida, respectivamente, 20 segundos e 400s⁻¹ para o Rio Doce e 25 segundos e 600s⁻¹ para o Rio Piranga.

Na água proveniente do Rio Doce, o ensaio com gradiente de mistura rápida de 400s⁻¹, que equivale a aproximadamente 240 rpm, obteve os melhores valores de turbidez residual. Já o de 1200s⁻¹ (600 rpm), fez o valor da turbidez até subir para alguns valores de tempo de mistura rápida. Enquanto isso, na água proveniente do Rio Piranga, o gradiente de 600s⁻¹ (320 rpm) obteve o menor valor de turbidez. Em alguns gradientes, após a redução na turbidez no decorrer do tempo, houve um aumento na mesma, indicando que maiores tempos de mistura lenta, podem levar à quebra dos flocos formados e, conseqüente, aumento na turbidez.

A NBR 12.296 de 1992 aconselha que, caso não seja possível a realização de ensaios de bancada ou escala piloto, os valores ideais de gradiente de mistura rápida para ETAs no Brasil estejam na faixa de 700 s^{-1} a 1100 s^{-1} “em tempo de mistura não superior a 5 segundos”. Comparando assim com os valores encontrados nos ensaios, comprova-se a importância da sua realização para se obter parâmetros personalizados para a água que se deseja tratar, diminuindo a margem de erro na projeção de um sistema de tratamento. Importante considerar que o tempo de mistura rápida indicado pelo norma, no caso da instalação de uma unidade de mistura rápida, implicaria em um volume do misturador 4 vezes menor, no caso do Rio Doce, e 5 vezes menor, no caso do Rio Piranga.

5.4. Otimização dos parâmetros de Gradientes Médios de Velocidade e Tempo de Floculação para a etapa de Mistura Lenta.

Obtendo-se os parâmetros de pH, concentração de coagulante, tempo de mistura rápida e gradiente de mistura rápida, como demonstrados na tabela 5.11, foi possível prosseguir no experimento realizando novos ensaios para a otimização dos parâmetros de floculação na mistura lenta.

Tabela 5.11 – Parâmetros otimizados para os 2 rios até a etapa de mistura rápida.

Parâmetros	Rio Doce	Rio Piranga
pH de coagulação	8	8
Concentração de coagulante (mg/L)	32,5	25,0
Tempo de mistura rápida (s)	20	25
Gradiente de mistura rápida (s^{-1})	400	600

Fonte: AUTOR (2017).

Para isso, foram realizados cinco novos ensaios, fixando o tempo de mistura lenta do Jarreste em 60 minutos. Durante o ensaio, a paleta de mistura de cada jarro era suspensa em um determinado tempo, fazendo com que os jarros tivessem um Tempo de Floculação (T_f) de, respectivamente: 5; 10; 20; 30; 45 e 60 minutos. A velocidade de sedimentação indicada na metodologia foi respeitada ($3,5 \text{ cm/s}$).

Cada um dos cinco ensaios foi realizado com um gradiente de velocidade, sendo analisados os gradientes de 20, 30, 40, 55, 70 s⁻¹ e os resultados de turbidezes residuais encontradas para cada um desses gradientes nas águas dos dois rios estão explicitados na Tabelas 5.12 e 5.13.

Tabela 5.12 – Valores de turbidezes residuais para os ensaios de mistura lenta do Rio Doce.

Turbidez Residual (uT)					
Tf (min)	Gr = 20s ⁻¹	Gr = 30s ⁻¹	Gr = 40s ⁻¹	Gr = 55s ⁻¹	Gr = 70s ⁻¹
5	7,01	7,69	9,90	6,42	4,53
10	5,34	4,11	3,52	4,44	3,88
20	3,45	3,80	2,80	4,06	4,10
30	3,79	2,51	2,56	3,63	4,96
45	3,50	3,23	3,99	6,17	4,71
60	3,56	4,35	3,79	8,01	8,30

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 5.13 – Valores de turbidezes residuais para os ensaios de mistura lenta do Rio Piranga.

Turbidez Residual (uT)					
Tf (min)	Gr = 20s ⁻¹	Gr = 30s ⁻¹	Gr = 40s ⁻¹	Gr = 55s ⁻¹	Gr = 70s ⁻¹
5	1,35	3,56	3,34	2,04	3,11
10	1,58	3,16	2,19	4,09	6,53
20	2,42	1,92	1,53	2,75	6,69
30	1,45	0,89	1,83	3,26	2,63
45	1,70	1,23	1,97	6,17	6,90
60	1,91	1,47	2,41	5,06	2,15

Fonte: AUTOR (2017).

Seguindo a metodologia proposta por Pádua (1994), para determinar os gradientes médios de velocidade na mistura lenta é necessário observar os valores onde há as menores turbidezes residuais.

Na Tabela 5.12, para os dados relativos ao Rio Doce, observa-se que o menor valor de turbidez residual é 2,51 uT, para o gradiente de 30s⁻¹ e tempo de floculação de 30 minutos. Para o tempo de floculação de 20 minutos, tem-se no gradiente de 40s⁻¹ a turbidez residual de 2,8 uT, pouco acima do valor anterior. Situação semelhante a que acontece com os dados relativos ao Rio Piranga, na Tabela 5.13, onde o menor valor de

turbidez residual encontrado foi 0,89 uT, nos pares de tempo e gradiente, respectivos, 30 min e 30s⁻¹, enquanto no tempo de floculação de 20 minutos e gradiente 40s⁻¹, obteve-se uma turbidez de 1,53 uT. É importante ressaltar que esses são os menores valores de turbidez para o determinado tempo de floculação onde, após esse tempo, não há aumento no valor de turbidez residual.

Segundo Libânio (2010), para águas com baixa turbidez é satisfatório obter o valor da turbidez decantada de 2 uT. Em águas com turbidez elevada (superior a 100 uT), conseguir este parâmetro abaixo de 5 uT, indica boa eficiência nas etapas anteriores do tratamento. Portanto, em ambos os rios, levando em conta que foi testado apenas uma velocidade de sedimentação, obtêm-se um resultado satisfatório considerando o gradiente constante de velocidade de 30s⁻¹ e um tempo de mistura lenta de 30 minutos.

Seguindo o estudo de Pavanelli (2001) e o método de Pádua (1994) para escalonar e otimizar as câmaras dos floculadores, foram propostas 4 hipóteses para se encontrar os valores otimizados de mistura lenta em ambas águas em estudo, conforme mostrado a seguir na Tabela 5.14, onde:

$$Td = Tt/n$$

Tabela 5.14 – Hipóteses para a otimização dos parâmetros de mistura lenta.

Hipótese	1	2	3	4
Tempo Total de Floculação (Tt)	20 min.	20 min.	30 min.	30 min.
Nº de câmaras (n)	4	3	5	6
Tempo de detenção em cada câmara (Td)	5 min.	6,6 min.	6 min.	5 min.

Fonte: AUTOR (2017).

5.4.1. Análise da Hipótese 1 para a água do Rio Doce.

Inicialmente, para os dados do Rio Doce com a hipótese 1, na Tabela 5.12, observa-se que nos primeiros 5 minutos do teste, o menor valor de turbidez residual foi de 4,53 uT e se deu no gradiente de velocidade de 70s⁻¹. Dessa forma, esse será o gradiente médio da primeira câmara.

Posteriormente, para se obter o melhor gradiente de velocidade para a segunda câmara, foi necessário encontrar o valor de turbidez de 4,53 uT (remanescente ao final da primeira câmara) por meio de interpolação nas Figuras 5.3 a 5.7 de turbidezes de todos os outros gradientes, atrelado a um Tempo de Floculação (T_f). Adicionando um T_d (5 minutos para a hipótese 1) a esse T_f , foi possível encontrar o valor de turbidez residual para cada um dos gradientes em estudo ao final da segunda câmara. Esse método foi utilizado para encontrar os outros gradientes ideais para as demais câmaras de floculação em todos os casos.

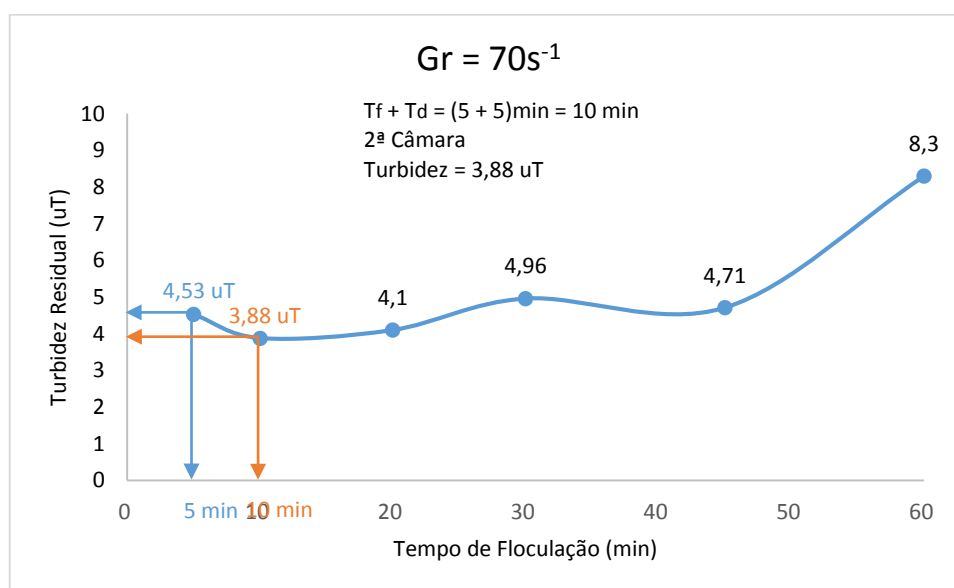


Figura 5.3 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $70s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

