



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS DE CERRO LARGO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

FELIPE TIAGO WISNIEWSKI CHINVELSKI

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO PARA
TRATAMENTO DE ÁGUA POTÁVEL DE MANANCIAL SUPERFICIAL**

CERRO LARGO

2018

FELIPE TIAGO WISNIEWSKI CHINVELSKI

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO PARA
TRATAMENTO DE ÁGUA POTÁVEL DE MANANCIAL SUPERFICIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Henrique Borba
Co-orientador: Msc. Leandro Pellenz

CERRO LARGO

2018

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Chinvelski, Felipe Tiago Wisniewski

Avaliação do processo de coagulação/floculação para tratamento de água potável de manancial superficial / Felipe Tiago Wisniewski Chinvelski. -- 2018.

43 f.:il.

Orientador: Fernando Henrique Borba.

Co-orientador: Leandro Pellenz.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS , 2018.

1. Água potável. 2. Tratamento convencional. 3. Coagulação. 4. Floculação. I. Borba, Fernando Henrique, orient. II. Pellenz, Leandro, co-orient. III. Universidade Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

FELIPE TIAGO WISNIEWSKI CHINVELSKI

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO PARA
TRATAMENTO DE ÁGUA POTÁVEL DE MANANCIAL SUPERFICIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

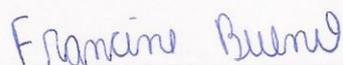
Orientador: Prof. Dr. Fernando Henrique Borba

Co-orientador: Msc. Leandro Pellenz

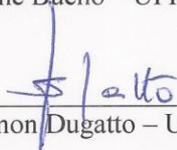
Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

18 / 12 / 2018

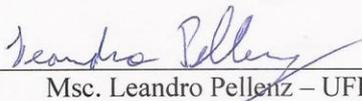
BANCA EXAMINADORA



Msc. Francine Bueno – UFFS



Msc. Jonas Simon Dugatto – UFFS



Msc. Leandro Pellenz – UFFS

RESUMO

A água é um recurso essencial para a vida na terra, sendo o seu consumo uma das principais necessidades humanas, e para tanto, deve possuir uma boa qualidade. Para que a água de abastecimento tenha boa qualidade, são estabelecidos por legislação padrões de potabilidade, ou seja, parâmetros mínimos que devem ser atendidos pelas empresas que produzem água potável. Para o atendimento destes padrões, especialmente nas águas captadas em mananciais superficiais, se faz necessária a aplicação de um processo de tratamento adequado e devidamente otimizado. Neste contexto, este trabalho visou otimizar os parâmetros operacionais do processo convencional de tratamento para tratamento de água do Rio Encantado, localizado no município de Cerro Largo, estado do Rio Grande do Sul. O processo incluiu as etapas de coagulação, floculação e decantação. Em um sistema de bancada *Jar Test* foram investigados os parâmetros pH, dosagem de coagulante e tempo de sedimentação na redução de cor e turbidez, para os coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico. As melhores condições operacionais do processo foram pH 7,3, dosagem de coagulante 6,67 mg L⁻¹ e tempo de sedimentação 60 min, para o coagulante Sulfato de Alumínio e pH 7,1, dosagem de coagulante 4,59 mg L⁻¹ e tempo de sedimentação 60 min para o coagulante cloreto férrico. Sob estas condições foram obtidas remoções significativas dos parâmetros investigados, sendo que os valores finais de cor e turbidez obtidas utilizando o coagulante Sulfato de Alumínio atendem os padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação brasileira.

Palavras-chave: Água potável. Tratamento convencional. Coagulação. Floculação.

ABSTRACT

Water is an essential resource for life in earth, and its consumption is one of the main human needs, and for that, it must have a good quality. In order to have a good quality water supply, regulations establish drinking standards, expressed through minimum parameters that must be complied by the companies that produce drinking water. In order to meet these standards, especially in waters abstracted from surface sources, the application of a suitable and properly optimized treatment process is necessary. Within this context, this work aimed to optimize the operational parameters of the conventional treatment process for treatment of water of the Clarimundo River, located in the municipality of Cerro Largo, State of Rio Grande do Sul. In a Jar Test bench system, the parameters pH, coagulant dosage and sedimentation time were investigated in the reduction of color and turbidity, for the coagulants aluminum sulphate and ferric chloride. The best operation condition of the process were pH 7.3, coagulant dosage 6.67 mg L⁻¹ and sedimentation time 60 min for the coagulant aluminum sulphate and pH 7.1, coagulant dosage 4.59 mg L⁻¹ and sedimentation time 60 min for the coagulant ferric chloride. Under these conditions, significant removals of the investigated parameters were obtained, wherein the final values attained of color and turbidity using aluminum sulphate comply drinking standards established by the Brazilian regulation.

Keywords: Drinking water. Conventional treatment. Coagulation. Flocculation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa do local da coleta das amostras de água bruta do Rio Encantado.	27
Figura 2 – Teste do melhor pH de coagulação com tempo de sedimentação de 1 h, para remoção de cor utilizando os coagulantes Sulfato de Alumínio ($5,33 \text{ mg L}^{-1}$) e Cloreto Férrico ($3,67 \text{ mg L}^{-1}$).....	32
Figura 3 – Teste do melhor pH de coagulação com tempo de sedimentação de 1 h, para remoção de turbidez utilizando os coagulantes Sulfato de Alumínio ($5,33 \text{ mg L}^{-1}$) e Cloreto Férrico ($3,67 \text{ mg L}^{-1}$).....	33
Figura 4 – Teste da melhor concentração do coagulante Sulfato de Alumínio, com pH 7,3 e 1 h de sedimentação, para remoção de (a) cor e (b) turbidez.	34
Figura 5 – Teste da melhor concentração do coagulante Cloreto Férrico, com pH 7,3 e 1 h de sedimentação, para remoção de (a) cor e (b) turbidez.	35
Figura 6 – Teste do melhor tempo de sedimentação utilizando o coagulante Sulfato de Alumínio para remoção de (a) cor e (b) turbidez.	36
Figura 7 – Teste do melhor tempo de sedimentação utilizando o coagulante Cloreto Férrico para remoção de (a) cor e (b) turbidez.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características da água bruta.....	31
Tabela 2 – Características da água tratada utilizando o coagulante Sulfato de Alumínio (6,67 mg L ⁻¹), pH 7,3 e 60 min de sedimentação.	38
Tabela 3 – Características da água tratada utilizando o coagulante Cloreto Férrico (4,59 mg L ⁻¹), pH 7,1 e 60 min de sedimentação.	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 Objetivos específicos.....	11
1.2 JUSTIFICATIVA.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA	12
2.1.1 Características químicas	12
2.1.1.1 Oxigênio dissolvido.....	12
2.1.1.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio	13
2.1.1.3 Carbono Orgânico Total	13
2.1.1.4 Nitrogênio	14
2.1.1.5 Fósforo.....	14
2.1.1.6 pH.....	15
2.1.1.7 Alcalinidade	15
2.1.1.8 Acidez	15
2.1.1.9 Dureza.....	16
2.1.1.10 Salinidade.....	17
2.1.1.11 Ferro e manganês.....	17
2.1.2 Características físicas.....	17
2.1.2.1 Cor	18
2.1.2.2 Turbidez	19
2.1.2.3 Sabor e odor	19
2.1.2.4 Temperatura	20
2.1.3 Características biológicas.....	20
2.1.3.1 Bactérias coliformes	20
2.1.3.2 Algas e cianobactérias	21

2.1.3.3 Protozoários	21
2.2 LEGISLAÇÃO APLICÁVEL À QUALIDADE DA ÁGUA	21
2.2.1 Resolução CONAMA 357 (2005)	21
2.2.2 Portaria de Consolidação 5 – Ministério da Saúde (2017).....	22
2.2.2.1 Padrões de potabilidade	22
2.2.3 NBR 12216 (1992).....	24
2.3 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA	25
2.3.1 Coagulação e floculação	25
2.3.2 Decantação.....	25
2.3.3 Filtração.....	26
2.3.4 Desinfecção	26
3 METODOLOGIA	27
3.1 AMOSTRAS DE ÁGUA DE RIO.....	27
3.2 SOLUÇÕES COAGULANTES	27
3.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO	28
3.3.1 Procedimento Jar Test	28
3.3.2 Dosagem mínima de coagulante.....	28
3.3.3 Melhor pH de coagulação	29
3.3.4 Melhor dosagem de coagulante.....	29
3.3.5 Melhor tempo de sedimentação	29
3.4 DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA.....	31
4.2 DOSAGEM MÍNIMA DE COAGULANTE	31
4.3 MELHOR pH DE COAGULAÇÃO.....	31
4.4 MELHOR DOSAGEM DE COAGULANTE.....	33
4.5 MELHOR TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO	36
4.6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA TRATADA.....	38
5 CONCLUSÃO	40

REFERÊNCIAS.....	41
-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A água ocupa aproximadamente 75% da superfície da Terra e é o constituinte inorgânico mais abundante na matéria viva, sendo um solvente universal da maioria das substâncias. Estima-se que há 10 mil anos, com a revolução da agricultura, o ser humano tenha começado a abandonar a caça como principal fonte de sustento e iniciaram-se as primeiras culturas e a criação dos rebanhos. Como consequência, renunciou-se progressivamente ao nomadismo, que caracterizava as primeiras comunidades, e a busca por fontes de abastecimento culminou com o estabelecimento dos primeiros povoados às margens dos cursos d'água, provavelmente na região da Mesopotâmia (LIBÂNIO, 2010; REALI; PAZ; DANIEL, 2012).

Fatores naturais e antrópicos podem afetar negativamente a qualidade da água, causando poluição dos corpos hídricos naturais e artificiais por substâncias químicas variadas, elementos radioativos, organismos patogênicos e nutrientes, tais como como fósforo e nitrogênio. A alteração das características físicas, químicas e biológicas da água por poluição pode inviabilizar o seu uso dependendo da finalidade, bem como provocar prejuízo aos ecossistemas aquáticos e transmitir doenças às populações (LIBÂNIO, 2010).

