



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO DAS VELHAS CONSIDERANDO
UM HIPOTÉTICO ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE REJEITO DE
MINERAÇÃO DE FERRO E ADEQUAÇÃO AOS PARÂMETROS DE
QUALIDADE DA ÁGUA**

Leticia Ferreira Rodrigues

Belo Horizonte

2022

Leticia Ferreira Rodrigues

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO DAS VELHAS CONSIDERANDO
UM HIPOTÉTICO ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE REJEITO DE
MINERAÇÃO DE FERRO E ADEQUAÇÃO AOS PARÂMETROS DE
QUALIDADE DA ÁGUA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Prof. M.Sc. Túlio César Floripes Gonçalves

Belo Horizonte

2022

LETICIA FERREIRA RODRIGUES

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO DAS VELHAS CONSIDERANDO
UM HIPOTÉTICO ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE REJEITO DE
MINERAÇÃO DE FERRO E ADEQUAÇÃO AOS PARÂMETROS DE
QUALIDADE DA ÁGUA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 07 de fevereiro de 2022.

Banca examinadora:




Túlio César Floripes Gonçalves – Presidente da Banca Examinadora
Prof. M.Sc. – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientador



Flávia Fernanda Matos de Araújo Gomes
Especialista - VALE S.A. – Coorientadora



Clarisse de Oliveira Carmo
Prof.^a M.Sc. – Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da
Universidade Federal de Ouro Preto



Pâmela Becalli Vilela
Prof.^a M.Sc. – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por me capacitar a redigir e executar este trabalho, além de mover em meu favor para que tudo desse certo.

Ao meu professor e orientador Túlio Floripes, pelo apoio, ensinamentos, disposição e pontuações.

Aos demais professores do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, por todos os ensinamentos decorridos durante o curso.

A minha querida coorientadora, Flávia Gomes, pela disposição, apoio e auxílio.

A todos os meus colegas de trabalho da Gerência de Riscos e Emergência, em especial à Coordenação de Implantação de Obras Integridade, o apoio e a colaboração de vocês foram fundamentais para a execução deste trabalho.

As minhas amigas e companheiras de faculdade, Audrey, Isabela, Letícia e Maria Luiza por todo incentivo e parceria.

Aos meus pais, Lauro e Simone, e minhas avós, Helena e Mariles, que sempre me incentivaram a continuar e nunca desistir dos meus sonhos.

Por fim, agradeço ao meu amor, Miguel, que foi o meu alicerce nos dias difíceis.

RESUMO

RODRIGUES, L. F. **Análise da Qualidade da Água do Rio das Velhas Considerando um Hipotético Rompimento de Barragem de Mineração de Ferro e Adequação aos Parâmetros de Qualidade da Água.** 2022. 67p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

Sabe-se que a mineração é uma atividade essencial, pois além de contribuir para a economia, através dela são disponibilizados os insumos minerais necessários à cadeia produtiva de diversos setores da indústria mundial. Associado a essa atividade, estão as estruturas construídas para fins de contenção dos rejeitos oriundos do beneficiamento do minério de ferro, as chamadas barragens, das quais também podem possuir outras finalidades como o armazenamento da água, controle de picos de vazão e geração de energia elétrica. Caso haja um rompimento dessas estruturas, além dos diversos impactos causados ao meio ambiente, prejudicaria o abastecimento e uso da água nas regiões afetadas. Portanto, este estudo teve como objetivo analisar a qualidade da água do Rio das Velhas, considerando um hipotético rompimento de barragem e propor um tratamento para águas supostamente contaminadas por rejeito de mineração de ferro, fazendo o uso de coagulantes naturais e industrializados e visando o enquadramento do corpo hídrico para fins de tratamento de água para consumo humano. Foi analisado o *Dam Break* de uma barragem localizada no município de Nova Lima – MG e, através dele observou-se o possível impacto negativo causado ao abastecimento de água da região. Em seguida, foram realizadas análises da qualidade da água do Rio das Velhas antes e após o suposto rompimento, onde constatou-se que a presença dos rejeitos à água altera consideravelmente alguns parâmetros como turbidez, cor verdadeira, sólidos dissolvidos totais, fósforo, ferro e manganês. Para o tratamento, foram realizados dois testes de jarros, o primeiro, utilizando o coagulante *Tanfloc SG*, de origem natural, em diferentes concentrações, onde obteve-se 58%, 67% e 72% de eficiência na remoção de turbidez. Já para o segundo teste, realizado após a ação do coagulante *Tanfloc SG* no primeiro teste, utilizou-se os coagulantes de origem industrial Policloreto de Alumínio, Sulfato Ferroso, Cloreto Férrico e, novamente, *Tanfloc SG*, e obteve-se remoções de 16%, 35%, 82% e 65%, respectivamente. Após comparar os resultados obtidos, observou-se que a junção dos coagulantes *Tanfloc SG* e Cloreto Férrico foi a mais eficiente em relação a remoção de turbidez e sólidos. Porém, para enquadramento às legislações vigentes, faz-se necessária a

adição de etapas complementares ao tratamento visando, principalmente, a remoção dos metais Ferro e Manganês que continuaram a apresentar concentrações acima dos valores máximos permitidos de acordo com as legislações vigentes.