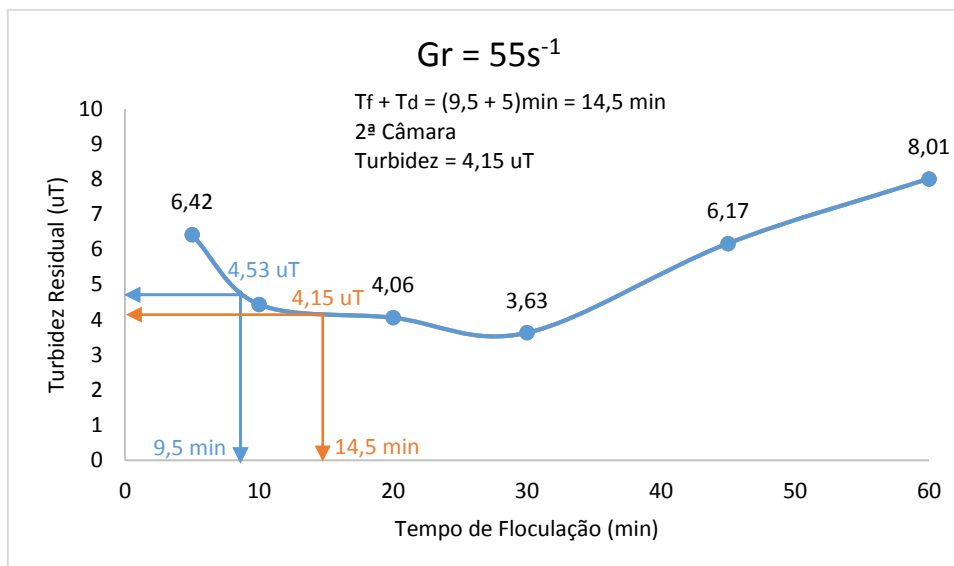


Figura 5.4 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $55s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

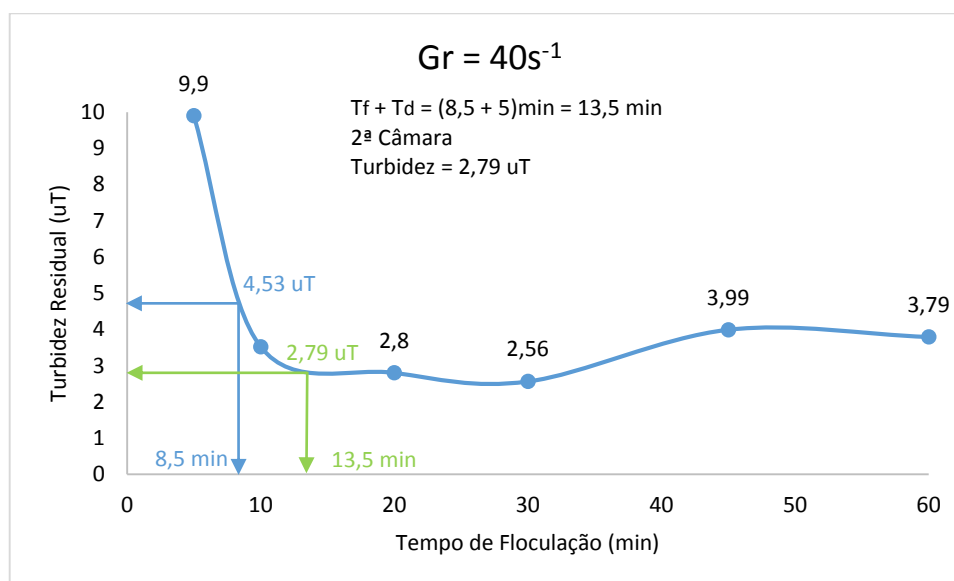


Figura 5.5 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

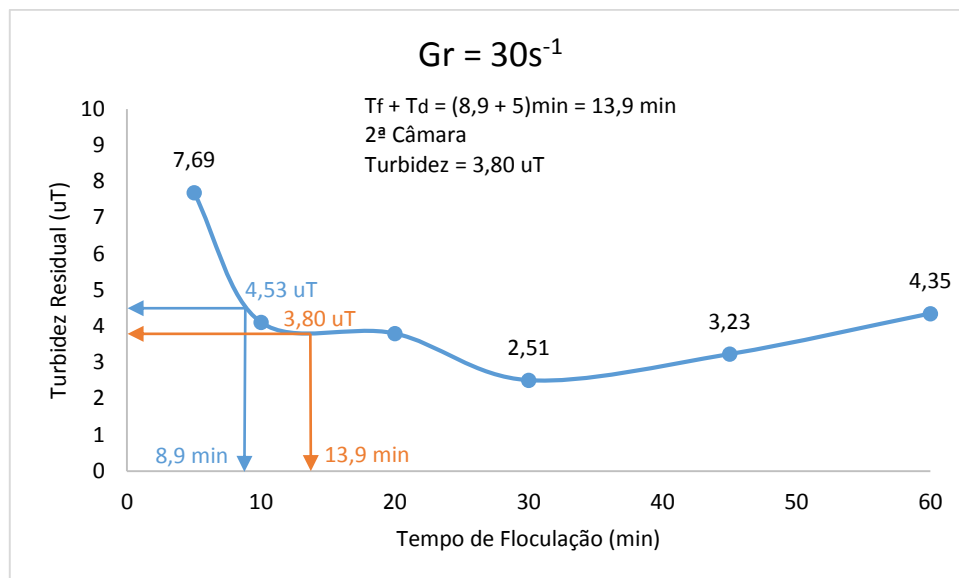


Figura 5.6 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

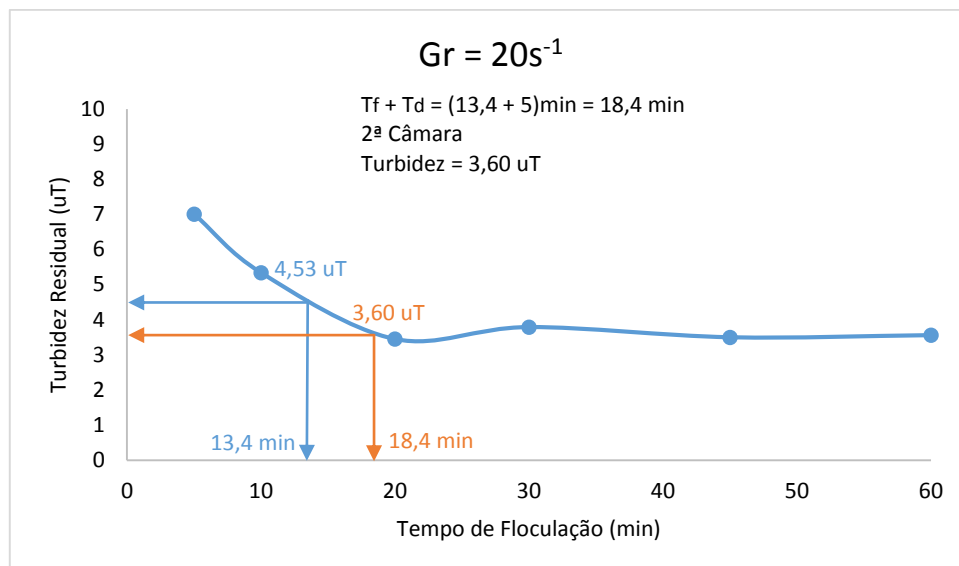


Figura 5.7 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $20s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

Com as interpolações demonstradas nas figuras foi possível apontar o gradiente médio de $40s^{-1}$ como o ideal para a segunda câmara de floculação, pois a sua turbidez residual, 2,79 uT, é a menor dentre as resultantes dos outros gradientes (3,88 uT; 4,15 uT; 3,80 uT e 3,60 uT), como destacado nas cores verde e laranja.

Posteriormente, foi utilizado do mesmo método para a determinação do gradiente de velocidade da terceira câmara e as interpolações são apresentadas nas Figuras 5.8 e 5.9. Vale ressaltar que os gradientes de 70 , 55 e $20s^{-1}$ não foram estudados novamente pois, no caso dos 2 primeiros, deve-se utilizar gradientes em ordem decrescente em um sistema de câmaras de floculação, enquanto o último em nenhum momento apresentou turbidez residual menor que 2,79 uT.