Devido à presença de poluentes, para que a água seja considerada potável, geralmente é necessária a aplicação de algum processo de tratamento antes de sua distribuição à população. O tratamento consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias possivelmente deletérias à saúde humana presentes nas águas naturais. As tecnologias de tratamento comumente aplicadas visam aliar baixo custo de implantação, operação e manutenção, além de baixo impacto ambiental com eficiência na remoção de poluentes. Diferentemente do tratamento de águas residuárias de característica predominantemente biológica, as tecnologias de tratamento das águas de abastecimento, na sua totalidade, abrangem um conjunto de processos e operações físico-químicas. As etapas do processo de tratamento convencional da água são: coagulação, floculação, decantação e/ou flotação, filtração, desinfecção (cloração) e fluoretação (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; LIBÂNIO, 2010).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é avaliar uma possível aplicação de um processo convencional de tratamento de água do Rio Encantado, incluindo coagulação, floculação e decantação.

1.1.1 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização físico-química da água não tratada e tratada por tratamento convencional;
- Otimizar a dosagem dos coagulantes sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e cloreto férrico (FeCl_3) do processo de coagulação para clarificação da água (remoção de cor e turbidez);
- Otimizar o pH do processo de coagulação para clarificação da água (remoção de cor e turbidez);
- Verificar a potabilidade da água de acordo com a Portaria de Consolidação do Ministério da Saúde N° 5 de 2017.

1.2 JUSTIFICATIVA

São justificativas do trabalho: a crescente demanda por abastecimento de água e a importância de estudar alternativas viáveis de fornecimento de água potável para a cidade de Cerro Largo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA

As características físicas, químicas e biológicas das águas naturais demonstram uma série de processos que ocorrem no corpo hídrico e na bacia hidrográfica como consequência das capacidades de dissolução de grande quantidade de substâncias e presença de sólidos suspensos aliado ao transporte por escoamento superficial e subterrâneo (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

2.1.1 Características químicas

As características químicas da água estão relacionadas à presença de substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas, sendo de grande importância devido as suas potenciais consequências sobre o organismo dos consumidores. As principais características químicas orgânicas da água são o oxigênio dissolvido (OD), a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a Demanda Química de Oxigênio (DQO), o Carbono Orgânico Total (COT), as diversas formas do Nitrogênio, e o Fósforo em suas diversas formas. Dentre as características químicas inorgânicas da água destacam se o pH, a alcalinidade, a acidez, a dureza, a salinidade, e os metais, que podem ser: ferro, manganês e metais pesados (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; LIBÂNIO, 2010).

2.1.1.1 Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido (OD) é de essencial importância para os organismos aeróbios. Durante a estabilização da matéria orgânica, as bactérias fazem uso do oxigênio nos seus processos respiratórios, podendo causar uma redução da sua concentração no meio. Dependendo da magnitude, este fenômeno pode causar a morte de diversos organismos aquáticos, inclusive os peixes. Caso o oxigênio seja totalmente consumido, tem-se as condições anaeróbias, com possível geração de maus odores. O OD é encontrado nas águas naturais na forma de gás dissolvido, originado através da dissolução do oxigênio atmosférico e/ou da produção por organismos aquáticos fotossintéticos, o zooplâncton e o fitoplâncton. O OD é o principal parâmetro de caracterização dos efeitos da poluição das águas por despejos orgânicos.

Ao nível do mar à temperatura de 20 °C, a concentração de OD à saturação é de 9,17 mg L⁻¹. Valores de OD superiores a saturação são indicativos da presença de algas, e valores de OD bem inferiores a saturação são indicativos da presença de elevadas quantidades de matéria orgânica. Com OD em torno de 4 a 5 mg L⁻¹ morrem os peixes mais exigentes, com OD igual ou inferior a 2 mg L⁻¹ ocorre a morte de praticamente todos os peixes, e com OD igual a 0 mg L⁻¹ tem-se condições de anaerobiose (VON SPERLING, 2005; LIBÂNIO, 2010).

2.1.1.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio

Os parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) expressam a presença de matéria orgânica, sendo um importante indicador de qualidade das águas naturais. A DBO indica a quantidade de oxigênio (mg L⁻¹) necessário às bactérias na estabilização da matéria orgânica carbonácea, indicando a concentração de carbono biodegradável. A determinação da DBO geralmente é realizada com base na diferença na concentração de OD em amostra de água no período de cinco dias e temperatura de 20 °C, então se a amostra de água natural apresentar DBO de 5 mg L⁻¹ serão necessárias 5 mg L⁻¹ de oxigênio dissolvido para estabilizar sua carga orgânica biodegradável (VON SPERLING, 2005; LIBÂNIO, 2010).

A DQO é determinada por titulação química com dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) e compreende toda matéria orgânica suscetível à oxidação, biodegradável e não biodegradável. A razão DQO/DBO é frequentemente utilizada como um parâmetro indicador de biodegradabilidade de poluentes presentes em águas e efluentes (JARDIM e CANELA, 2004).

2.1.1.3 Carbono Orgânico Total

Outro indicador de concentração de matéria orgânica nas águas naturais é o carbono orgânico total (COT), que é dividido nas parcelas dissolvida e particulada. A medida do COT é determinada em função do CO₂ liberado, devendo ser removidas, além do próprio CO₂, as formas inorgânicas, como carbonatos e bicarbonatos, passíveis de artificialmente elevar o resultado. Em águas superficiais o teor de COT varia de 1 a 20 mg L⁻¹, elevando-se para até 1000 mg L⁻¹ nas águas residuárias, sendo um bom indicador de fontes poluidoras (LIBÂNIO, 2010).

2.1.1.4 Nitrogênio

Dentro do ciclo do nitrogênio na biosfera, este se alterna entre várias formas e estados de oxidação. No meio aquático, o nitrogênio pode ser encontrado nas formas de nitrogênio molecular (N_2), nitrogênio orgânico (dissolvido e em suspensão), amônia (livre NH_3 e ionizada NH_4^+), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-). Na natureza o nitrogênio é constituinte de proteínas e vários outros compostos biológicos, bem como na composição celular de microrganismos. Despejos domésticos e industriais, em excrementos de animais e em fertilizantes agropecuários também são grandes fontes de nitrogênio (VON SPERLING, 2005).

Elevadas concentrações de nitrogênio no meio aquático causam crescimento excessivo do fitoplâncton, dando início ao processo de eutrofização, que acarreta em uma série de impactos negativos aos ecossistemas aquáticos, além de redução do OD e aumento da carga orgânica. O nitrogênio na forma de amônia livre é tóxico aos peixes e na forma de nitrato está associado a doenças como a metahemoglobinemia em seres humanos (VON SPERLING, 2005).

Em termos de tratamento e abastecimento público de água o padrão de potabilidade estabelece concentração menor ou igual a 10 mg L^{-1} de nitrato, e 1 mg L^{-1} de nitrito (VON SPERLING, 2005; BRASIL, 2017).

2.1.1.5 Fósforo

O fósforo na água encontra-se principalmente nas formas de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico. Os ortofosfatos são diretamente disponíveis para o metabolismo biológico sem necessidade de conversões a formas mais simples. As formas em que os ortofosfatos se apresentam na água (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, H_3PO_4) dependem do pH, sendo a mais comum na faixa usual de pH o HPO_4^{2-} . Os polifosfatos são moléculas mais complexas com dois ou mais átomos de fósforo. O fósforo pode ter origem a partir da dissolução de compostos do solo, da decomposição da matéria orgânica, da composição celular de microrganismos, além de ser proveniente de despejos domésticos e industriais, detergentes, excrementos de animais e fertilizantes. O fósforo não apresenta problemas de ordem sanitária nas águas de abastecimento e é essencial para o crescimento dos microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica, porém, em altas concentrações nos corpos hídricos, contribui com o processo de eutrofização (VON SPERLING, 2005).

2.1.1.6 pH

O potencial hidrogeniônico (pH) representa a concentração de íons hidrogênio H^+ , dando uma indicação sobre a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água. A faixa de pH é de 0 a 14. Para pH menor que 7 tem-se condições ácidas, para pH igual a 7, neutralidade, e para pH maior que 7, condições básicas (VON SPERLING, 2005).

Em termos de tratamento e abastecimento público de água, diferentes valores de pH estão associados a diferentes faixas de atuação ótima de coagulantes. Frequentemente o pH precisa ser corrigido antes e/ou depois da adição de produtos químicos no tratamento, pois a variação do pH influencia o equilíbrio de compostos químicos. Em corpos hídricos valores elevados de pH podem estar associados à propagação de algas. Valores elevados ou baixos também podem ser indicativos da presença de efluentes industriais (VON SPERLING, 2005).

2.1.1.7 Alcalinidade

Segundo Von Sperling (2005), alcalinidade é a capacidade da água de neutralizar os ácidos, ou seja, a quantidade de íons na água que reagirão para neutralizar os íons hidrogênio. Os principais constituintes da alcalinidade são os bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e os hidróxidos (OH^-). A distribuição entre as três formas na água está relacionada ao pH:

- $pH > 9,4$: hidróxidos e carbonatos;
- $8,3 < pH < 9,4$: carbonatos e bicarbonatos;
- $4,4 < pH < 8,3$: apenas bicarbonato.

Os elementos constituintes da alcalinidade podem ser obtidos a partir da dissolução de rochas, da reação do CO_2 com a água (CO_2 advindo da atmosfera ou da decomposição da matéria orgânica) e encontrados em despejos industriais. A alcalinidade não apresenta significado sanitário, mas em elevadas concentrações confere um gosto amargo à água. É uma determinação importante no controle do tratamento de água, estando relacionada com a coagulação, redução de dureza e prevenção da corrosão em tubulações (VON SPERLING, 2005).