Palavras-chave: Mineração; Rejeitos; Tratamento de Água; Coagulação.

ABSTRACT

FERREIRA RODRIGUES, LETICIA. **Water Quality Analysis of Rio das Velhas Considering a Hypothetical Iron Mining Dam Failure and Adequacy to Water Quality Parameters.** 2022. 67p. Undergraduate thesis (Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

It is known that mining is an essential activity, because in addition to contributing to the economy, through it the mineral inputs necessary for the production chain of various sectors of the world industry are made available. Associated with this activity are the structures built to contain tailings from iron ore processing, the so-called dams, which may also have other purposes such as water storage, flow peak control and electricity generation. . If there is a rupture of these structures, in addition to the various impacts caused to the environment, it would harm the supply and use of water in the affected regions. Therefore, this study aimed to analyze the water quality of Rio das Velhas, considering a hypothetical dam failure and to propose a treatment for water supposedly contaminated by iron mining tailings, using natural and industrialized coagulants and aiming at the framing of the water body for the purpose of treating water for human consumption. The Dam Break of a dam located in the municipality of Nova Lima - MG was analyzed and, through it, the possible negative impact caused to the water supply in the region was observed. Then, analyzes of the water quality of the Rio das Velhas were carried out before and after the alleged rupture, where it was found that the presence of tailings in the water considerably alters some parameters such as turbidity, true color, total dissolved solids, phosphorus, iron and manganese. For the treatment, two jar tests were carried out, the first one, using the Tanfloc SG coagulant, of natural origin, in different concentrations, where it was obtained 58%, 67% and 72% of efficiency in the removal of turbidity. For the second test, performed after the action of the Tanfloc SG coagulant in the first test, the industrial origin coagulants Aluminum Polychloride, Ferrous Sulfate, Ferric Chloride and, again, Tanfloc SG were used, and removals of 16% were obtained. , 35%, 82% and 65%, respectively. After comparing the results obtained, it was observed that the combination of the coagulants Tanfloc SG and Ferric Chloride was the most efficient in terms of removing turbidity and solids. However, in order to comply with current legislation, it is necessary to add additional steps to the treatment, mainly aiming at the removal of Iron and

Manganese metals that continued to present concentrations above the maximum values allowed according to current legislation.

Keywords: Mining; Waste; Water treatment; Coagulation.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	OBJETIVOS	17
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1.	Barragens de Mineração	18
3.2.	O Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração - PAEBM	20
3.3.	Caracterização dos Rejeitos de Mineração de Ferro	22
3.4.	Impactos Provenientes da Contaminação de Água por Rejeitos da Mineração de Ferro	23
3.5.	Legislações Vigentes para o Tratamento e Abastecimento de Água	25
3.6.	Técnicas Convencionais para o Tratamento de Água	28
3.7.	Coagulação	33
3.7.1.	<i>Sulfato de Alumínio</i>	33
3.7.2.	<i>Cloreto Férrico</i>	34
3.7.3.	<i>Policloreto de Alumínio</i>	34
3.7.4.	<i>Sulfato Ferroso</i>	34
3.8.	Polímeros Naturais Utilizados na Coagulação	35
3.8.1.	<i>Tanfloc SG</i>	35
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1.	Área de Estudo	37
4.2.	Barragem e Dam Break	38
4.3.	Análises da Qualidade da Água	39
4.4.	Etapas Utilizadas para o Tratamento de Água	43
5.	RESULTADOS	46
5.1.	Análise do Dam Break	46
5.2.	Resultados das Ações dos Coagulantes Utilizados – Testes de Jarros	47
5.2.1.	<i>Primeiro Teste de Jarros</i>	47
5.2.2.	<i>Segundo Teste de Jarros</i>	49
5.3.	Resultados das Análises da Qualidade da Água	51
5.3.1.	<i>Comparação entre as amostras A001 e A002</i>	52
5.3.2.	<i>Comparação entre as amostras A002 e A003</i>	53
5.4.	Discussões em Relação ao Tratamento de Água e Enquadramento às Legislações	54