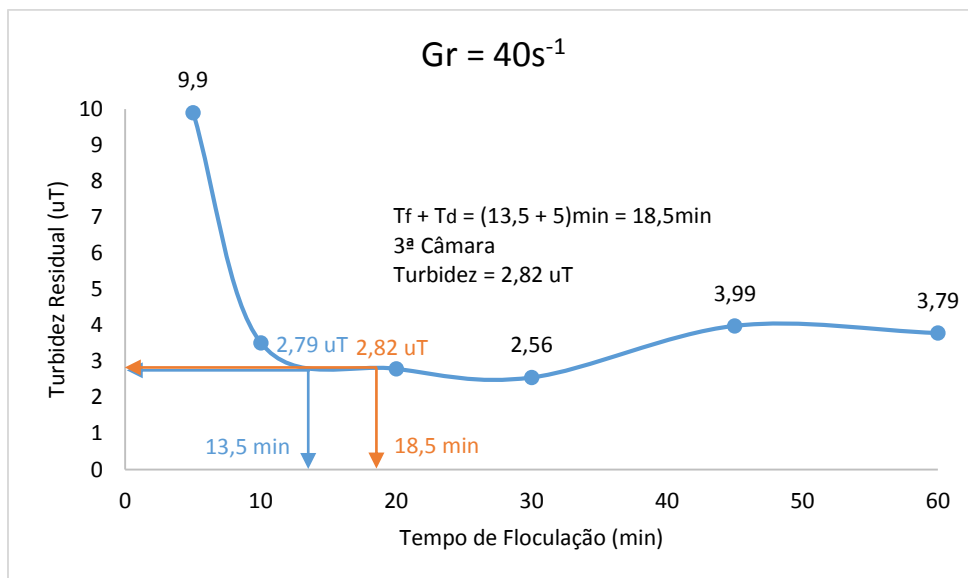


Figura 5.8 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

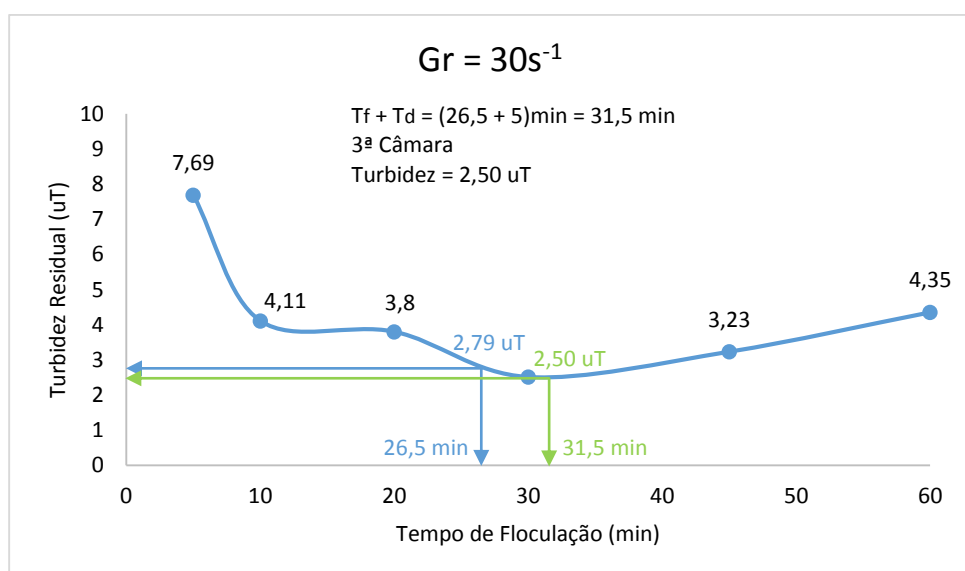


Figura 5.9 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

Como demonstrado nos gráficos das figuras acima, o gradiente de $30s^{-1}$ obteve melhor resultado de turbidez residual ($2,50\text{ uT} < 2,82\text{ uT}$). Sendo assim, este foi o escolhido como gradiente médio de velocidade para a terceira câmara.

Finalizando a Hipótese 1, utilizando somente o gráfico do gradiente de $30s^{-1}$, foi somado um Td de 5 minutos para determinar a turbidez residual ao final da quarta câmara de flocação. O resultado é demonstrado na Figura 5.10:

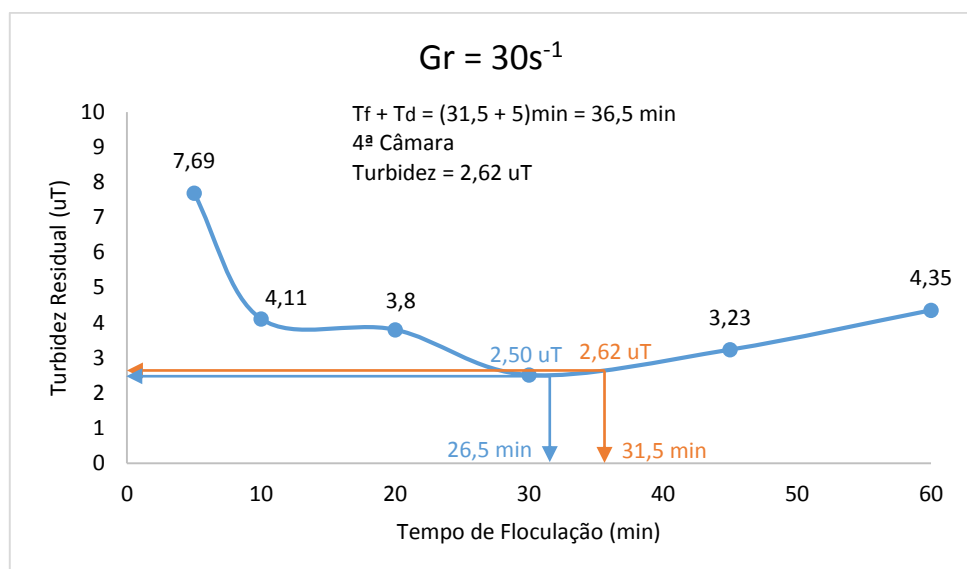


Figura 5.10 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente 30s^{-1} na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

É possível notar, destacado na cor alaranjada, que, para esta hipótese, na quarta câmara, a turbidez residual aumentou. Isso pode levar à ideia de que, para as condições já estabelecidas anteriormente, uma quarta câmara pode levar à quebra dos flocos formados durante a floculação, levando a um aumento da turbidez na água e à interpretação de que esta não é a situação ideal para o tratamento desta mesma.

5.4.2. Análise da Hipótese 2 para a água do Rio Doce.

Para a análise da Hipótese 2 na otimização dos parâmetros para a água do Rio Doce, foi utilizado o mesmo método da Hipótese 1 com as condições de apenas 3 câmaras de floculação, o tempo total de floculação de 20 minutos e um Td de 6,6 minutos em cada câmara.

Para isso, foi necessário interpolar os valores de turbidez residuais encontrando valores relativos ao tempo 6,6 minutos para todos os gradientes a fim de determinar o gradiente ideal da primeira câmara de floculação. Esses valores são mostrados na Tabela 5.15:

Tabela 5.15 – Valores de turbidez residual de todos os gradientes no Rio Doce interpolando para encontrar $T_f = 6,6$ min.

Tempo de Floculação (min)	Turbidez Residual (uT)				
	$Gr = 20s^{-1}$	$Gr = 30s^{-1}$	$Gr = 40s^{-1}$	$Gr = 55s^{-1}$	$Gr = 70s^{-1}$
5	7,01	7,69	9,9	6,42	4,53
6,6	6,47	6,54	7,86	5,78	4,32
10	5,34	4,11	3,52	4,44	3,88

Fonte: AUTOR (2017).

Com isso, observando que o gradiente de $70s^{-1}$ obteve melhor resultado de turbidez residual (4,32 uT), este foi escolhido como o gradiente médio da primeira câmara do floculador.

Posteriormente, com o mesmo método utilizado para a Hipótese 1, foi possível fazer as interpolações nos gráficos de cada um dos gradientes para determinar o gradiente ideal para a segunda câmara. Estes resultados são demonstrados nos gráficos das Figuras 5.11 a 5.15:

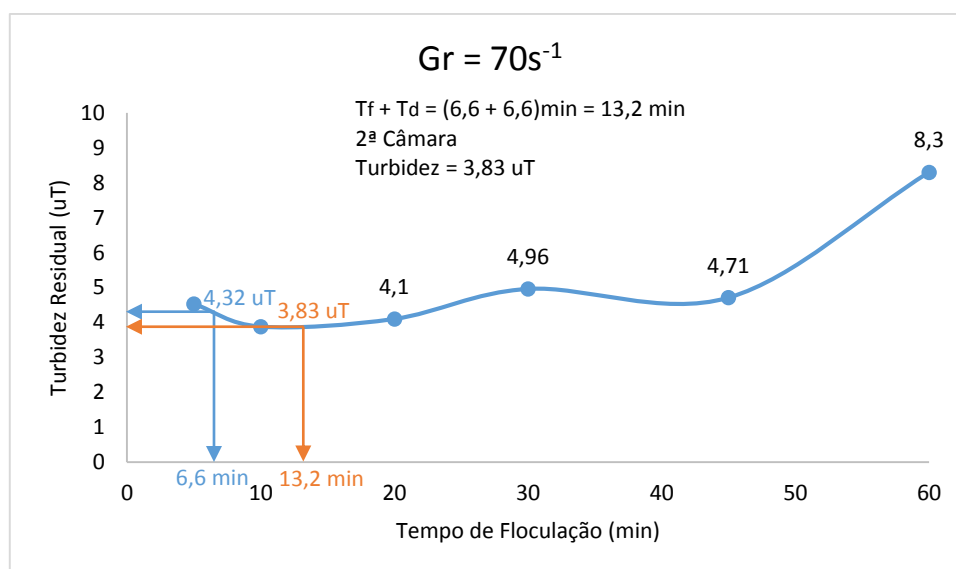


Figura 5.11 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $70s^{-1}$ na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

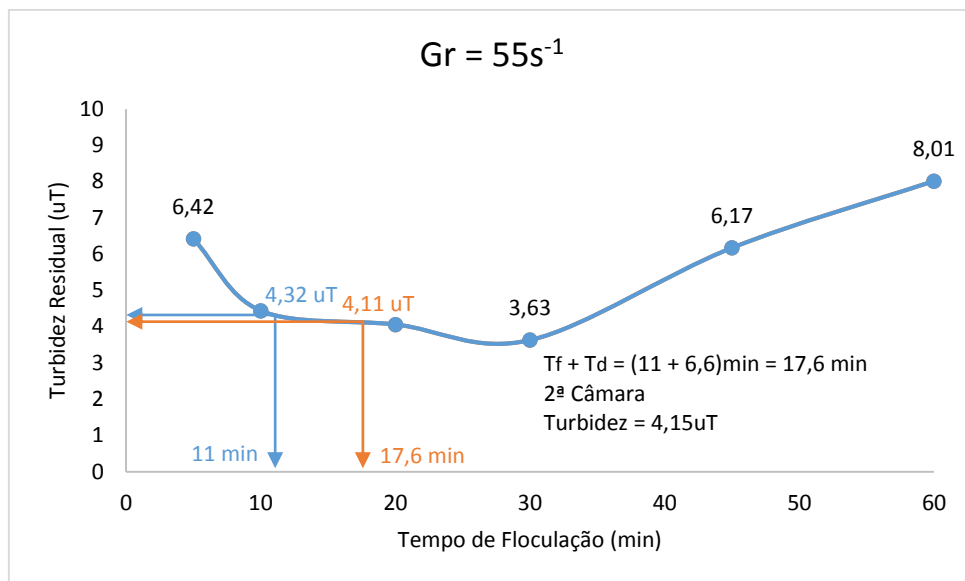


Figura 5.12 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $55s^{-1}$ na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