2.1.1.8 Acidez

Segundo Von Sperling (2005), acidez é a capacidade da água em resistir às alterações de pH causadas pelas bases. Ocorre devido principalmente à presença de CO_2 livre absorvido da atmosfera ou proveniente da decomposição da matéria orgânica, gás sulfídrico, despejos industriais e águas de escoamento superficial. A classificação da acidez de águas pode ser feita da seguinte maneira:

- $\text{pH} > 8,2$: ausência de CO_2 livre;
- $4,5 < \text{pH} < 8,2$: acidez carbônica;
- $\text{pH} < 4,5$: acidez por ácidos minerais fortes.

A acidez possui pouco significado sanitário, no entanto águas com acidez mineral são desagradáveis ao paladar, sendo recusadas. Além disso a acidez pode provocar corrosão de tubulações e materiais do sistema de abastecimento (VON SPERLING, 2005).

2.1.1.9 Dureza

Dureza é a concentração de cátions multimetálicos em solução, expressa em $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$. Os cátions bivalentes Ca^{2+} e Mg^{2+} são os mais frequentemente associados à dureza. Em condições de supersaturação, esses cátions reagem com ânions da água, formando precipitados. A dureza pode ser classificada como dureza carbonato, associada a HCO_3^- e CO_3^{2-} e correspondente à alcalinidade, e dureza não carbonato, associada a outros ânions, especialmente Cl^- e SO_4^{2-} . A dureza carbonato é sensível ao calor, ocasionando precipitação em altas temperaturas. Dissolução de minerais contendo cálcio e magnésio, como rochas calcárias, e despejos industriais são as principais fontes de dureza na água (VON SPERLING, 2005).

Não existem evidências de que a dureza cause problemas sanitários, e, alguns estudos realizados em áreas com maior dureza na água indicaram uma menor incidência de doenças cardíacas. Em determinadas concentrações a dureza causa um gosto desagradável e pode apresentar implicações laxativas. Águas com maior dureza diminuem a formação de espuma, implicando em um maior consumo de sabão, além de causar incrustação nas tubulações de água quente, caldeiras e aquecedores, devido à maior precipitação nas temperaturas elevadas (VON SPERLING, 2005).

Segundo Von Sperling (2005), em termos de tratamento e abastecimento público de água tem se as seguintes definições:

- dureza $< 50 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$: água mole;
- dureza entre 50 e $150 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$: dureza moderada;

- dureza entre 150 e 300 mg L⁻¹ CaCO₃: água dura;
- dureza > 300 mg L⁻¹ CaCO₃: água muito dura.

A água possui padrão de potabilidade adequado com valor máximo permitido de dureza total de 500 mg L⁻¹, de acordo com a Portaria de Consolidação MS nº 5 de 2017.

2.1.1.10 Salinidade

A salinidade das águas naturais está vinculada à presença de sais minerais dissolvidos formados por ânions como cloreto, sulfato e bicarbonato e cátions como cálcio, magnésio, potássio e sódio. A dificuldade inerente à determinação da concentração de cada sal – cujo somatório seria a mais precisa indicação da magnitude da salinidade – fez com que se tornasse usual o emprego da concentração de cloretos como estimativa desta característica química. A concentração de cloretos está relacionada diretamente à condutividade elétrica, sendo esta considerada um indicador confiável da salinidade da água (LIBÂNIO, 2010).

2.1.1.11 Ferro e manganês

O ferro e o manganês estão presentes nas formas insolúveis (Fe³⁺ e Mn⁴⁺) em uma grande quantidade de tipos de solos, podendo, na falta de oxigênio dissolvido, se apresentarem na forma solúvel reduzida (Fe²⁺ e Mn²⁺). Caso a água contendo as formas reduzidas, seja exposta ao ar atmosférico, o ferro e o manganês voltam a se oxidar às suas formas insolúveis (Fe³⁺ e Mn⁴⁺), que precipitam, gerando cor na água, além de manchar roupas durante processos e lavagem (VON SPERLING, 2005).

O ferro e o manganês são obtidos a partir da dissolução de compostos do solo e encontrados em despejos industriais. Eles têm pouco significado sanitário nas concentrações usualmente encontradas nas águas naturais. Em concentrações mais elevadas podem causar sabor e odor, mas nestas concentrações o consumidor já terá rejeitado a água devido à cor (VON SPERLING, 2005). Conforme a Portaria de Consolidação MS nº 5 (2017), a água possui padrão de potabilidade, com concentração de 0,3 mg L⁻¹ para o ferro, e de 0,1 mg L⁻¹ para o manganês.

2.1.2 Características físicas

As características físicas das águas de abastecimento causam um impacto de imediato ao consumidor, podendo acarretar na recusa da água distribuída pela concessionária. Quando isto ocorre, a opção de abastecimento recai para uma fonte alternativa, não necessariamente segura. Esta percepção imediata envolve os sentidos da visão (turbidez e cor), paladar e olfato (sabor e odor). São características físicas das águas naturais: cor, turbidez, sabor, odor, temperatura, entre outros (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; LIBÂNIO, 2010).

2.1.2.1 Cor

A cor é responsável pela coloração da água e ocorre devido aos sólidos dissolvidos, que tem como origem natural a decomposição da matéria orgânica e a presença de ferro e manganês. A cor da água também pode modificar-se devido aos resíduos industriais e esgotos domésticos despejados em rios como efluentes líquidos. A água com cor de origem natural não representa risco direto à saúde humana, mas consumidores podem questionar sua confiabilidade e buscar outras fontes de maior risco. Além disso cloração da água contendo matéria orgânica dissolvida responsável pela cor pode gerar subprodutos potencialmente cancerígenos, tais como os trihalometanos. A água com cor de origem industrial pode ou não apresentar toxicidade, dependendo dos compostos presentes no efluente. A cor é dividida em aparente e verdadeira, sendo que no valor de cor aparente pode estar incluída uma parcela devida à turbidez da água. Quando esta é removida por centrifugação obtém-se a cor verdadeira (VON SPERLING, 2005).

Segundo Von Sperling (2005), em termos de tratamento de água e abastecimento público de água tem-se as seguintes definições:

- Águas com cor acima de 15 uC (unidades de cor) podem ser detectadas em um corpo d'água pela maioria dos consumidores;
- Valores de cor da água bruta inferiores a 5 uC usualmente dispensam coagulação química, valores superiores a 25 uC usualmente requerem a coagulação química seguida por filtração;
- Águas com cor elevada implicam em um mais delicado cuidado operacional no tratamento da água.

Conforme a Portaria de Consolidação nº 5 do MS de 2017, a água possui padrão de potabilidade com intensidade de cor menor ou igual a 15 uC.

2.1.2.2 Turbidez

A turbidez é geralmente expressa em unidades de turbidez (uT) ou unidades nefelométricas de turbidez (NTU), que são equivalentes, e representam o grau de interferência na passagem da luz através da água, podendo conferir uma aparência turva à mesma devido à presença de sólidos em suspensão. Os sólidos em suspensão que podem ser de origem natural, como partículas de rocha, argila, silte, algas e outros microrganismos, ou de origem antropogênica, como despejos domésticos e industriais. A turbidez de origem natural não traz inconvenientes sanitários diretos, porém, é esteticamente desagradável na água potável, e os sólidos podem servir de abrigo para microrganismos patogênicos. Já a turbidez de origem antropogênica pode estar associada a compostos tóxicos e organismos patogênicos. Em corpos d'água a turbidez pode diminuir a penetração da luz, prejudicando a fotossíntese (VON SPERLING, 2005).

Águas com turbidez inferior a 10 uT possuem baixa nebulosidade, enquanto águas com turbidez superior a 500 uT são praticamente opacas. No tratamento, águas com turbidez inferior a 20 uT podem ser encaminhadas diretamente para filtração lenta, dispensando a coagulação química, e águas valores superiores a 50 uT requerem uma etapa antes da filtração, que pode ser a coagulação química ou um pré-filtro grosseiro (VON SPERLING, 2005). Conforme a Portaria de Consolidação nº 5 do MS de 2017, a água possui padrão de potabilidade com turbidez igual ou inferior a 1 uT em 95 % das amostras.

2.1.2.3 Sabor e odor

O sabor e odor ocorrem devido aos sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos, e gases dissolvidos. A origem natural é devida à presença de matéria orgânica em decomposição e de microrganismos. E a de origem antropogênica ocorre devido à despejos domésticos, despejos industriais e gases dissolvidos. O sabor e odor na água não necessariamente representam risco direto à saúde, mas consumidores podem questionar a sua confiabilidade, sendo estes geralmente os maiores motivos de reclamações. Além disso, sabor e odor em graus de intensidade notadamente elevados podem indicar a presença de substâncias potencialmente perigosas (VON SPERLING, 2005).

2.1.2.4 Temperatura

A temperatura é a medição da intensidade de calor, ocorre por origem natural através da transferência de calor por radiação, condução e convecção; e a alteração da temperatura da água por origem antropogênica ocorre nas águas de torres de resfriamento, e por despejos industriais. Elevações da temperatura aumentam a taxa das reações físicas, químicas e biológicas, além de diminuir a solubilidade dos gases e aumentarem a taxa de transferência de gases. Em termos de corpos d'água, a temperatura deve ser avaliada em conjunto com outros parâmetros, tais como oxigênio dissolvido (VON SPERLING, 2005).

2.1.3 Características biológicas

As características biológicas das águas naturais referem-se aos vários microrganismos que habitam no ambiente aquático. Sua importância manifesta-se na possibilidade de transmitir doenças e na modificação da matéria orgânica dentro dos ciclos biogeoquímicos de diversos elementos (LIBÂNIO, 2010).

2.1.3.1 Bactérias coliformes

As bactérias do grupo coliforme habitam normalmente o trato intestinal dos animais de sangue quente, servindo como indicadoras da contaminação de uma amostra de água por fezes, além de existirem naturalmente no solo e na vegetação. A maioria das doenças associadas à água, denominadas de transmissão ou veiculação hídrica, é transmitida por via fecal, ou seja, os organismos patogênicos eliminados pelas fezes alcançam o ambiente aquático (LIBÂNIO, 2010).