5.4.1. <i>Enquadramento aos Padrões de Lançamento Estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005</i>	54
5.4.2. <i>Enquadramento aos Padrões Estabelecidos pela Portaria N° 888/2021</i>	56
6. CONCLUSÃO	59
7. RECOMENDAÇÕES	60
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Métodos Construtivos para as Barragens de Rejeito.	19
Figura 3.2 - Classificação das Barragens do Brasil por Níveis de Emergência.	22
Figura 3.3 - Processo de Coagulação.....	29
Figura 3.4 - Floculador Hidráulico de Fluxo Horizontal.....	30
Figura 3.5 - Floculador Hidráulico de Fluxo Vertical.....	30
Figura 3.6 - Decantador de Fluxo Horizontal.....	31
Figura 3.7 - Sentidos da Filtração.....	32
Figura 4.1 - Limite do Município de Nova Lima - MG.	37
Figura 4.2 - Barragem de Rejeitos Localizada no Município de Nova Lima - MG.....	39
Figura 4.3 - Aspecto do Rio das Velhas no dia da Coleta.	40
Figura 4.4 - Aspecto do Rejeito de Minério de Ferro na Sessão C da Barragem.....	41
Figura 4.5 - Aspecto do Rejeito de Minério de Ferro na Sessão D da Barragem	42
Figura 4.6 - Primeiro Teste de Jarros.	44
Figura 4.7 - Segundo Teste de Jarros.	45
Figura 5.1 - Localização da ETA Bela Fama e Mancha de Inundação.	46
Figura 5.2 - Resultado do Primeiro Teste de Jarros.	48
Figura 5.3 - Resultado do Segundo Teste de Jarros.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros Orgânicos e Inorgânicos de Potabilidade, Portaria Nº 888/2021.	26
Tabela 3.2 - Parâmetros Orgânicos e Inorgânicos de Potabilidade CONAMA Nº 357/2005.	28
Tabela 5.1 - Eficiência de Remoção de Turbidez Após o Primeiro Teste de Jarros.	48
Tabela 5.2 – Eficiência de Remoção de Turbidez Após o Segundo Teste de Jarros.....	51
Tabela 5.3 - Resultado das Análises da Qualidade da Água.	52
Tabela 5.4 - Comparação dos Resultados Obtidos Através da Análise da Amostra A003 e os Padrões de Lançamento Estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 357/2005.....	55
Tabela 5.5 - Comparação dos Resultados Obtidos Através da Análise da Amostra A003 e os Padrões de Potabilidade Estabelecidos pela Portaria Nº 888/2021.	57

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA	Agência Nacional das Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DN	Deliberação Normativa
ETA	Estação de Tratamento de Água
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MME	Ministério das Minas e Energia
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
PAEBM	Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
PH	Potencial Hidrogeniônico
ZAS	Zona de Altossalvamento
ZSS	Zona de Segurança Secundária

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade considerada essencial pelo Ministério das Minas e Energia (MME), no que tange ao Decreto Nº 10.282 de 20 de março de 2020, pois é através dela que são disponibilizados os insumos minerais necessários à cadeia produtiva de diversos setores da indústria mundial. Devido ao desenvolvimento industrial, desencadeado através da Revolução Industrial do século XX, cada vez mais a atividade minerária faz parte do cotidiano, sendo praticamente impossível imaginar o mundo de hoje sem a mineração, haja vista que o minério de ferro, por sua vez, é um dos recursos mais presentes em dia a dia.

O Brasil tem uma produção aproximada a 400 milhões de toneladas de minério de ferro por ano, sendo o segundo maior produtor de ferro do mundo (GANDRA, 2022). Nesse sentido, a produção do minério de ferro é feita em duas etapas, quais sejam, a extração e o beneficiamento. A primeira fase, se refere à retirada do minério de ferro através da perfuração ou desmonte das rochas. Já a segunda, consiste na aplicação de técnicas visando modificar a granulometria e/ou a concentração das espécies minerais presentes na amostra beneficiada (VALE, 2020). No tratamento do minério de ferro a seco, não há a necessidade de adicionar água para processar o minério extraído, dispensando a construção de barragens de rejeito. Porém, no tratamento a úmido, as barragens de rejeito são peças-chaves no processo produtivo do minério de ferro.

Para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, as barragens são estruturas construídas em um curso permanente ou temporário de água e, em sua maioria, armazenam rejeitos provenientes da mineração (SILVA e SILVA, 2020). Tais estruturas começaram a ser construídas a partir da década de 1930, com o objetivo de evitar que os rejeitos oriundos da mineração fossem lançados diretamente nos cursos d'água (CBDB, 2011).

A rigorosidade e a preocupação acerca dos projetos para construção e manutenção das barragens de mineração no Brasil estão cada vez maiores, tendo em vista, os desastres que já aconteceram no país envolvendo essas estruturas, como o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, em Mariana – MG, no ano de 2015, e a barragem de rejeitos da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho – MG, cinco anos depois, em 2020.

O rompimento de barragens de rejeitos pode causar danos intensos e extensos aos municípios atingidos, tanto no tempo quanto no espaço. Tais danos podem ser constatados nos âmbitos

sociais, ambientais, materiais e morais. Entre os impactos ambientais, relacionados à contaminação de um curso d'água por rejeitos de mineração de ferro, pode-se citar alterações nas concentrações de metais e aumento da turbidez no meio hídrico, tendo em vista, que grande parte dos rejeitos é composta por areia, fortemente enriquecida em quartzo, e pelos minerais óxidos e hidróxidos de ferro que não foram segregados durante o beneficiamento (QUEIROZ, 2020). Logo, a contaminação de um corpo hídrico por rejeitos provenientes da mineração de ferro, prejudica o abastecimento de água para o consumo humano, a dessedentação de animais, os ecossistemas, a fauna e a flora, além dos prejuízos socioeconômicos (ANA, 2015).

Buscando minimizar os impactos provenientes de um rompimento de barragem, o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM, conta com uma seção que propõe alternativas e diretrizes relacionadas ao abastecimento de água para os municípios que, porventura, sejam afetados por um rompimento de barragem de mineração. Tais medidas devem ser realizadas pelo empreendedor responsável por cada barramento, a fim de garantir o abastecimento de água para as comunidades afetadas pelo rompimento. Além disso, o PAEBM contém o estudo de *Dam Break*, instrumento no qual auxilia na avaliação dos potenciais danos e impactos oriundos de um rompimento de barragem e à criação de planos de ações emergenciais, através da análise do mapa de inundação (GEOESTÁVEL, 2022).