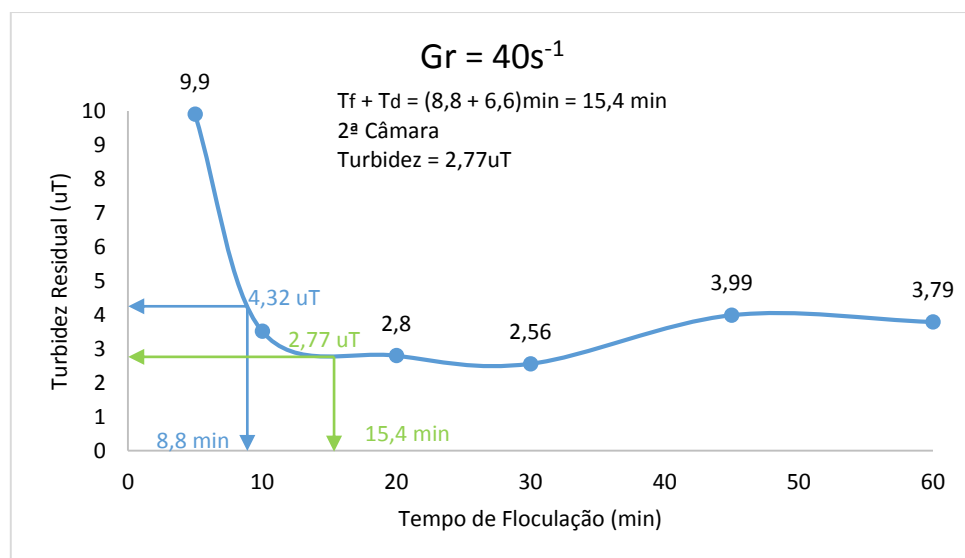


Figura 5.13 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

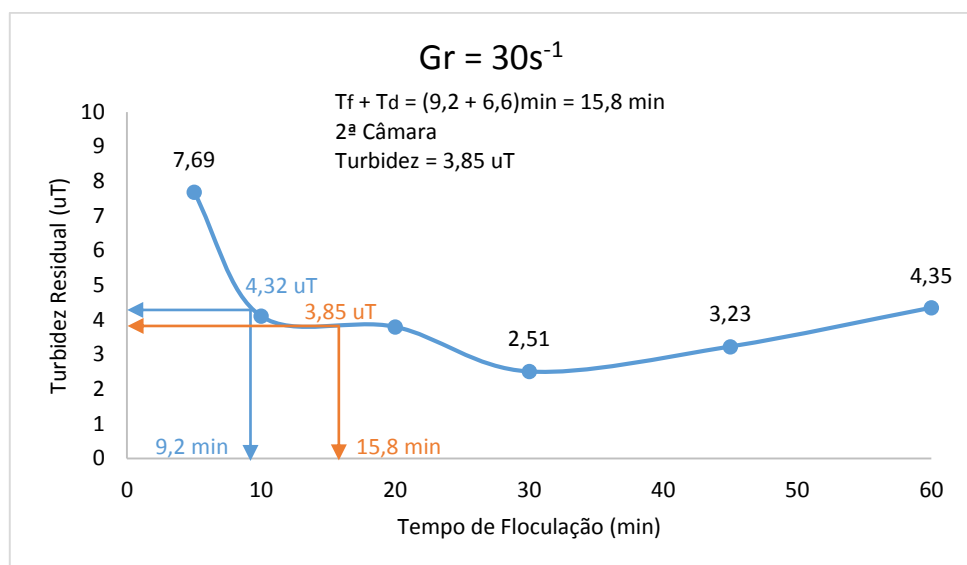


Figura 5.14 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente 30s⁻¹ na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

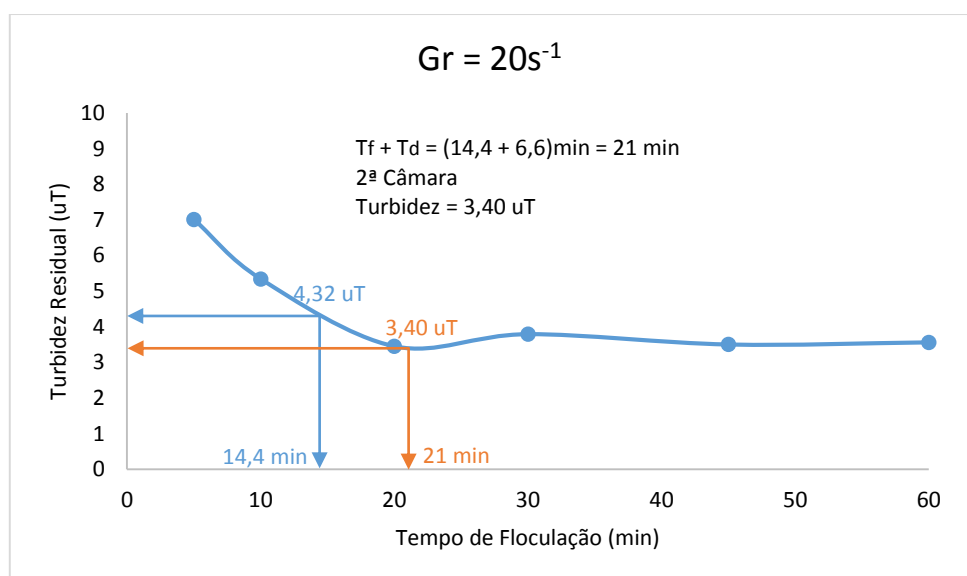


Figura 5.15 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente 20s⁻¹ na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

Pelos gráficos, pôde-se observar destacado em verde que o gradiente de 40s⁻¹ obteve a menor turbidez residual (2,77 uT) quando comparado aos outros gradientes (3,83 uT; 4,11 uT; 3,85 uT e 3,40 uT), portanto ele será escolhido como o gradiente médio de velocidade da segunda câmara.

Por fim, da mesma forma determinou-se o gradiente ideal da terceira e última câmara para a Hipótese 2 nos gráficos das Figuras 5.16 e 5.17. O gradiente de 20s^{-1} não foi estudado pois não obteve resultados de turbidez residual menor do que $2,77\text{ uT}$:

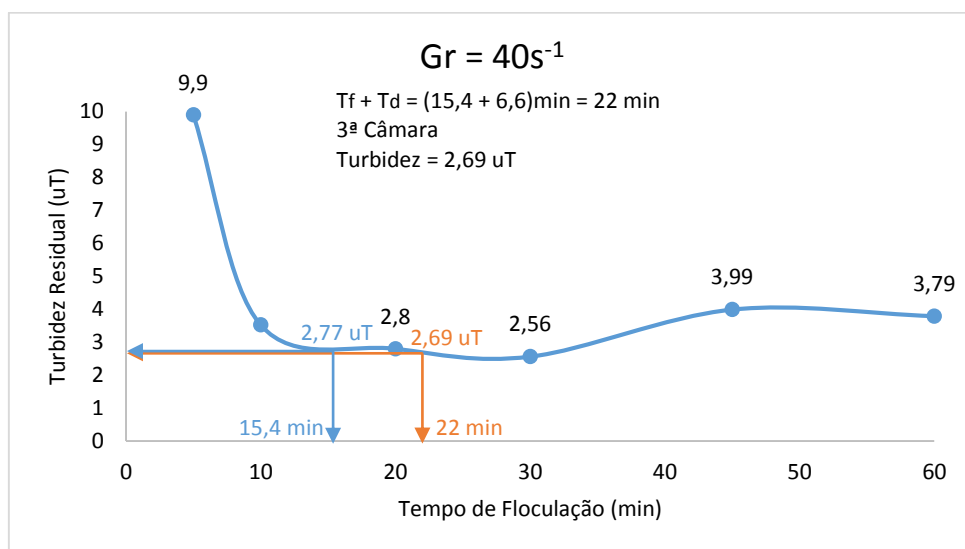


Figura 5.16 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente 40s^{-1} na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

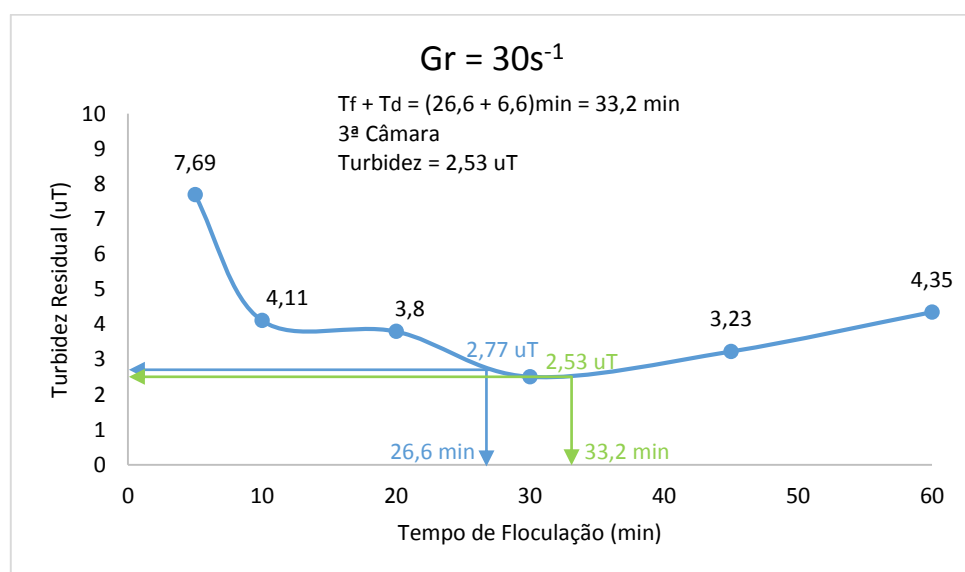


Figura 5.17 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente 30s^{-1} na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

Como a turbidez residual do gradiente 30s^{-1} foi menor que a do gradiente 40s^{-1} ($2,53\text{ uT} < 2,69\text{ uT}$), este primeiro foi escolhido como gradiente médio ideal de para a terceira câmara da Hipótese 2 que se mostrou mais simples e eficiente do que a primeira

Hipótese ao reduzir a turbidez com uma câmara a menos não havendo aumento da mesma posteriormente.