As bactérias do grupo coliformes totais (CT) incluem amplo rol de bactérias ambientais e de origem fecal capazes de sobreviver no meio aquático, fermentar a lactose e produzir ácido ou aldeído em 24 horas à temperatura de 35 a 37 °C. O grupo CT foi bastante utilizado no passado como indicador, e continua a ser usado em algumas áreas, embora as dificuldades associadas com a ocorrência de bactérias não fecais seja um problema (VON SPERLING, 2005; LIBÂNIO, 2010).

Os coliformes fecais (CF) também chamados de coliformes termotolerantes, são um grupo de bactérias indicadoras de organismos originários do trato intestinal humano e outros

animais. Este grupo compreende o gênero *Escherichia* e, em menor grau, espécies de *Klebsiella*, *Enterobacter* e *Citrobacter*. *Escherichia coli* é a principal bactéria do grupo de coliformes termotolerantes, sendo abundante nas fezes humanas e de animais. *E. coli* é atualmente utilizada como indicador de contaminação fecal, pois é a única que dá garantia de contaminação exclusivamente fecal (VON SPERLING, 2005; LIBÂNIO, 2010).

2.1.3.2 Algas e cianobactérias

As algas e cianobactérias são encontradas em grande parte das águas superficiais, respondendo por meio da fotossíntese por parcela expressiva da concentração de oxigênio dissolvido do meio aquático. Especificamente, as cianobactérias fazem-se presentes em praticamente toda superfície terrestre há mais de 3,5 bilhões de anos e a maioria das espécies apresenta crescimento significativo nas faixas de pH de 6,0 a 9,0 e temperatura de 15 a 30 °C, usuais nos corpos d'água das regiões tropicais. A adaptabilidade ao ambiente faz com que as cianobactérias possam predominar mesmo em ambientes pobres em nutrientes, pela capacidade de algumas espécies de fixação do nitrogênio do ar atmosférico (LIBÂNIO, 2010).

2.1.3.3 Protozoários

Os gêneros de protozoários associados a doenças de transmissão hídrica incluem *Giardia*, *Cryptosporidium*, *Toxoplasma*, *Cyclospora*, *Entamoeba*, *Isospora belli*, *Naegleria fowleri* e *Acanthamoeba*, capazes de produzir cistos ou oocistos resistentes às condições do ambiente. À exceção dos dois últimos gêneros de vida livre, os demais fazem-se presentes nos dejetos dos indivíduos contaminados, indicando contaminação por esgoto não tratado. As principais doenças de transmissão hídrica causadas pelos protozoários são a giardíase, a disenteria amebiana, a balantidíase e a criptosporidiose (LIBÂNIO, 2010).

2.2 LEGISLAÇÃO APLICÁVEL À QUALIDADE DA ÁGUA

2.2.1 Resolução CONAMA 357 (2005)

A Resolução CONAMA N° 357 de 17 de março de 2005 classifica os corpos hídricos de acordo com a qualidade, em classes Especial, 1, 2, 3 e 4, da melhor para a pior qualidade respectivamente, além de dar diretrizes ambientais para o seu enquadramento.

De acordo com esta Resolução, as águas doces possuem salinidade igual ou inferior a 0,5 % e podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano mediante os seguintes processos de tratamento:

- classe especial: desinfecção;
- classe 1: tratamento simplificado;
- classe 2: tratamento convencional;
- classe 3: tratamento convencional ou avançado;

As águas classificadas como classe 4 podem ser destinadas apenas a navegação e harmonia paisagística.

2.2.2 Portaria de Consolidação 5 – Ministério da Saúde (2017)

A Portaria de Consolidação do Ministério da Saúde N° 5 de 28 de setembro de 2017, estabelece procedimentos de monitoramento da qualidade da água para consumo humano e define os padrões de potabilidade.

2.2.2.1 Padrões de potabilidade

Os padrões de potabilidade da água representam os valores mínimos e/ou máximos permitidos para cada parâmetro para a legislação.

Os padrões microbiológicos a serem monitorados de acordo com a Portaria de Consolidação n° 5 de 2017, são os coliformes totais e *Escherichia coli*, visando indicar contaminação fecal bem como verificar a eficiência do processo de desinfecção da rede de distribuição e reservatórios. No Quadro 1 são apresentados os padrões microbiológicos a serem atendidos.

Quadro 1 – Padrões microbiológicos da água para consumo humano.

Tipo de água		Parâmetro		Valor Máximo Permitido (VMP)
Água para consumo humano		Escherichia coli		Ausência em 100 mL
Água tratada	Na saída do tratamento	Coliformes totais		Ausência em 100 mL
	No sistema de distribuição (reservatórios e rede)	Escherichia coli		Ausência em 100 mL
		Coliformes totais	Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem menos de 20.000 habitantes	Apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês, poderá apresentar resultado positivo
			Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem a partir de 20.000 habitantes	Ausência em 100 mL em 95% das amostras examinadas no mês.

Fonte: Adaptado de BRASIL, Portaria de Consolidação MS Nº 5 de 2017.

A ausência de coliformes totais na saída do tratamento é indicadora da eficiência do processo de tratamento, enquanto sua presença no sistema de distribuição é utilizada para avaliar a integridade dos reservatórios e rede de distribuição. Escherichia coli é o indicador de contaminação fecal (BRASIL, 2017).

Os padrões de turbidez, que indicam os sólidos em suspensão, são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Padrões de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção.

Tratamento da água	Valor Máximo Permitido (VMP)
Desinfecção (para águas subterrâneas)	1,0 uT em 95% das amostras
Filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta)	0,5 uT em 95% das amostras
Filtração lenta	1,0 uT em 95% das amostras

Fonte: Adaptado de BRASIL, Portaria de Consolidação MS Nº 5 de 2017.

A Portaria de Consolidação MS nº 5 de 2017, estabelece ainda os padrões organolépticos de potabilidade descritos no Quadro 3.

Quadro 3 – Padrão organoléptico de potabilidade.

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)
Alumínio	mg L ⁻¹	0,2
Amônia (como NH ₃)	mg L ⁻¹	1,5
Cloreto	mg L ⁻¹	250
Cor Aparente	mg Pt-Co L ⁻¹	15
1,2 diclorobenzeno	mg L ⁻¹	0,01
1,4 diclorobenzeno	mg L ⁻¹	0,03
Dureza total	mg L ⁻¹	500
Etilbenzeno	mg L ⁻¹	0,2
Ferro	mg L ⁻¹	0,3
Gosto e odor	Intensidade	6
Manganês	mg L ⁻¹	0,1
Monoclorobenzeno	mg L ⁻¹	0,12
Sódio	mg L ⁻¹	200
Sólidos dissolvidos totais	mg L ⁻¹	1000
Sulfato	mg L ⁻¹	250
Sulfeto de hidrogênio	mg L ⁻¹	0,1
Surfactantes (como LAS)	mg L ⁻¹	0,5
Tolueno	mg L ⁻¹	0,17
Turbidez	uT	5
Zinco	mg L ⁻¹	5
Xilenos	mg L ⁻¹	0,3

Fonte: Adaptado de BRASIL, Portaria de Consolidação MS Nº 5 de 2017.

Adicionalmente uma série de substâncias químicas, bem como radioatividade e cianotoxinas com potenciais riscos à saúde humana são regulamentados pela Portaria de Consolidação MS nº 5 de 2017.

2.2.3 NBR 12216 (1992)

A NBR 12216 (1992) fornece diretrizes e estabelece valores para o dimensionamento de estações de tratamento de água potável para abastecimento público. Esta norma engloba os seguintes processos hidráulicos: mistura rápida, mistura lenta, decantação, filtração rápida e filtração lenta. Para cada um dos processos, são determinados múltiplos valores de parâmetros e de dimensões, visando otimizar a operação da ETA. Entretanto, caso sejam realizadas avaliações em laboratórios que encontrem parâmetros experimentalmente mais eficientes, a Norma prevê que estes podem ser utilizados. Além disso, a NBR 12216 (1992) define e fornece

as diretrizes de outros processos do tratamento convencional, como a desinfecção, coagulação e correção de pH.

2.3 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA

O processo de tratamento convencional de água é executado em uma série de etapas, incluindo coagulação/floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação.

2.3.1 Coagulação e floculação

O processo de coagulação é um processo químico em que se adiciona coagulantes na água, submetida à gradiente de mistura rápido, logo após a captação da água de rios ou reservatórios. Antes dele pode ser adicionado o agente oxidante, para regularização do pH para ficar na faixa de pH do coagulante. O processo de coagulação é necessário, pois a água que se deseja tratar geralmente possui coloides, cor, sólidos dissolvidos totais (SDT), e turbidez em valores acima dos estabelecidos pela legislação. Os principais coagulantes utilizados são: sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato ferroso clorado, sulfato férrico, cloreto de polialumínio e Moringa oleifera (LIBÂNIO, 2010; REALI; PAZ; DANIEL, 2012).

O processo de floculação é um processo físico, com gradiente de velocidade lento, em que ocorre a aglomeração dos flocos formados a partir da coagulação. Esse processo se divide em duas fases: (i) floculação pericínética, que ocorre devido à energia interna da água originada do movimento Browniano (aleatório); e (ii) floculação ortocínética, que é a colisão entre as partículas desestabilizadas, promovida pela ação de gradientes de velocidade induzidos mecanicamente na água (RICHTER, 2009; LIBÂNIO, 2010).

2.3.2 Decantação

O processo de decantação ocorre nas unidades de sedimentação ou decantadores, onde o escoamento da água é tranquilizado, fazendo com que os flocos em suspensão sedimentem por gravidade e acumulem no fundo do tanque, de onde são removidos na forma de lodo (RICHTER, 2009). Alternativamente, também pode ser aplicada a flotação por ar dissolvido (FAD), em que são injetadas microbolhas de ar na água floculada. Estas microbolhas se aderem

aos flocos e se deslocam em direção a superfície, onde são removidas da água por raspagem (LIBÂNIO, 2010; REALI; PAZ; DANIEL, 2012).