O tratamento de água é um conjunto de procedimentos físicos, químicos e/ou biológicos aplicados à água para que esta fique em condições adequadas para o consumo (FUSATI, 2021). Como primeira etapa do tratamento de água, têm-se a coagulação, processo físico-químico em que a substância coagulante adicionada à água proporciona à formação de coágulos, através de uma mistura rápida, possibilitando a desestabilização das partículas coloidais e em suspensão (ROSCHILD, 2021). Nesta etapa, a escolha do coagulante afeta diretamente os resultados obtidos. Vale ressaltar, que os coagulantes naturais apresentam algumas vantagens em relação aos coagulantes químicos, devido a sua biodegradabilidade e por serem atóxicos (KAWAMURA, 1991).

Diante desse cenário, torna-se fundamental o estudo de métodos que visem o tratamento dos corpos hídricos contaminados por rejeitos de mineração de ferro, a fim de garantir o abastecimento e uso da água. Portanto, o presente estudo visa analisar a qualidade da água do Rio das Velhas, após sua suposta contaminação por rejeito de mineração de ferro e propor um

tratamento fazendo o uso de coagulante natural e industrializado, visando a remoção de turbidez e o enquadramento do corpo hídrico para atendimento às legislações vigentes.

O estudo foi realizado considerando o *Dam Break* de uma barragem localizada no município de Nova Lima - MG e a possível contaminação do Sistema de Abastecimento de Água do Rio das Velhas, após um hipotético colapso dessa estrutura.

2. OBJETIVOS

O objetivo central desse trabalho é analisar a qualidade da água do Rio das Velhas, após sua suposta contaminação por rejeito de mineração de ferro e propor um tratamento fazendo o uso de coagulante natural e industrializado, visando a remoção de turbidez e o enquadramento do corpo hídrico para atendimento às legislações vigentes.

De forma a sustentar o objetivo central do trabalho, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o estudo de *Dam Break* de uma barragem de rejeito de mineração de ferro localizada no município de Nova Lima – MG, a fim de verificar os possíveis impactos causados ao abastecimento de água da região, considerando sua Estação de Tratamento de Água e o corpo hídrico de onde é feita sua captação superficial.
- Analisar o atendimento aos padrões de enquadramento de águas superficiais após o tratamento de água contaminada por um hipotético rompimento de barragem de rejeito de mineração de ferro, através de uso de coagulante natural e industrializado.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Barragens de Mineração

Consideradas como as maiores estruturas geotécnicas construídas pelo homem, as barragens apresentam diversas funcionalidades, como o armazenamento de água, controle de picos de vazões, contenção de rejeitos, geração de energia elétrica, entre outros (CARDOSO; PIMENTA; ZINGANO, 2016). Diferenciando-se das barragens convencionais, cujo objetivo é o barramento de água, as barragens de rejeito são estruturas construídas para conter os materiais resultantes do beneficiamento do minério, sendo executadas em etapas, na medida em que surgem os rejeitos, diminuindo custos da construção e operação (DUARTE, 2008). Tais rejeitos podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares), até solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas) (ARAÚJO, 2006). Kossoff *et al.* (2014) definem os rejeitos como a mistura de rocha cominuída e os fluidos do processo de beneficiamento. Logo, apresentam como característica física, granulometria fina e forma angular (KOSSOFF *et al.*, 2014). Sua composição química depende da composição da rocha de origem e dos reagentes utilizados no processo.

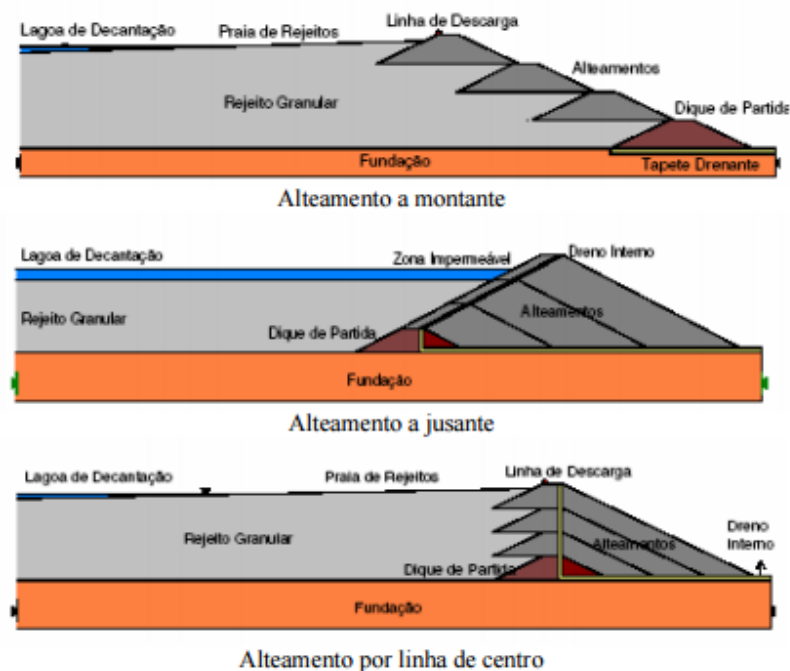
Atualmente, identificam-se três métodos para a construção das barragens de rejeito: montante, jusante ou linha de centro. Estes métodos fazem referência à técnica e à direção do alteamento empregado (CARDOZO e RUVIER, 2019). Entre os métodos citados, o alteamento a montante é considerado o mais simples e de baixo custo, porém associado à maioria dos casos de ruptura de barragens de rejeito por todo o mundo. Sua construção inicia-se com um dique inicial utilizado como aterro compactado ou enrocamento. O rejeito é descarregado hidráulicamente, desde a parte mais alta (crista) do dique de partida, formando uma praia de rejeito que será adensada e servirá como fundação, fornecendo material para futuros diques de alteamento a serem construídos a partir do material dos rejeitos (GAZOLLA, 2019).