5.4.3. Análise das Hipóteses 3 e 4 para a água Rio Doce.

As Hipóteses 3 e 4 propõem que o Tempo Total de Floculação (Tt) seja igual a 30 minutos e que o sistema seja composto por, respectivamente, 5 e 6 câmaras, com Td igual a 6 e 5 minutos. Seguindo a mesma metodologia de interpolação gráfica, foi possível obter os resultados nessas condições com os gradientes médios de velocidade em todas as câmaras tal como as turbidezes residuais e demonstrá-los nas tabelas 5.16 e 5.17:

Tabela 5.16 – Parâmetros ideais encontrados para a Hipótese 3 na água do Rio Doce.

Tempo de Floculação (min)	Gradiente (s^{-1})	Turbidez residual (uT)
6	70	4,38
12	40	2,78
18	30	2,51
24	30	2,8
30	30	3,19

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 5.17 – Parâmetros ideais encontrados para a Hipótese 4 na água do Rio Doce.

Tempo de Floculação (min)	Gradiente (s^{-1})	Turbidez residual (uT)
5	70	4,53
10	40	2,75
15	30	2,53
20	30	2,7
25	30	3,03
30	30	3,4

Fonte: AUTOR (2017).

Observa-se nas tabelas, em ambas hipóteses, uma tendência de aumentar o valor da turbidez residual na terceira câmara, corroborando com a ideia de que, com os parâmetros de pH, dosagem de coagulante, velocidade de sedimentação, tempo e gradiente de mistura rápida citados e fixados anteriormente, as condições ideais para o

tratamento dessa água sejam com tempo de 20 minutos e apenas 3 câmaras de floculação.

5.4.4. Análise da Hipótese 1 para a água do Rio Piranga.

Observando os valores de turbidez residual nos primeiros 5 minutos do ensaio com a água do Rio Piranga, percebe-se que o gradiente de $55s^{-1}$ obteve o melhor resultado na redução da turbidez da água: 2,04 uT. Portanto, ele será considerado como o gradiente médio ideal para a primeira câmara do floculador.

Em seguida, foram realizadas as interpolações gráficas para atingir o menor valor de turbidez residual adicionando um $T_d = 5$ minutos e visando determinar qual o gradiente ideal para a segunda câmara. Os resultados são mostrados nos gráficos das Figuras 5.18 a 5.20. O gradiente de $70s^{-1}$ não foi analisado pois, para uma instalação de câmaras de floculação, é necessário que os gradientes estejam em ordem decrescente. O gradiente de $20s^{-1}$ também não foi analisado pois os valores de turbidez residual do seu gráfico aumentam na maior parte do tempo e se mantém sempre maiores do que o valor registrado nos primeiros 5 minutos do ensaio.

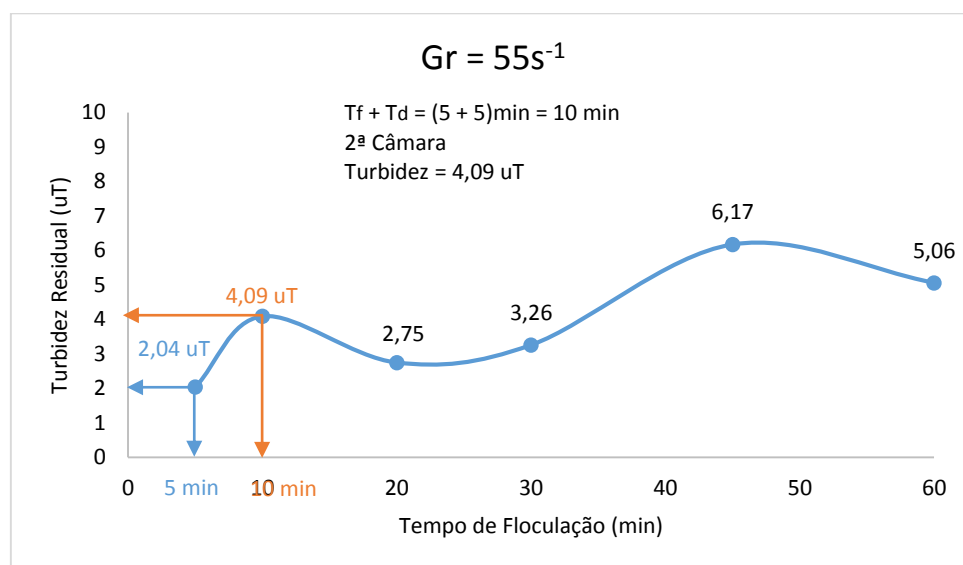


Figura 5.18 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $55s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

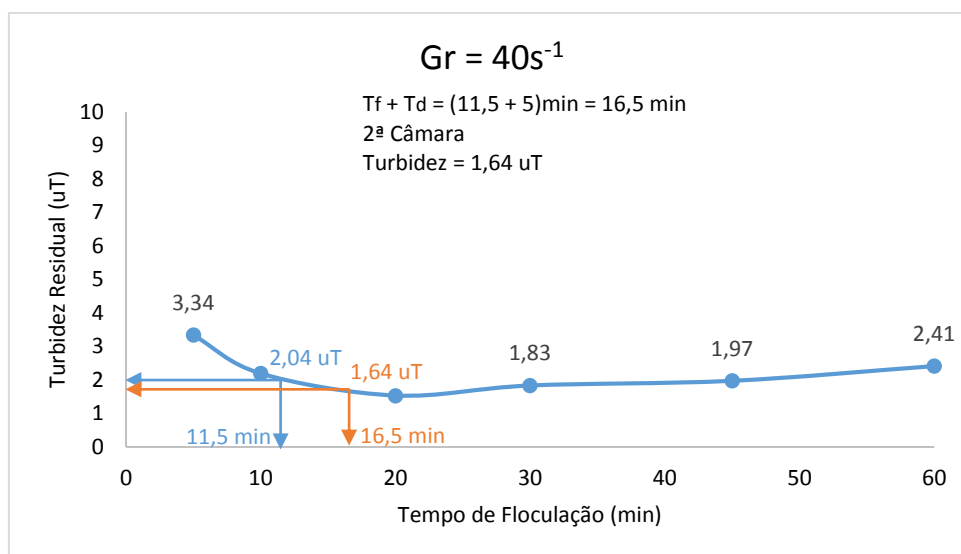


Figura 5.19 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

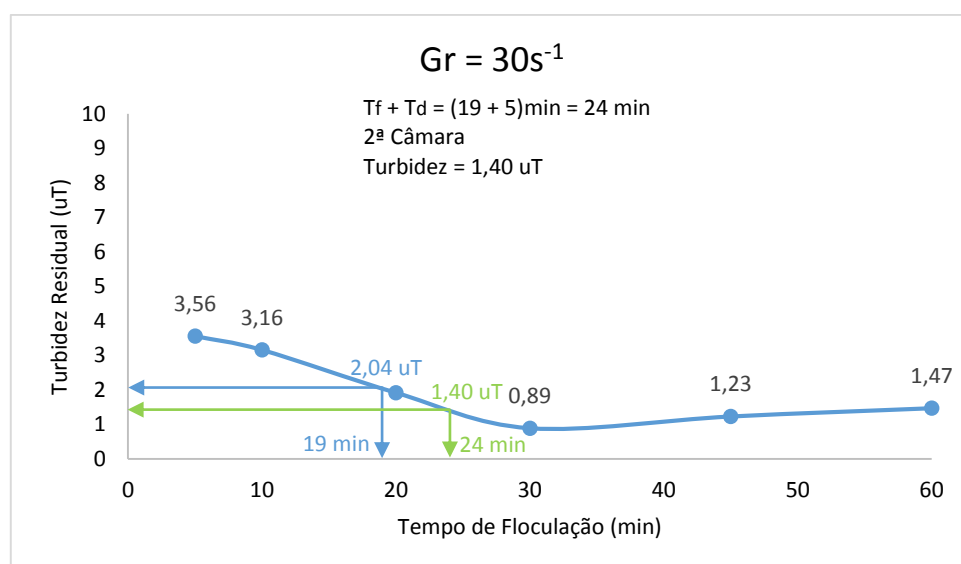


Figura 5.20 – Interpolação para encontrar o gradiente da segunda câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

Como destacado nos gráficos, observa-se que o gradiente de $30s^{-1}$ obteve melhor resultado na redução da turbidez ($1,40 uT < 1,64 uT < 4,09 uT$), de modo que ele seja o gradiente ideal para a segunda câmara de flocação desta Hipótese.

Seguindo a metodologia e considerando as restrições já citadas para a determinação dos parâmetros ideais de mistura lenta, continuou-se analisando o gradiente de $30s^{-1}$ para as câmaras seguintes estabelecidas nessa Hipótese (Figuras 5.21 e 5.22).