2.3.3 Filtração

A filtração consiste na remoção das impurezas contidas na água quando o fluido escoar por um meio poroso. A remoção de partículas nos filtros pode ser realizada por ação de profundidade, como acontece nos filtros rápidos ou por ação superficial, como ocorre nos filtros lentos. No primeiro caso, as impurezas são retidas ao longo do meio filtrante, ocorrendo progressiva saturação (colmatação) das subcamadas que continuam, no tempo, até ocorrer o fenômeno da geração de efluente com características idênticas ao afluente (RICHTER, 2009). As tecnologias de tratamento de água que utilizam coagulação, floculação, decantação e flotação geralmente aplicam a filtração por ação de profundidade pois assim são geradas carreiras de filtração mais longas. Na filtração por ação superficial, a remoção de impurezas é significativa no topo do meio filtrante, desta forma, a ação física de coar é o mecanismo de filtração mais importante (LIBÂNIO, 2010; REALI; PAZ; DANIEL, 2012).

2.3.4 Desinfecção

A desinfecção da água é uma operação necessária para eliminar os microrganismos patogênicos não removidos ou inativados nas operações de coagulação, floculação, decantação (ou flotação) e filtração. Esta etapa consiste na inativação dos microrganismos que possam causar doenças e não à eliminação de todos os microrganismos, o que a diferencia da esterilização (RICHTER e NETTO, 1991).

A desinfecção de água pode ser feita pela adição de produtos químicos, por processos físicos. A desinfecção química utiliza, principalmente, cloro gasoso, hipoclorito de sódio, hipoclorito de cálcio, dióxido de cloro, ozônio e iodo. Os processos físicos de desinfecção utilizam o calor, a luz solar e a radiação ultravioleta. A ação do desinfetante nos organismos patogênicos pode causar a destruição da parede celular, principalmente por antibióticos; a alteração da permeabilidade da parede celular, por fenóis e detergentes; a alteração da natureza coloidal do protoplasma, por calor, radiação, ácidos e produtos alcalinos; a inibição da atividade enzimática por oxidantes (RICHTER e NETTO, 1991; LIBÂNIO, 2010).

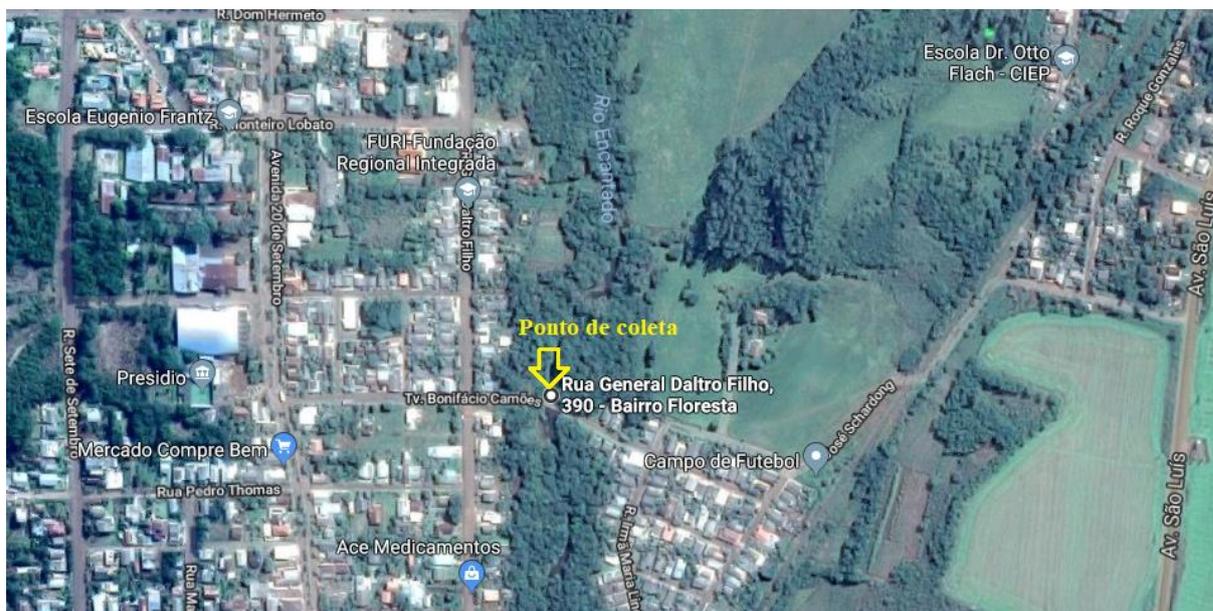
3 METODOLOGIA

Os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa são descritos a seguir. Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Águas da Universidade Federal da Fronteira Sul, *Campus Cerro Largo* - RS.

3.1 AMOSTRAS DE ÁGUA DE RIO

As amostras de água bruta foram coletadas no Rio Encantado, localizado no município de Cerro Largo - RS, seguindo as técnicas de coleta e preservação de amostras descritas pela NBR 9898 (1987). A coleta foi realizada em um ponto somente, no dia 18 de setembro de 2018, no ponto mostrado no mapa da Figura 1. A condição climática no momento da coleta foi de tempo bom, sem precipitações pluviométricas nas 48 horas anteriores à coleta.

Figura 1 – Mapa do local da coleta das amostras de água bruta do Rio Encantado.



Fonte: Google Maps, 2018.

3.2 SOLUÇÕES COAGULANTES

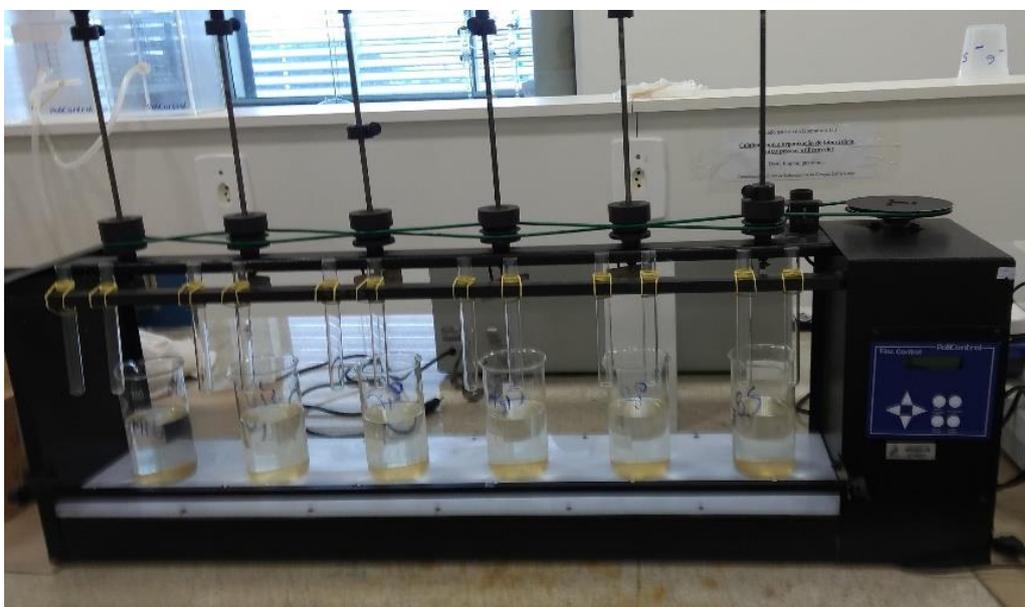
Foram preparadas soluções de Sulfato de Alumínio em concentração 10% m/v, utilizando Sulfato de Alumínio Hidratado ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Vetec), e Cloreto Férrico também em concentração 10% m/v, utilizando Cloreto Férrico (FeCl_3) (Êxodo).

3.3 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

3.3.1 Procedimento Jar Test

Para simular a coagulação química em escala de bancada realizou-se o teste de jarro através do Aparelho de Jar Test (PoliControl, FlocControl) que é apresentado na Fotografia 1, visando melhorar o pH, a dosagem de coagulante e o tempo de sedimentação usado no processo.

Fotografia 1 – Foto do Aparelho de Jar Test utilizado no trabalho.



Fonte: Autor.

Foram preparadas amostras de 300 mL, nas quais inicialmente foi ajustado o pH à valores desejados utilizando soluções diluídas de H_2SO_4 (Alphatec) ou $Ca(OH)_2$ (Alphatec), e então adicionadas as dosagens de coagulantes. As amostras foram agitadas rapidamente pelo tempo de mistura rápida de 2 min à 300 rpm, e então agitadas lentamente pelo tempo de mistura lenta de 15 min à 60 rpm, de forma que a agitação não quebrasse os flocos. Após a floculação, a agitação foi interrompida para haver sedimentação por 1 h.

3.3.2 Dosagem mínima de coagulante

Uma amostra de 300 mL foi lentamente agitada em um béquer e foi adicionada a solução coagulante (10% m/v) em incrementos de 1 mL, até que fossem observadas as primeiras evidências de formação de floco, sendo a concentração adicionada considerada a dosagem mínima aproximada de coagulante. O mesmo procedimento foi realizado para ambos coagulantes, Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico.

3.3.3 Melhor pH de coagulação

Utilizando-se a dosagem mínima aproximada de coagulante, o procedimento de Jar Test foi aplicado para ambos os coagulantes utilizando valores de pH da solução de 6,0, 6,5, 7,0, 7,5, 8,0 e 8,5, sendo avaliadas as remoções de cor e turbidez.

3.3.4 Melhor dosagem de coagulante

O procedimento de Jar Test foi novamente aplicado para melhorar a dosagem de ambos os coagulantes na remoção de cor e turbidez. O coagulante foi adicionado a cada amostra, de modo que sua concentração variasse, sendo 50, 75, 100, 125, 150 e 175% da dosagem mínima, previamente determinada. Nestes testes foi aplicado o melhor pH para cada coagulante, determinado na etapa anterior.