Já o método de alteamento na linha de centro, comparado com o método a montante, possui maior estabilidade. Sua construção se dá a partir de um dique de partida, a fim de formar a praia de rejeitos a montante (GAZOLLA, 2019). No que diz respeito a disposição de rejeitos, o lançamento é feito a partir da crista do dique inicial, o que acarreta mais uma semelhança ao método de alteamento a montante. De acordo com Gazolla (2019), quando é preciso fazer novos alteamentos, são construídos novos diques, tanto sobre os rejeitos a montante quanto sobre o

aterro do dique anterior, mantendo o eixo de simetria inalterado. Quanto aos custos, o método linha de centro é considerado de custo intermediário.

Por fim, o método de construção de barragens de rejeito denominado a jusante, foi desenvolvido para reduzir os riscos de liquefação em zonas de atividade sísmica, sendo assim, é o mais conservador entre os métodos. Para este método, também se faz necessária a construção do dique de partida e os rejeitos são depositados a montante dele. Porém, a medida em que as bordas livres são ocupadas, ocorrem sucessivos alteamentos a jusante. Este método possui um custo relativamente alto, comparado aos métodos citados anteriormente (GAZOLLA, 2019). A Figura 3.1 apresenta a esquematização dos métodos construtivos de barragens de rejeito, alteamento a montante, alteamento a jusante e alteamento por linha de centro.

Figura 3.1 - Métodos Construtivos para as Barragens de Rejeito.



Fonte: Gazolla (2019).

Os métodos de alteamento e construção de uma barragem de rejeitos não definem sua segurança e estabilidade. Como qualquer obra de engenharia, as barragens de rejeitos estão suscetíveis a ocorrência de danos em sua estrutura. Tais danos podem ser oriundos de interferências naturais, como os abalos sísmicos, ou até mesmo provenientes de falhas em sua construção. Vale destacar, que os erros e imprecisões ocorridos em barragens de contenção de rejeitos custaram vidas e causaram consideráveis danos ambientais. Acidentes graves resultaram em grandes

volumes de rejeitos descarregados no meio ambiente, causando à contaminação dos cursos d'água que receberam seu conteúdo.

A segurança de uma barragem, se dá devido aos monitoramentos, inspeções e auditorias a fim de garantir suas condições físicas e estruturais (VALE, 2020). Como exemplo, em Minas Gerais, região conhecida pela grande influência do setor minerário, a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) realiza um trabalho de cadastramento e classificação das barragens seguindo parâmetros da Deliberação Normativa (DN) 62 (COPAM, 2002), que foi alterada pela DN 87 (COPAM, 2005) e pela DN 113 (COPAM, 2007). A classificação indicada nestas deliberações estabelece classes de potencial de dano ambiental, estimando as consequências em relação ao dano ambiental em caso de uma ruptura.

3.2. O Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração - PAEBM

A Lei N° 12.334/2010, que atualmente foi alterada pela Lei 14.066/2020, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Esta lei estabelece algumas definições, como:

Barragem: qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

Empreendedor: pessoa física ou jurídica que detenha outorga, licença, registro, concessão, autorização ou outro ato que lhe confira direito de operação da barragem e do respectivo reservatório, ou, subsidiariamente, aquele com direito real sobre as terras onde a barragem se localize, se não houver quem os explore oficialmente.

Dano potencial associado à barragem: dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, a ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e os impactos sociais, econômicos e ambientais.

Zona de Autossalvamento (ZAS): trecho do vale a jusante da barragem em que não haja tempo suficiente para intervenção da autoridade competente em situação de emergência, conforme mapa de inundação;