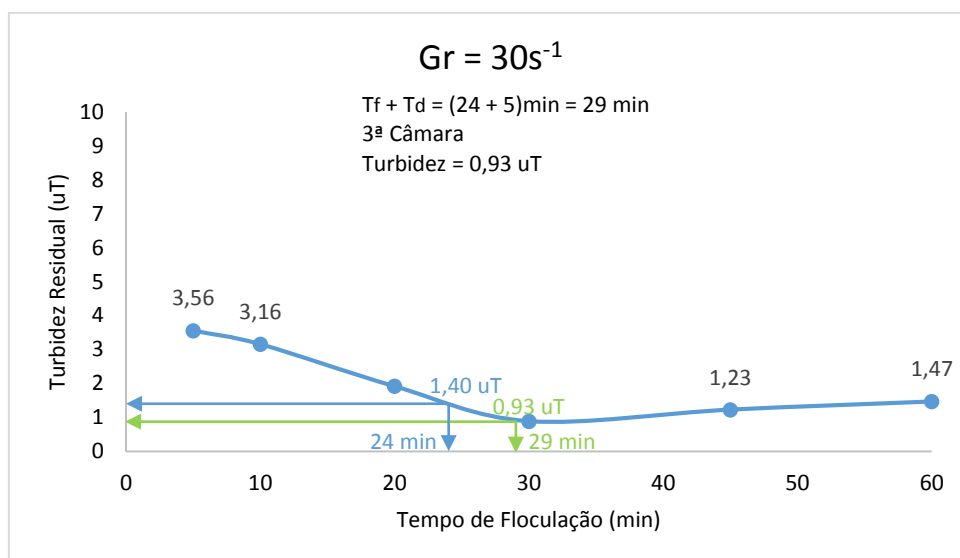


Figura 5.21 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

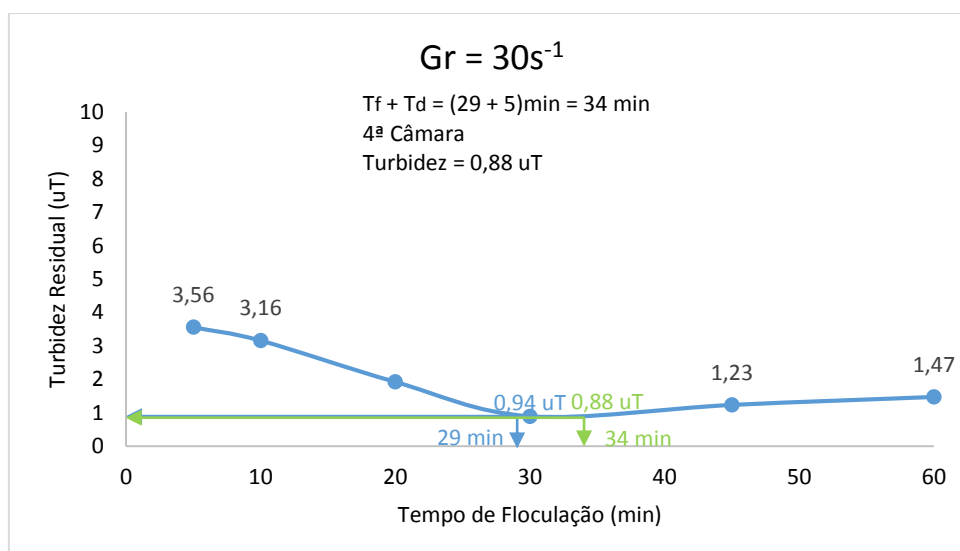


Figura 5.22 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 1.

Fonte: AUTOR (2017).

Observa-se nos dois gráficos anteriores que foi possível reduzir a turbidez na terceira e na quarta câmara utilizando o gradiente de $30s^{-1}$, de modo a considerar este como o gradiente médio de velocidade ideal para estas duas câmaras, podendo-se avaliar bem a possibilidade de se utilizar 4 câmaras de floculação neste sistema para tratar a água do Rio Piranga, como levantado na Hipótese 1.

5.4.5. Análise da Hipótese 2 para a água do Rio Piranga.

Da mesma forma utilizada na análise da Hipótese 2 para a água do Rio Doce, foi necessário fazer uma interpolação com os dados da tabela para determinar as turbidezes residuais nos gradientes estudados quando o Tempo de Floculação for igual a 6,6 minutos. Estes valores são mostrados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Valores de turbidez residual de todos os gradientes no Rio Piranga interpolando para encontrar $T_f = 6,6$ min.

Tempo de Floculação (min)	Turbidez Residual (uT)				
	$Gr = 20s^{-1}$	$Gr = 30s^{-1}$	$Gr = 40s^{-1}$	$Gr = 55s^{-1}$	$Gr = 70s^{-1}$
5	1,35	3,56	3,34	2,04	3,11
6,6	1,42	3,43	2,97	2,7	4,2
10	1,58	3,16	2,19	4,09	6,53

Fonte: AUTOR (2017).

O menor valor de turbidez residual encontrado na tabela para o tempo de 6,6 minutos foi de 2,7 uT, no gradiente de $55s^{-1}$, fazendo com que este seja gradiente médio ideal para a primeira câmara de floculação.

Considerando os gradientes de velocidade 30, 40 e $55s^{-1}$, foram feitas as interpolações gráficas a fim de determinar o gradiente ideal para a segunda câmara de floculação (Figuras 5.23 a 5.25).

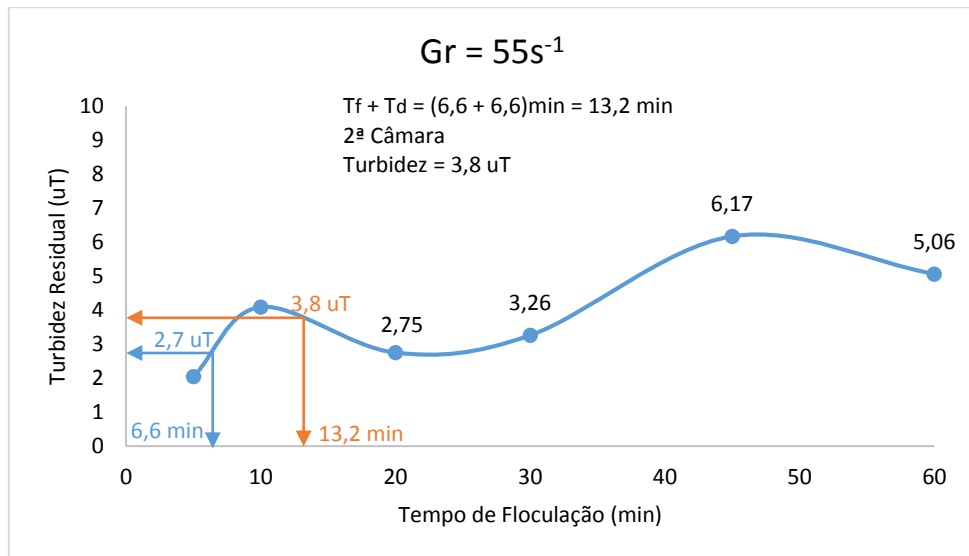


Figura 5.23 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $55s^{-1}$ na Hipótese 3.

Fonte: AUTOR (2017).

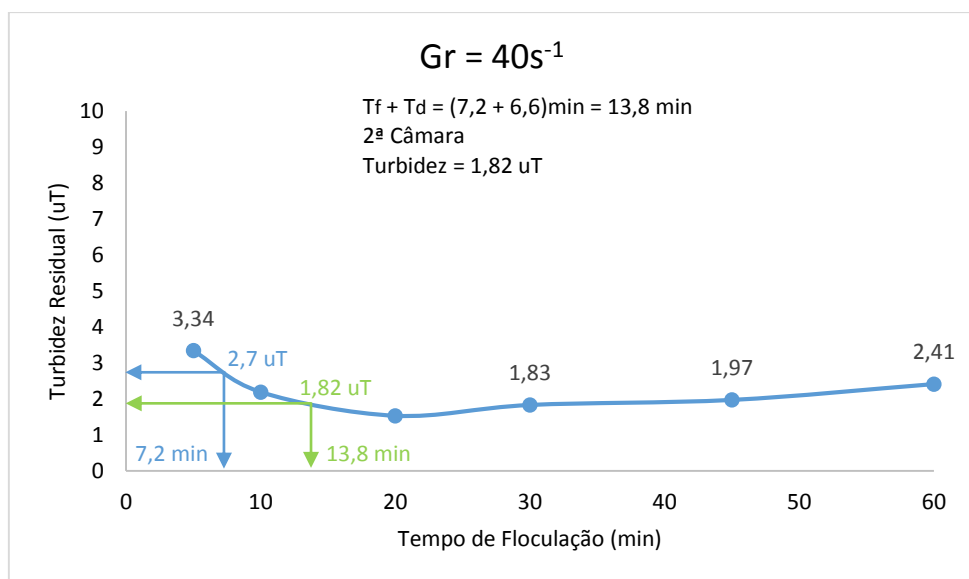


Figura 5.24 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

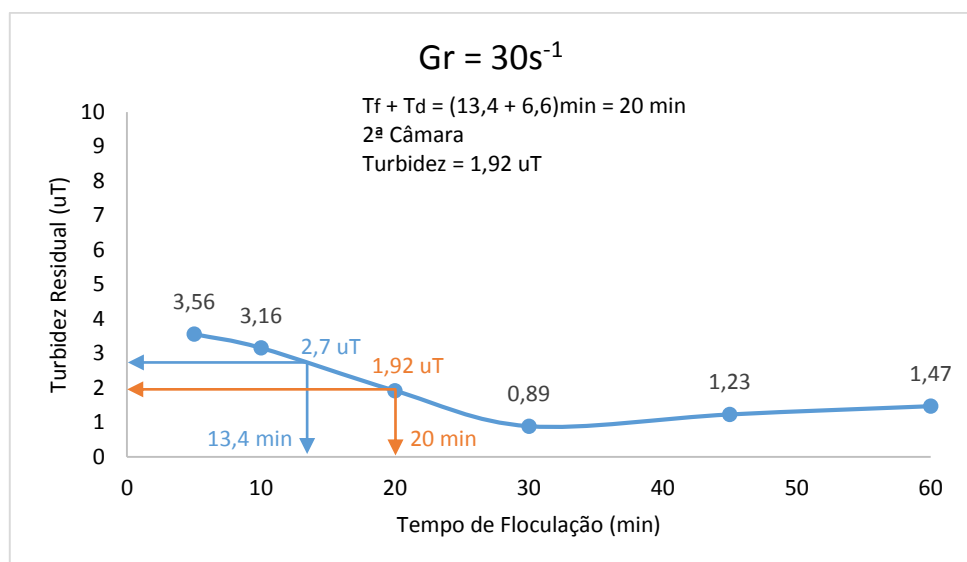


Figura 5.25 – Interpolação para encontrar o gradiente da quarta câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $30s^{-1}$ na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

Pela análise dos gráficos adotou-se $40s^{-1}$ como gradiente médio de velocidade ideal para a segunda câmara ($1,82 uT < 1,92 uT < 3,8 uT$).

Por fim, considerando as restrições já citadas, foram analisados os gradientes de $40 s^{-1}$ e $30 s^{-1}$ visando encontrar este parâmetro ideal para a terceira e última câmara desta Hipótese (Figuras 5.26 e 5.27).