3.3.5 Melhor tempo de sedimentação

Para verificar o melhor tempo de sedimentação foram aplicadas as condições previamente melhoradas de pH e concentração de coagulante em um procedimento de Jar Test, em que foram testados os tempos de sedimentação 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos na remoção de cor e turbidez.

Nesta etapa também foi realizada a filtração das amostras, visando simular o processo de filtração que ocorre em estações de tratamento. Após o procedimento de Jar Test as amostras foram submetidas à filtração através de um papel filtro, utilizando um funil de Büchner. Nesta etapa as determinações analíticas dos parâmetros resposta cor e turbidez foram realizadas nas amostras com e sem filtração.

3.4 DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS

O pH e a temperatura das amostras de água foram medidos através de um pHmetro de bancada (MS Tecnopon, MPA-210). Os coagulantes em pó foram pesados em uma balança analítica (Shimadzu, UX 6200 H) para serem preparadas as soluções coagulantes.

A cor foi determinada pelo método descrito no Standard Methods (APHA, 2005) que quantifica a cor na escala Platina-Cobalto (Pt-Co), medida em espectrofotômetro UV-Vis (Thermo Scientific, Evolution 201) em comprimento de onda de 455 nm. A turbidez foi determinada através de um turbidímetro (PoliControl, AP 2000 iR) e expressa em Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU).

A condutividade foi determinada utilizando um condutivímetro (Digimed, DM-32). Os sólidos totais (ST), voláteis (SV) e fixos (SF) foram analisados por métodos gravimétricos de acordo com o Standard Methods (APHA, 2005), onde os sólidos totais foram medidos a partir da pesagem de uma amostra seca por banho maria seguido de aquecimento na estufa por 1 hora, e os sólidos fixos e voláteis foram obtidos pela posterior calcinação e pesagem, sendo a massa restante os sólidos fixos e a massa calcinada os sólidos voláteis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA BRUTA

Na Tabela 1, são apresentadas as principais características físico-químicas da água bruta.

Tabela 1 – Características da água bruta.

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura	°C	20,3
pH	Escala Sörensen	7,3
Condutividade	$\mu\text{S cm}^{-1}$	73,4
Cor	mg Pt-Co L^{-1}	282,6
Turbidez	NTU	29,0
Sólidos totais	mg L^{-1}	350,0
Sólidos fixos	mg L^{-1}	76,0
Sólidos voláteis	mg L^{-1}	274,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de cor ($282,6 \text{ mg Pt-Co L}^{-1}$) e turbidez (29 NTU) mostram a necessidade de aplicação de um processo de tratamento antes da utilização da água para abastecimento público, visando atender os padrões estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 5 do MS (2017).

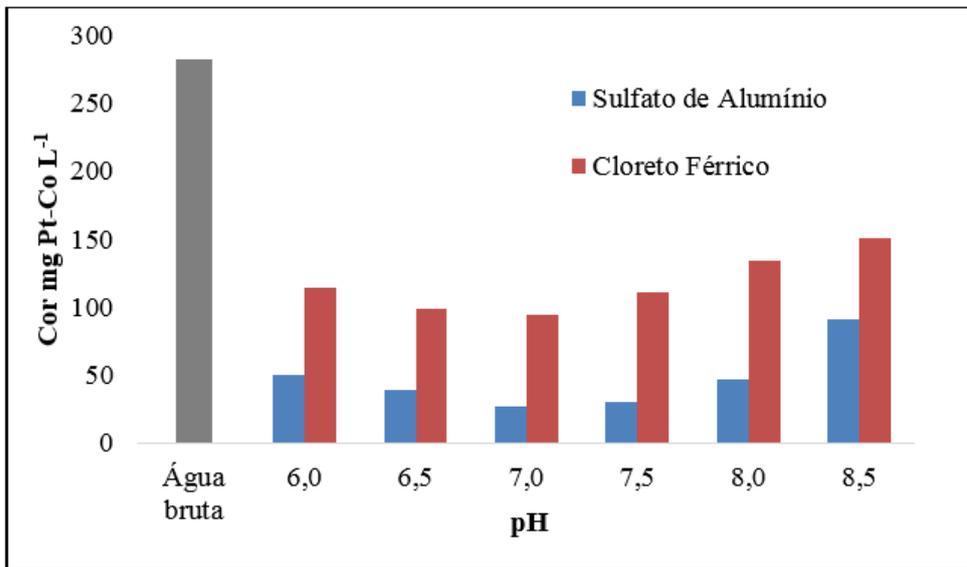
4.2 DOSAGEM MÍNIMA DE COAGULANTE

A partir da adição de pequenas alíquotas das soluções de coagulante (10% m/v), incrementos de 1 em 1 mL, foram obtidas as dosagens mínimas de 5,33 e 3,67 mg L^{-1} de Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico, respectivamente.

4.3 MELHOR pH DE COAGULAÇÃO

Nas Figuras 2 e 3, são apresentados os valores de cor e turbidez após a aplicação dos processos de coagulação, floculação e decantação em diferentes valores de pH, utilizando os coagulantes Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico.

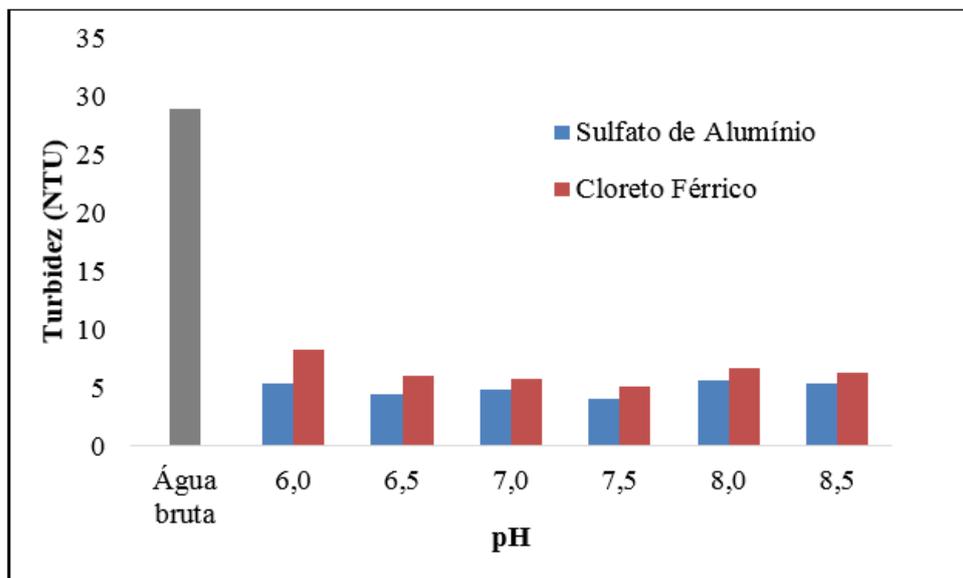
Figura 2 – Teste do melhor pH de coagulação com tempo de sedimentação de 1 h, para remoção de cor utilizando os coagulantes Sulfato de Alumínio ($5,33 \text{ mg L}^{-1}$) e Cloreto Férrico ($3,67 \text{ mg L}^{-1}$).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observou-se que o melhor valor de pH para ambos os coagulantes na remoção de cor situou-se próximo à 7. Para o coagulante Sulfato de Alumínio os menores valores de cor foram obtidos em pHs 7 e 7,5, com valores de 26,8 e 30,8 mg Pt-Co L⁻¹, respectivamente. Com o coagulante Cloreto Férrico as maiores reduções de cor foram obtidas com pHs 7 e 6,5, atingindo valores de 94,7 e 98,7 mg Pt-Co L⁻¹, respectivamente.

Figura 3 – Teste do melhor pH de coagulação com tempo de sedimentação de 1 h, para remoção de turbidez utilizando os coagulantes Sulfato de Alumínio ($5,33 \text{ mg L}^{-1}$) e Cloreto Férrico ($3,67 \text{ mg L}^{-1}$).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Empregando o coagulante Sulfato de Alumínio os menores valores de turbidez foram obtidos com pHs 7,5 e 6,5, com valores de 4,1 e 4,4 NTU, respectivamente. Com o coagulante Cloreto Férrico, os menores valores de turbidez foram obtidos com pHs 7,5 e 7,0, com valores de 5,1 e 5,8 NTU, respectivamente.

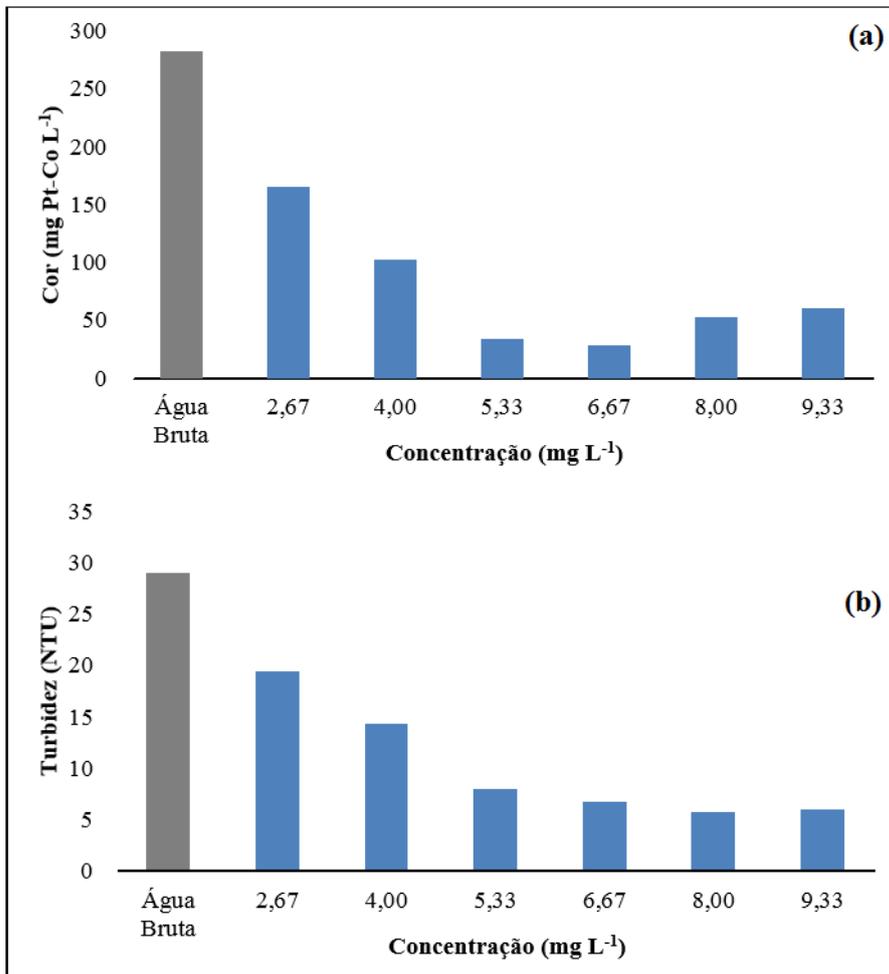
Como as maiores remoções de cor e turbidez, para ambos os coagulantes, ocorreram em uma faixa de pH próxima ao pH da água bruta (7,3), este valor foi adotado como pH ótimo para os testes seguintes.