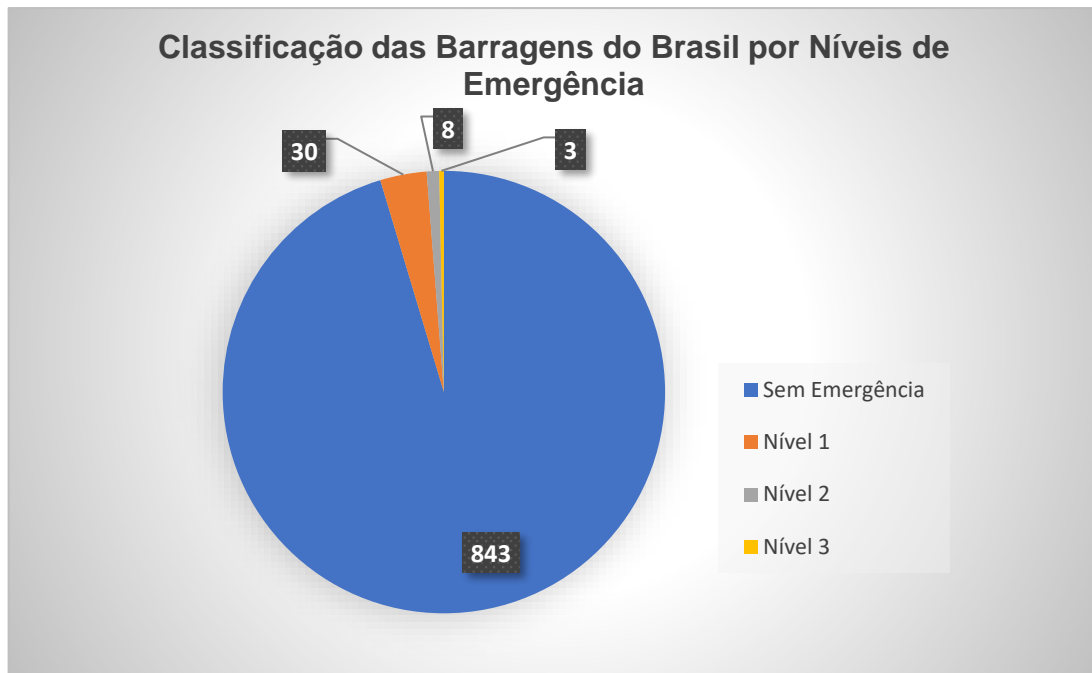
Zona de Segurança Secundária (ZSS): trecho constante do mapa de inundação não definido como ZAS.

Mapa de Inundação: produto do estudo de inundação que compreende a delimitação geográfica georreferenciada das áreas potencialmente afetadas por eventual vazamento ou ruptura da barragem e seus possíveis cenários associados e que objetiva facilitar a notificação eficiente e a evacuação de áreas afetadas por essa situação (BRASIL, 2010).

De acordo com a Portaria N° 70.389, de 17 de maio de 2017, o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) é definido como um documento técnico e de fácil entendimento, elaborado pelo empreendedor, no qual estão identificadas as situações de emergência em potencial da barragem, são estabelecidas as ações a serem executadas nesses casos e definidos os agentes a serem notificados, com o objetivo de minimizar danos e perdas de vida. Além disso, o PAEBM propõe alternativas e diretrizes relacionadas ao abastecimento de água para os municípios afetados por rompimentos de barragens de mineração. Tais medidas devem ser cumpridas pelo empreendedor responsável por cada estrutura.

Segundo dados da Agência Nacional de Mineração – ANM (2021), o Brasil conta com aproximadamente 884 barragens, sendo 202 destinadas para a contenção dos rejeitos da mineração de ferro.

Figura 3.2 - Classificação das Barragens do Brasil por Níveis de Emergência.



Fonte: Autora (2021), baseada em ANM (2021).

De acordo com o gráfico acima, das 884 barragens localizadas no Brasil, 843 estão sem nível de emergência, consideradas seguras. Entre as demais estruturas, 30 estão classificadas em nível 1 de emergência, que consiste na identificação de uma anomalia que resulte no comprometimento da segurança da estrutura, 8 estão classificadas em nível 2, que consiste no “não controle” das anomalias identificadas no nível 1, onde continuam impactando a segurança da estrutura e, por fim, existem três barragens que se encontram classificadas em nível 3, que simboliza uma situação de ruptura iminente ou que está ocorrendo (ANM, 2021).

Considerando as barragens que estão classificadas em nível 3, todas elas são responsáveis pelo armazenamento de rejeitos provenientes da mineração de ferro e, além disso, as três barragens estão localizadas no estado de Minas Gerais, mais precisamente nos municípios de Nova Lima, Ouro Preto e Barão de Cocais (CARVALHO, 2022).

3.3. Caracterização dos Rejeitos de Mineração de Ferro

A hematita e o itabirito, estão entre os minérios de ferro majoritariamente explorados no Brasil (ANDRADE, 2014). A hematita é extraída principalmente no estado do Pará, e apresenta teor médio de ferro em torno de 60%. Já o itabirito é extraído principalmente na região do

Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais, com teor de ferro em torno de 50% (ANDRADE, 2014).

Além destes, a magnetita, a goethita e a siderita são minerais que apresentam consideráveis concentrações de ferro em suas composições. A composição do minério de ferro se dá, tanto por estes minerais de ferro, que apresentam valor econômico associado, quanto de outros minerais, que não apresentam valor econômico para a mineração de ferro (ANDRADE, 2014).

Neste sentido, os minerais de ferro, quando processados com objetivo de aumentar o teor de ferro contido no produto final, podem gerar rejeitos que contêm diferentes minerais em sua estruturação. Normalmente, os minerais associados aos rejeitos da mineração de ferro são caulinita, gibbsita, goethita, hematita, magnetita e quartzo (WOLFF, 2009).