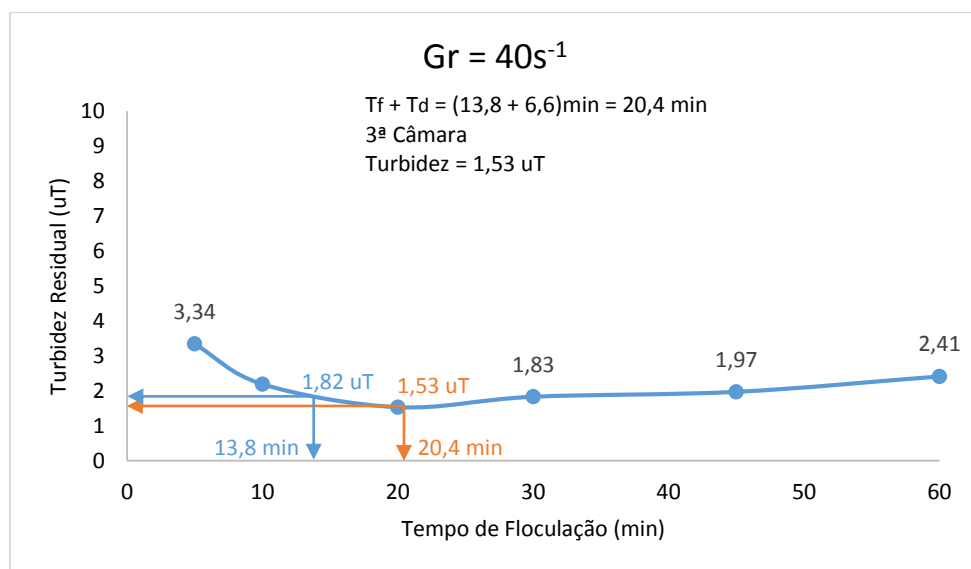


Figura 5.26 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente $40s^{-1}$ na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

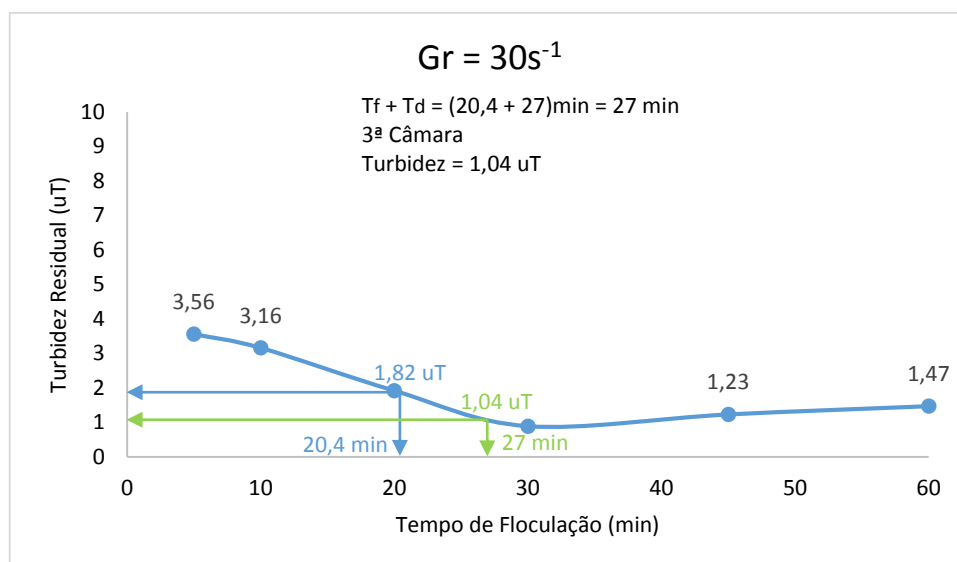


Figura 5.27 – Interpolação para encontrar o gradiente da terceira câmara na variação da turbidez residual ao longo do tempo para o gradiente 30s⁻¹ na Hipótese 2.

Fonte: AUTOR (2017).

Neste caso, o gradiente de 30s⁻¹ foi o ideal para a terceira câmara de floculação desta Hipótese pois obteve melhor resultado na redução da turbidez quando comparado ao de 40s⁻¹ (1,04 uT < 1,53 uT).

Observa-se que tanto na Hipótese 1 quando na 2 foi possível reduzir a turbidez da água utilizando o Tempo Total de Floculação (Tt) de 20 minutos, no qual o primeiro caso obteve menor valor de turbidez residual que o segundo, enquanto este último seria operado com uma câmara a menos, o que representaria uma economia de custo em termos de projetos.

5.4.6. Análise das Hipóteses 3 e 4 para a água do Rio Piranga.

Tal como nas análises da água do Rio Doce, as hipóteses 3 e 4 indicam o Tempo Total de Floculação de 30 minutos e sistema disposto com 5 e 6 câmaras, respectivamente. Dessa forma, os resultados encontrados para estas condições são demonstrados nas Tabelas 5.19 e 5.20.

Tabela 5.19 – Parâmetros ideais encontrados para a Hipótese 3 na água do Rio Piranga.

Tempo (min)	Gradiente (s^{-1})	Turbidez Residual (uT)
6	55	2,70
12	40	1,81
18	30	1,03
24	30	0,89
30	30	1,10

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 5.20 – Parâmetros ideais encontrados para a Hipótese 4 na água do Rio Doce.

Tempo (min)	Gradiente (s^{-1})	Turbidez Residual (uT)
5	55	2,04
10	30	1,38
15	30	0,92
20	30	0,89
25	30	1,05
30	30	1,20

Fonte: AUTOR (2017).

Estes resultados demonstram que até a quarta câmara de floculação é possível reduzir a turbidez e a partir dela, há um aumento nesse parâmetro provavelmente devido à quebra dos flocos formados durante o processo de floculação. Isso indica que, para os parâmetros previamente testados e fixados, os resultados para as hipóteses que consideram o Tempo Total de Floculação igual a 20 minutos também são mais interessantes neste caso, indicando condições semelhantes no tratamento das duas águas em estudo. A Tabela 5.21 demonstra um comparativo de todos os parâmetros das duas águas.

Tabela 5.21 – Comparação de todos os parâmetros das duas águas deste estudo.

Parâmetros/Rios	Rio Doce				Rio Piranga			
pH	Em torno de 8							
Coagulante	PAC							
Dosagem de Coagulante (mg/L)	32,5				25			
Gmr (s ⁻¹)	400				600			
Tmr (segundos)	20				25			
Vs (cm/s)	3,5							
Hipótese	1	2	3	4	1	2	3	4
Tempo Total de Floculação (Tt)	20 minutos	20 minutos	30 minutos	30 minutos	20 minutos	20 minutos	30 minutos	30 minutos
Nº de câmaras (n)	4	3	5	6	4	3	5	6
Tempo de detenção em cada câmara (Td)	5 minutos	6,7 minutos	6 minutos	5 minutos	5 minutos	6,7 minutos	6 minutos	5 minutos
Gradientes em série (s ⁻¹)	70, 40, 30 e 30	70, 40 e 30	70, 40, 30, 30 e 30	70, 40, 30, 30, 30 e 30	55, 30, 30 e 30	55, 40 e 30	55, 40, 30, 30 e 30	55, 30, 30, 30, 30, 30 e 30
Turbidez Residual Final (uT)	2,62	2,53	3,19	3,4	0,88	1,04	1,1	1,2

Fonte: AUTOR (2017).

Conforme já mencionado, Libânio (2010) afirma que, valores de turbidez próximos a 2 uT antes da filtração para águas com turbidez relativamente baixa, é considerado satisfatório e em águas com turbidez elevada (superior a 100 uT), conseguir este parâmetro abaixo de 5 uT, indica eficiência das etapas anteriores do tratamento. Logo, considerando que não houve ensaios variando a velocidade de sedimentação, ou seja, este parâmetro não foi otimizado, tanto para o gradiente constante, quanto para os gradientes escalonados, os resultados de turbidez residual dos ensaios são satisfatórios.

De acordo também com Braga (2014), em estudo feito em uma Estação de Tratamento de Água de Juiz de Fora, considerando uma média anual e variando entre os anos de 2007 e 2013, os valores de turbidez para água decantada oscilavam entre 1 e 2 uT. Vale ressaltar que o estudo citado considerou o tratamento de água em uma ETA em pleno funcionamento e nas condições totalmente otimizadas para o tratamento e distribuição para 50% da população de uma cidade com mais de 500 mil habitantes, enquanto este projeto fixou uma única velocidade de sedimentação para todos os ensaios, podendo esta sequer ser o valor ideal para este parâmetro.

Portanto, pode-se notar na Tabela 5.21 que, para o Rio Doce, as melhores condições para o tratamento da água em gradientes escalonados são com Tempo Total de Floculação igual 20 minutos e a utilização de 3 câmaras de floculação, Hipótese 2, em que obteve-se menor valor de turbidez residual: 2,53 uT.

Já no caso do Rio Piranga, observa-se que para um sistema com 4 câmaras, obteve-se um menor valor para a turbidez (0,88 uT), enquanto em um sistema com 3 câmaras, obteve-se um valor maior (1,04 uT). Para estas condições, a diferença foi pequena e a redução de uma câmara no sistema, pode representar um gasto menor na construção. Porém, no caso de um sistema único para tratar tanto a água no período de estiagem quanto no período chuvoso, onde as turbidez são extremamente elevadas, poderá ser necessário a utilização de um sistema maior e com mais câmaras, reforçando que, para estas condições, a Hipótese 1 pode ser a melhor.

6. CONCLUSÃO

Comparando as águas coletados no Rio Doce com as do Rio Piranga, nota-se que, com relação aos parâmetros considerados, não há uma grande diferença entre eles. Além disso, a água do Rio Doce, coletada em um dos pontos de monitoramento do IGAM mais próximos do local do acidente, apresentou condições próximas da normalidade quando comparadas às médias históricas registradas. Isso indica que, 2 anos após o acidente com a barragem de Fundão, a contaminação da água e os impactos na qualidade da água e no seu fornecimento já citados, os parâmetros de turbidez, alcalinidade, condutividade e pH da água, considerando apenas a coleta no período seco e as condições deste trabalho, encontram-se em características próximas às existentes antes do acidente. Entretanto, é importante ressaltar que essas condições podem se alterar após eventos chuvosos.