Autores reportam que as melhores eficiências de clarificação de água por coagulação/floculação ocorrem em faixa de pH entre 6,5 e 7,5, para o coagulante Sulfato de Alumínio e em faixa de pH entre 6,0 e 7,5 para o coagulante Cloreto Férrico (PAVANELLI, 2001; SANTOS, 2011).

4.4 MELHOR DOSAGEM DE COAGULANTE

A melhor dosagem do coagulante Sulfato de Alumínio para o processo de coagulação/floculação na clarificação de água é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Teste da melhor concentração do coagulante Sulfato de Alumínio, com pH 7,3 e 1 h de sedimentação, para remoção de (a) cor e (b) turbidez.



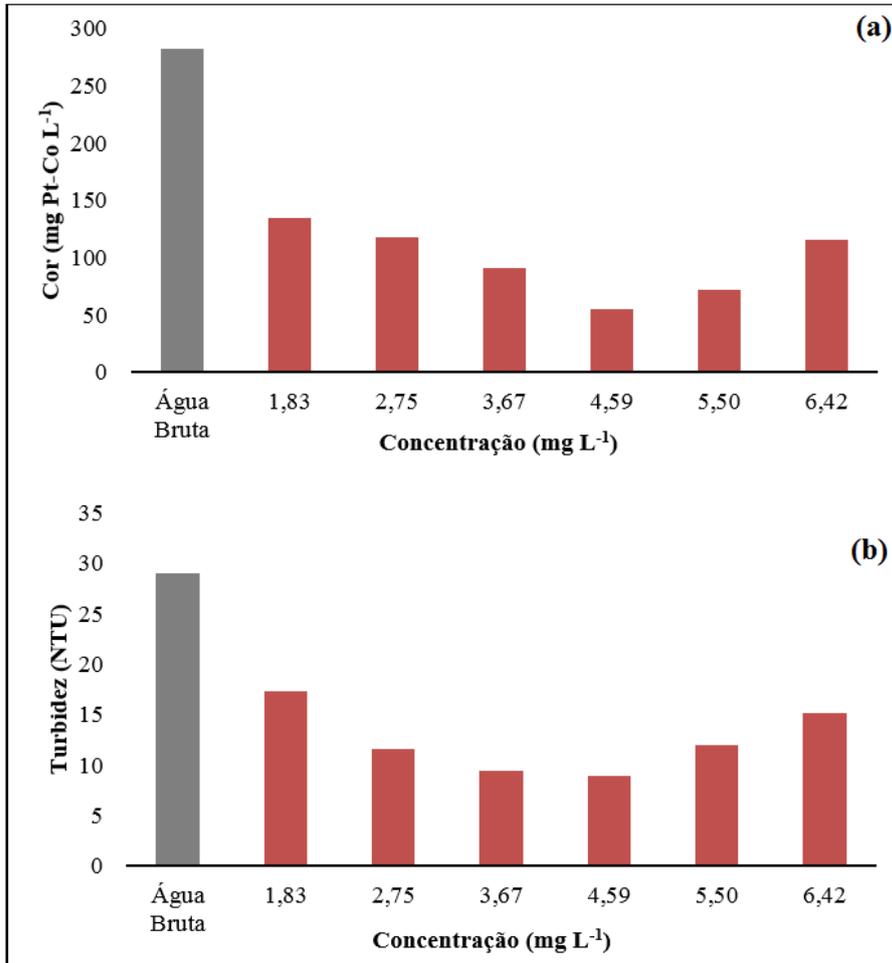
Fonte: Elaborada pelo autor.

As maiores remoções de cor pelo coagulante Sulfato de Alumínio foram observadas com concentrações do coagulante Sulfato de Alumínio de 6,67 e 5,33 mg L⁻¹, atingindo valores de 28,8 e 33,9 mg Pt-Co L⁻¹, respectivamente (Fig. 4a). Para o parâmetro turbidez os menores valores foram atingidos em concentrações de 6,67, 8,00 e 9,33 mg L⁻¹ de Sulfato de Alumínio, atingindo valores de 6,8, 5,8 e 6,0 NTU, respectivamente (Fig. 4b).

Baseado nestes resultados a concentração ótima do coagulante Sulfato de Alumínio adotada foi de 6,67 mg L⁻¹, pois ocorreu uma das maiores reduções de cor e turbidez nesta concentração. Para a o parâmetro turbidez especificamente, houve reduções maiores em concentrações maiores de coagulante, no entanto, por questões de custos e de evitar o excesso de coagulante utilizou-se a concentração menor de 6,67 mg L⁻¹.

Na Figura 5 é apresentada a melhor dosagem do coagulante Cloreto Férrico para o processo de coagulação/floculação na clarificação de água.

Figura 5 – Teste da melhor concentração do coagulante Cloreto Férrico, com pH 7,3 e 1 h de sedimentação, para remoção de (a) cor e (b) turbidez.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Empregando o coagulante Cloreto Férrico, os menores valores de cor foram obtidos com as concentrações de 4,59 e 5,50 mg L⁻¹, atingindo 55,5 e 72,2 mg Pt-Co L⁻¹, respectivamente. Para o parâmetro turbidez, as melhores dosagens observadas foram de 3,67 e 4,59 mg L⁻¹, com valores finais de 9,4 e 9,0 NTU, respectivamente.

A concentração ótima do coagulante Cloreto Férrico observada na remoção de ambos os parâmetros foi de 4,59 mg L⁻¹.

De acordo com Richter (2009), a melhor dosagem de coagulante para a clarificação de água bruta é influenciada por uma série de fatores, com destaque para a natureza e tamanho dos coloides presentes na água, concentração de poluentes e tipo de coagulante. Libânio (2010)

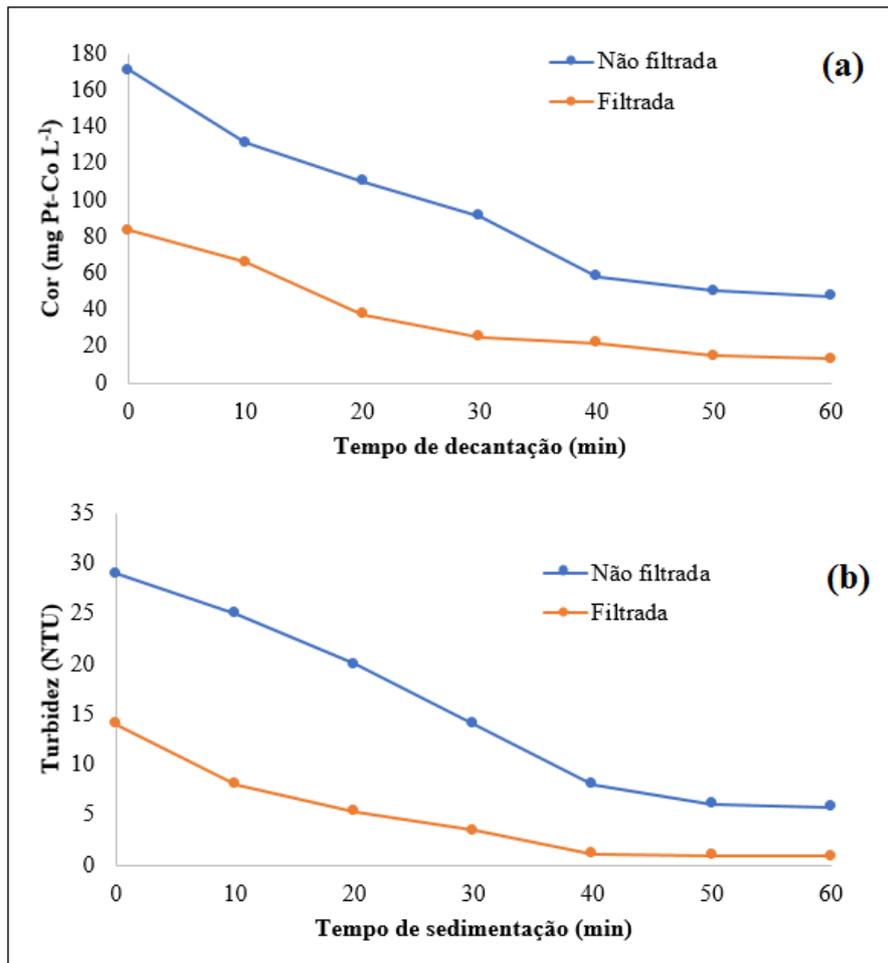
reporta que a dosagem de coagulante precisa ser melhorada sempre que as características da água sofrerem uma variação, sendo que esta usualmente varia de 10 a 60 mg L⁻¹ para Sulfato de Alumínio e de 4 a 60 mg L⁻¹ para Cloreto Férrico.