Entre os principais impactos resultantes da mineração de ferro, está o grande volume de resíduo gerado no processo de beneficiamento do minério. Alguns métodos de beneficiamento de minérios exigem a moagem dos materiais e adição de água e produtos químicos na planta de tratamento. Com isso, um grande volume de resíduo em forma de polpa é produzido, chamado de rejeito, que é armazenado em barragens (ANDRADE, 2014).

3.4. Impactos Provenientes da Contaminação de Água por Rejeitos da Mineração de Ferro

Diante dos eventos que já ocorreram envolvendo o rompimento de barragens de mineração de ferro, o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), efetuou estudos com o objetivo de identificar os impactos dos rompimentos de barragem aos corpos hídricos. Entre as muitas alterações, pode-se citar o aumento da turbidez e dos níveis de contaminantes inorgânicos, como os metais ferro e manganês, associados à lama de rejeitos. Com isso, contaminações de cursos d'água por rejeito de mineração podem ocasionar a mortandade dos organismos aquáticos, em especial peixes e invertebrados, devido à grande quantidade de sedimentos que ficam disponíveis na coluna d'água (IBAMA, 2015).

Os metais provenientes das atividades de extração mineral, como ferro, manganês, alumínio, contidos nos rejeitos, quando entram em contato com o corpo hídrico, representam riscos consideráveis de contaminação. Isto se dá devido a não degradação desses materiais, permanecendo solubilizados nas águas ou precipitados dependendo das condições físico-químicas. Em análises preliminares realizadas pelo IBAMA no ano de 2015, logo após um dos

maiores desastres socioambientais envolvendo barragens de mineração, o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana – MG, que resultou em 43,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos vazados, os resultados das amostras de água dos cursos d'água afetados pelo rejeito mostram alteração dos seguintes parâmetros de acordo com os limites de concentração de metais, sendo eles: Metais totais: Alumínio (Al); Bário (Ba); Cálcio (Ca); Chumbo (Pb); Cobalto (Co); Cobre (Cu), Cromo (Cr); Estanho (Sn); Ferro (Fe); Magnésio (Mg); Manganês (Mn); Níquel (Ni); Potássio (K); Sódio (Na) e, em relação aos Metais dissolvidos: Alumínio (Al); Ferro (Fe) e Manganês (Mn), (G1 2019).

Os rejeitos da mineração de ferro que são acumulados nas margens e sedimentos dos rios, na ocorrência de eventos climáticos ou até mesmo por influência do homem, podem ser revolvidos aos cursos d'água, fazendo com que os metais presentes no rejeito se tornem disponíveis de forma mais fácil na coluna d'água. Dessa forma, as águas dos corpos hídricos que foram sujeitos a rompimentos de barragens de mineração, sempre estarão sujeitas a novos picos de turbidez, quedas nos teores de oxigênio e aumento nas concentrações de metais, causando prejuízos para aqueles que dependem destes recursos hídricos por um período incalculável (SASSINE, 2015).

De acordo com Ruppenthal (2013), os efeitos nocivos dos metais tóxicos ao organismo humano podem ocorrer em médio ou longo prazo, mesmo quando ingeridos em pequenas concentrações, devido às suas propriedades de bioacumulação. No que se refere a parte toxicológica, estes metais podem afetar diferentes órgãos e tecidos do organismo, por serem altamente reativos do ponto de vista químico e não destrutíveis (RUPPENTHAL, 2013). A presença desses metais e alteração de diversos parâmetros da qualidade da água indica a necessidade de monitoramento contínuo do ambiente afetado, assim como sua recuperação, que deve ser executada com base no comportamento dos parâmetros alterados no meio hídrico (IBAMA, 2015).

Portanto, tendo em vista os efeitos causados pela contaminação de um corpo hídrico por rejeitos oriundos da mineração de ferro, o abastecimento de água para consumo humano e a dessedentação de animais são fatores preocupantes neste cenário. Pois, sabe-se que apesar de grande parte dos rejeitos ser composta por areia fortemente enriquecida em quartzo, outra parte é composta pelos minerais óxidos e hidróxidos de ferro que não foram segregados durante o beneficiamento (QUEIROZ, 2020).

3.5. Legislações Vigentes para o Tratamento e Abastecimento de Água

A fim de evitar danos à saúde, a água deve ser tratada de forma a adequar-se a uma série de parâmetros e condições estabelecidos pela legislação vigente. Uma água própria para este fim é chamada de água potável e as características a que a mesma deve atender são os chamados padrões de potabilidade (ROSCHILD, 2021).

O Ministério da Saúde, através do Decreto Nº 79.367, de 9 de março de 1977, estabelece normas e padrões de potabilidade da água, a serem observados em todo o território nacional. Além disso, este decreto estabelece que órgãos e entidades dos Estados, Municípios, Distrito Federal e Territórios, responsáveis pela operação dos sistemas de abastecimento público, devem adotar, obrigatoriamente, as normas e o padrão de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde.