O melhor pH de coagulação para ambas as águas foi 8, mas a água do Rio Doce demanda uma maior dosagem de PAC para ser tratada em relação ao Rio Piranga: 32,5 mg/L versus 25 mg/L. Isso pode ocorrer devido ao fato da turbidez no Rio Doce estar e ser historicamente mais alta do que a do Rio Piranga.

Em relação aos parâmetros de mistura rápida, os valores ideais para o Rio Doce foram de $G_{mr} = 400 \text{ s}^{-1}$ e $T_{ms} = 20$ segundos, enquanto para o Rio Piranga foram: $G_{mr} = 600 \text{ s}^{-1}$ e $T_{ms} = 25$ segundos. Esses valores estão fora da faixa indicada pela NBR 12216 e, portanto, demonstram a importância da realização de ensaios de tratabilidade para verificar as condições de tratamento peculiares de cada água.

Na floculação, as águas dos dois rios tiveram condições semelhantes nos ensaios. Os menores valores de turbidez remanescente foram encontrados no gradiente de 30 s^{-1} com um tempo de mistura lenta de 30 minutos, 2,51 uT no Rio Doce e 0,89 uT no Rio Piranga, fazendo deste par de parâmetros, os ideais no caso de se utilizar o gradiente constante no tratamento. Esse foi um dos principais indicadores de que, mesmo o Rio Doce tendo sofrido o despejo dos rejeitos da barragem de Fundão, com o tempo, as condições se reestabeleceram de tal forma que, o tratamento da água, visando a redução da turbidez, se assemelha ao de um rio não contaminado pelo rejeito.

Visando dimensionar um floculador em série pelo método de Pádua (1994) para tratar as duas águas, também foi possível identificar semelhança no tempo ideal de mistura lenta: 20 minutos. Para o Rio Doce, o floculador ideal teria 3 câmaras, com os

respectivos gradientes: 70, 40 e 30s^{-1} com um tempo de detenção de 6,6 minutos em cada câmara, configurando-se a Hipótese 2 com uma turbidez residual de 2,53 uT. No Rio Piranga, as condições que apresentaram menor valor de turbidez remanescente (0,88 uT) foram as de 4 câmaras, com os gradientes: 55, 30, 30 e 30s^{-1} e a água ficando 5 minutos em cada uma delas, fazendo valer a Hipótese 1. Como já citado, esses valores são considerados satisfatórios, considerando que Libânio (2010) afirma que, em geral, as águas decantadas possuem valores próximos de 2 uT, quando a turbidez da água bruta é considerada baixa, e 5 uT, em águas com turbidez maior que 100 uT. Além disso, é importante ressaltar a não otimização da velocidade de sedimentação, que poderia diminuir ainda mais, a turbidez residual final.

O sistema escalonado de floculação obteve maior rapidez na redução da turbidez residual, 20 minutos, contra 30 minutos de mistura lenta no gradiente constante. Além disso, o objetivo de usar um sistema com mais câmaras e diferentes gradientes é ter um sistema mais diversificado que possibilite alterar algumas condições de floculação na medida em que houver mudança nos parâmetros de qualidade da água.

Em virtude da grande variação na turbidez ao longo do ano já demonstrada em gráficos neste trabalho, para se obter um melhor dimensionamento de um sistema de floculação complementando esses resultados encontrados e considerando toda a variação climática ao longo do ano, poderia ser feito um estudo semelhante a esse, que englobasse o período chuvoso, nos rios estudados.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

AFFONSO. D. F. S. **Avaliação da qualidade hídrica pelo índice de qualidade de água (IQA) e seus indicadores segmentados: um estudo de caso do Rio Piranga nos trechos urbanos da cidade de Ponte Nova (MG)**. 2016. Monografia. Geografia. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa –MG. Disponível em: <<http://www.geo.ufv.br/wp-content/uploads/2016/10/Deivison-Felipe-de-Souza-Affonso.pdf>> Acesso em: Set. 2018.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório Técnico**: Análise preliminar sobre a qualidade d'água e seus reflexos sobre os usos da água, 2015. Disponível em: <http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Doce/ANA/relatorios/20160128_Relatorio_Tecnico_Analise_Preliminar_sobre_Qualidade_da_Agua_e_Reflexos_sobre_os_Usos.pdf>. Acesso em: Out. 2018.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce Rompimento da Barragem em Mariana – MG**, 2016. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf> Acesso em: Out. 2018.

APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington: APHA, 2012.

BERGAMIN. D. P. **Tratabilidade da água do Rio Gualaxo do Sul em Mariana-MG – Parâmetros otimizados para projeto de unidades de coagulação e floculação**. 2017. Monografia. Engenharia Ambiental. Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – Minas Gerais. 2017.

BORBA, L. R. **Viabilidade do uso da *Moringa Oleifera* Lam no Tratamento Simplificado de Água para pequenas comunidades**. 2001. Dissertação. Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/view/38659392/viabilidade-do-uso-da-moringa-oleifera-lam-no-tratamento->> Acesso em: Out. 2018.

BRAGA, F. P. **Avaliação de desempenho de uma estação de tratamento de água do município de Juiz de Fora – MG.** 2014. Monografia. Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora – MG. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2014/02/TFC-Fernando-Pinto-Braga-2014.pdf>> Acesso em: Set. 2018.

BRASIL. 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.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Procedimentos para a minimização de riscos à saúde. Manual para os responsáveis pela vigilância e controle.** Brasília – 2006. Disponível em: <http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/boas_praticas_agua.pdf> Acesso em: Out. 2018.

BRASIL. Decreto N. 2914 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade,** 2011. Disponível em: http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acesso em: Out. 2018.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência social. **Relatório de análise de acidente. Rompimento da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana – MG.** Abr, 2016. Disponível em: <http://ftp.medicina.ufmg.br/osat/relatorios/2016/SAMARCOMINERACAORELATORIOROMPIMENTOBARRAGEM20160502_09_05_2016.pdf> Acesso em: Out. 2018.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. **Apresentação da Bacia do Rio Doce.** Disponível em: <<http://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>> Acesso em: Out. 2018.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRANGA. **Apresentação da Bacia do Rio Piranga.** Disponível em: <<http://www.cbhpiranga.org.br/a-bacia>> Acesso em: Out. 2018.

CONSTANTINO. A. F; YAMAMURA. V. D. Redução do gasto operacional em estação de tratamento de água utilizando o PAC. **Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana**. Maringá – PR. ISSN 2175-3695. Agosto de 2009. Disponível em: <http://www.dec.uem.br/eventos/ii_simpgeu/arquivos/Trabalhos/146.pdf> Acesso em: Out. 2018.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, L.; BOTARI, A.; SABOGAL-PAZ, L. P; **Uso de modelação matemática para projeto de câmaras mecanizadas de floculação em série em estações de tratamento de água**. Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.10 - Nº 1 - jan/mar 2005, 82-90. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v10n1/v10n01a09.pdf>> Acesso em: Out. 2018.

DI BERNARDO, L. et al. **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. 1. ed. São Carlos: ABES, 2003.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: RiMa, 2002.

FRIAS, A. C.¹; NARVAI, P. C.²; ARAÚJO, M. E.¹; ZILBOVICIUS, C.¹; ANTUNES, J. L. F.¹ **Custo da fluoretação das águas de abastecimento público, estudo de caso – Município de São Paulo, Brasil, período de 1985-2003**. Faculdade de Odontologia. Faculdade de Saúde Pública. Universidade de São Paulo. Jun, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/csp/v22n6/13.pdf>> Acesso em: Out. 2018.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais. **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, 2015**. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_Ibama.pdf>. Acesso em: Set. 2018.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Monitoramento da qualidade das águas superficiais do rio Doce no estado de Minas Gerais, Dezembro de 2015**. Disponível em: <<http://www.ibioagbdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/01/15-DE-DEZEMBRO-DE-2015.pdf>>. Acesso em: Out. 2018.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Monitoramento da qualidade das águas superficiais do rio Doce no estado de Minas Gerais, Junho de 2017.**

Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2017/INFORMATIVO_RD/Relatorio_AvaliacaoQualidadeEmergencial_junho2017.pdf>. Acesso em: Nov. 2018.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Encarte Especial sobre Qualidade das Águas do Rio Doce após 2 anos do Rompimento de Barragem de Fundão – 2015/2017**, Outubro 2017. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/rio-doce/documentos-relacionados/encarte-qualidade-da-gua-do-rio-doce-dois-anos-apos-rompimento-de-barragem-de-fundao-1.pdf>> Acesso em: Nov. 2018.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

MACHADO, P. A.; **Características das qualidades das águas utilizadas no processamento sucroalcooleiro**. Monografia. Tecnologia em Produção Sucroalcooleira. Universidade Federal de São Carlos – Pólo de Itapetininga – São Paulo. 2011.

MASCARENHAS, I. F. E.; **Tratabilidade da água do rio Doce e do rio Piranga: parâmetros otimizados para o projeto de unidades de decantação e filtração**. Monografia. Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – Minas Gerais. 2018.

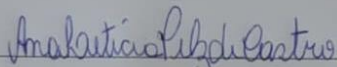
PÁDUA, V. L. **Metodologia para determinação dos gradientes de velocidade médios em unidades de floculação de mistura completa com câmaras em série e escoamento contínuo a partir de ensaios em reatores estáticos**. São Carlos. 165p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade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

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. Escola de Engenharia de São Carlos- USP. São Carlos. 2001.

PEREIRA, G. G. **Remoção de células de Microcystis SP por pré-cloração, coagulação, filtração direta e pós-cloração em escala de bancada**. Escola de Engenharia de São Carlos USP. São Carlos. 2005.

SILVA, G. K. **Método alternativo para aplicação do coagulante natural *moringa oleifera* no tratamento de água.** Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas – SP. 2011.

Certifico de que o aluno **Renan Pedrosa Fonseca**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado: "**Tratabilidade da água dos rios Doce e Piranga: parâmetros otimizados para o projeto de unidades de coagulação e floculação**", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Ana Letícia Pilz de Castro

Orientadora