4.5 MELHOR TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO

Para os testes do melhor tempo de sedimentação, como etapa final do processo estudado, foi realizada adicionalmente a filtração das amostras.

As reduções de cor e turbidez ao longo do tempo de sedimentação utilizando Sulfato de Alumínio em pH 7,3 e concentração de coagulante de 6,67 mg L⁻¹, para as amostras filtradas e não filtradas, são apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Teste do melhor tempo de sedimentação utilizando o coagulante Sulfato de Alumínio para remoção de (a) cor e (b) turbidez.

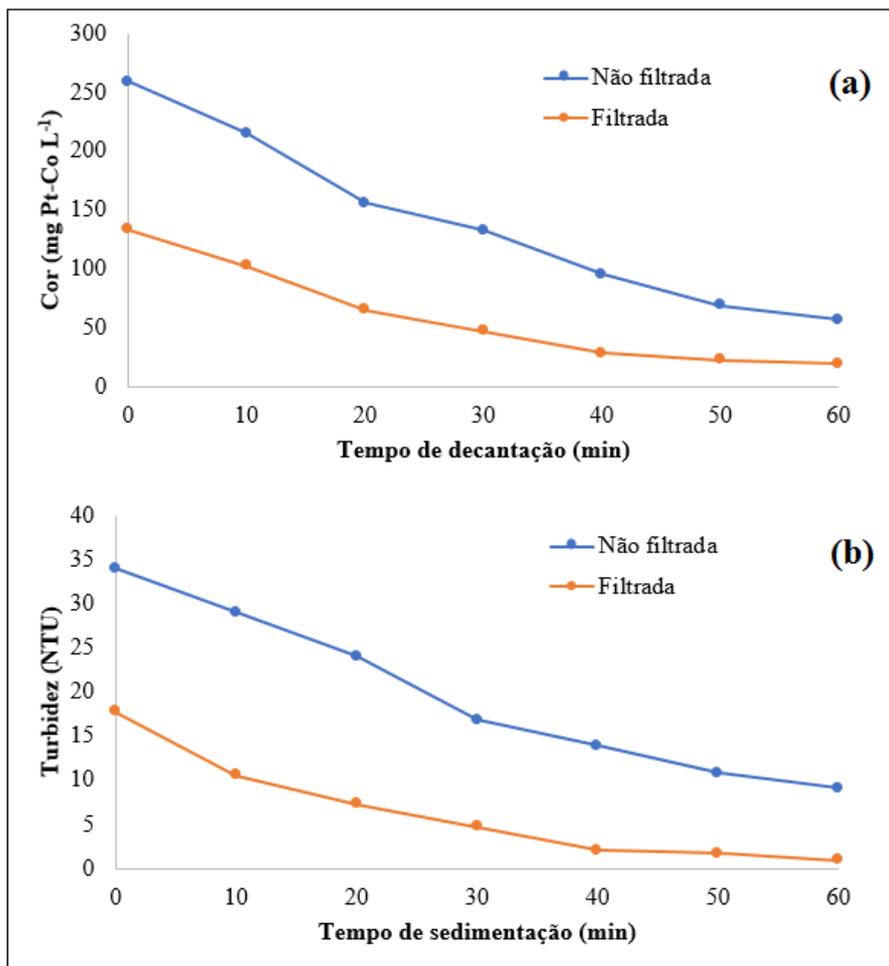


Fonte: Elaborada pelo autor.

Observou-se uma significativa redução de cor e turbidez em tempos de sedimentação até aproximadamente 50 min, atingindo valores finais (com filtração) de 14,6 mg Pt-Co L⁻¹ de cor e 0,95 NTU de turbidez. Estes valores encontram-se já em conformidade com a Portaria de Consolidação MS nº 5 de 2017 (Seção 2.2.2). No entanto, os melhores resultados foram obtidos com tempo de sedimentação de 60 min, com valores finais de 13,2 mg Pt-Co L⁻¹ de cor e 0,87 NTU de turbidez.

Utilizando Cloreto Férrico, em pH 7,3 e concentração de coagulante de 4,59 mg L⁻¹, foram obtidas, ao longo do tempo de sedimentação, as reduções de cor e turbidez expressas na Figura 7.

Figura 7 – Teste do melhor tempo de sedimentação utilizando o coagulante Cloreto Férrico para remoção de (a) cor e (b) turbidez.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi observada uma redução significativa da cor filtrada até o tempo de 40 min, no entanto, os melhores resultados de clarificação foram obtidos em 60 min de sedimentação

atingindo valores finais de 18,9 mg Pt-Co L⁻¹ de cor e 0,94 NTU de turbidez. O valor de turbidez está em conformidade com os padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação, enquanto o valor de cor não atendeu ao limite máximo estabelecido pela Portaria de Consolidação MS nº 5 de 2017, que é de 15 mg Pt-Co L⁻¹ (Seção 2.2.2).

De acordo com Libânio (2010), a decantação é fundamental no tratamento por coagulação/floculação pois durante esta etapa ainda ocorre a formação de flocos, além de reduzir a possibilidade de ruptura de flocos e saturação de filtros durante a filtração. A presença maior de cor e turbidez nas amostras filtradas, para ambos coagulantes, em tempos de sedimentação menores pode estar relacionada à formação e decantação de flocos ao longo do tempo de sedimentação e à ruptura de uma parcela dos flocos presentes na água durante a filtração.

Para ambos os coagulantes adotou-se o tempo de 60 min como melhor condição operacional.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA TRATADA

As características da água tratada, nas melhores condições operacionais, utilizando os coagulantes Sulfato de Alumínio e Cloreto Férricos são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Características da água tratada utilizando o coagulante Sulfato de Alumínio (6,67 mg L⁻¹), pH 7,3 e 60 min de sedimentação.

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura	°C	20,5
pH	Escala Sörensen	7,3
Condutividade	µS cm ⁻¹	58,4
Cor	mg Pt-Co L ⁻¹	13,2
Turbidez	NTU	0,87
Sólidos totais	mg L ⁻¹	115,2
Sólidos fixos	mg L ⁻¹	14,3
Sólidos voláteis	mg L ⁻¹	100,9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Características da água tratada utilizando o coagulante Cloreto Férrico ($4,59 \text{ mg L}^{-1}$), pH 7,1 e 60 min de sedimentação.

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura	°C	20,6
pH	Escala Sörensen	7,1
Condutividade	$\mu\text{S cm}^{-1}$	62,3
Cor	mg Pt-Co L^{-1}	18,9
Turbidez	NTU	0,94
Sólidos totais	mg L^{-1}	142,4
Sólidos fixos	mg L^{-1}	33,2
Sólidos voláteis	mg L^{-1}	109,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar significativas reduções dos parâmetros analisados após a aplicação do processo convencional de tratamento de água com os coagulantes testados. Foram obtidas reduções dos parâmetros cor, turbidez, sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis de 95,3, 97,0, 67,1, 81,2, 63,2 %, respectivamente, com o coagulante Sulfato de Alumínio e 93,3, 96,8 59,3, 56,3, 60,1 %, respectivamente, utilizando o coagulante Cloreto Férrico.

5 CONCLUSÃO

Através deste trabalho foi possível determinar as melhores condições operacionais de pH, concentração de coagulante e tempo de sedimentação do processo convencional de tratamento de água com fins de abastecimento público para os coagulantes Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico.

As melhores condições obtidas foram de pH 7,3, concentração de coagulante de 6,67 mg L⁻¹ e tempo de sedimentação de 60 min, para o Sulfato de Alumínio, e pH 7,1, concentração de coagulante de 4,59 mg L⁻¹ e tempo de sedimentação de 60 min, para o Cloreto Férrico. Foram atingidos valores finais de cor e turbidez de 13,2 mg Pt-Co L⁻¹ e 0,87 NTU, respectivamente, com o coagulante Sulfato de Alumínio e 18,9 mg Pt-Co L⁻¹ e 0,94 NTU, respectivamente, com o coagulante Cloreto Férrico. Dos parâmetros analisados, apenas o parâmetro cor da água tratada utilizando Cloreto Férrico não atendeu os padrões de potabilidade da legislação vigente.

Desta forma foi possível observar que o processo convencional de tratamento de água, envolvendo coagulação, floculação e decantação, possui eficiência satisfatória no tratamento de água de manancial superficial nos parâmetros avaliados. Também foi concluído que a água do Rio Encantado possui potencial de utilização para consumo humano, e mediante tratamento adequado e devidamente melhorado, se torna uma fonte alternativa para suprir eventuais carências de abastecimento público.

REFERÊNCIAS

- APHA (American Public Health Association); AWWA (American Water Works Association); WEF (Water Environment Federation). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21ª Ed. Washington – DC: APHA, 2005.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 9898: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1992.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357**, de 17 de março de 2005.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação Nº 5**, de 28 de setembro de 2017.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**, 2ª edição, São Carlos: RiMa, 2005. 792 p.
- JARDIM, W. F.; CANELA, M. C. **Caderno Temático: Fundamentos da Oxidação Química no Tratamento de Efluentes e Remediação de Solos**. IQ/Unicamp, UENF/RJ, 2004.
- LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3ª edição. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010.
- PAVANELLI, Gerson. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada**. 2001. 233 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.
- REALI, M. A. P.; PAZ, L. P. S.; DANIEL, L.A. In: CUNHA, D. G.F.; CALIJURI, M. C. (Org.). **Tratamento de Água para Consumo Humano**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier-Campus, 2012, v. 1, p. 405-453.
- RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009.
- RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. DE A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Blucher, 1991.
- SANTOS, Gabriel Rosa. **Estudo de Clarificação de Água de Abastecimento Público e Otimização da Estação de Tratamento de Água**. 2011. 101 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2011.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.