Atualmente, a norma vigente de potabilidade da água para consumo humano é a Portaria GM/MS Nº 888, de 04 de maio de 2021, que revogou a Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, e dispõe sobre o padrão de potabilidade e os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano. Diante disso, a Portaria Nº 888/2021 abrange aproximadamente 130 parâmetros da qualidade da água e é dividida em oito capítulos onde estabelece suas disposições gerais, principais definições, competências e responsabilidades, exigências aplicáveis aos sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água para consumo humano, os padrões de potabilidade, os planos de amostragem de controle da qualidade da água para consumo humano, as penalidades aplicáveis e, por fim, sobre as disposições finais e transitórias. Entre suas principais definições, pode-se citar:

Água para Consumo Humano: água potável destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal, independentemente da sua origem;

Água Potável: água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido nesta Portaria e que não ofereça riscos à saúde;

Padrão de Potabilidade: conjunto de valores permitidos como parâmetro da qualidade da água para consumo humano, conforme definido na Portaria Nº 888/2021;

Água Tratada: água submetida a processos físicos, químicos ou combinação destes, visando atender ao padrão de potabilidade;

Em relação aos padrões organolépticos de potabilidade, a Portaria N° 888/2021 define limites de atendimento para alguns dos parâmetros orgânicos e inorgânicos, conforme mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros Orgânicos e Inorgânicos de Potabilidade, Portaria N° 888/2021.

PARÂMETROS	UNIDADE	PORTARIA 888 (VMP)
Alumínio Dissolvido	mg/L Al	0,2
Arsênio Total	mg/L As	0,01
Cádmio Total	mg/L Cd	0,003
Chumbo Total	mg/L Pb	0,01
Cobre Dissolvido	mg/L Cu	2
Cor Verdadeira	mg Pt/L	15
Cromo Total	mg/L Cr	0,05
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L O ₂	NA
Escherichia Coli	NMP/100mL	Ausente
Ferro Total	mg/L Fe	0,3
Fósforo Total	mg/L P	NA
Manganês Total	mg/L Mn	0,1
Mercúrio Total	mg/L Hg	0,001
Níquel Total	mg/L Ni	0,07
pH	-	6-9
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L SDT	500
Turbidez	NTU	5
Zinco Total	mg/L Zn	5

*VMP = Valores Máximos Permitidos.

Fonte: Adaptado de Portaria N° 888/2021 (2021).

Para fins de monitoramento contínuo da qualidade de qualquer água bruta, devem ser levados em conta diversos parâmetros de acordo com o tipo de manancial. Para águas captadas diretamente de cursos d'água, precisa-se avaliar o pH, a alcalinidade, a turbidez e a cor verdadeira. Somente em casos especiais, onde houver a possibilidade de contaminação, devem-se monitorar outros parâmetros relacionados ao tipo da contaminação, como por exemplo os metais pesados (LIBÂNIO, 2008).

Além da Portaria GM/MS N° 888, de 04 de maio de 2021, tem-se a resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre 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 (CONAMA, 2005). Esta resolução é fundamental para que o empreendedor garanta a qualidade dos efluentes a serem descartados nos corpos hídricos, a fim de não causar nenhum impacto significativo ao meio ambiente.

Tal resolução conceitua o termo “águas doces” como águas com salinidade igual ou inferior a 0,5%, e também classifica as águas em cinco classes distintas, de acordo com a sua qualidade, sendo classe especial, classe 1, classe 2, classe 3 e classe 4.

De acordo com a resolução CONAMA Nº 357/2005, a classe especial enquadra águas que podem ser destinadas para consumo humano, com desinfecção; à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral. As águas classe 1, abrangem águas que podem ser destinadas ao consumo humano, após tratamento simplificado; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas (CONAMA, 2005).

As águas de classe 2 referem-se àquelas que podem ser destinadas ao consumo humano, após a aplicação de metodologias de tratamento convencional, além da recreação de contato primário, como natação, esqui aquático e mergulho, à proteção das comunidades aquáticas, à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto, à aquicultura, e à atividade de pesca (CONAMA, 2005).

Têm-se as águas de classe 3, que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; à pesca amadora; à recreação de contato secundário; e à dessedentação de animais. Por fim, têm-se as águas de classe 4, que podem ser destinadas à navegação; e à harmonia paisagística (CONAMA, 2005).

Em comparação aos parâmetros orgânicos e inorgânicos de potabilidade da água, citados na Portaria GM/MS Nº 888/2021 e apresentados na Tabela 3.1, a Resolução CONAMA Nº 357/2005 também dispõe de limites individuais para cada substância, porém a depender da classe em que o corpo hídrico se encontra enquadrado. Na Tabela 3.2, tem-se os limites

estabelecidos para parâmetros semelhantes aos citados na Tabela 3.1, porém em relação à Resolução CONAMA Nº 357/2005, para corpos hídricos enquadrados na Classe 2.

Tabela 3.2 - Parâmetros Orgânicos e Inorgânicos de Potabilidade CONAMA Nº 357/2005.

PARÂMETROS	UNIDADE	CONAMA 357 (VMP)
Alumínio Dissolvido	mg/L Al	0,1
Arsênio Total	mg/L As	0,01
Cádmio Total	mg/L Cd	0,001
Chumbo Total	mg/L Pb	0,01
Cobre Dissolvido	mg/L Cu	0,009
Cor Verdadeira	mg Pt/L	75
Cromo Total	mg/L Cr	0,05
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L O ₂	5
Escherichia Coli	NMP/100mL	1000
Ferro Dissolvido	mg/L Fe	0,3
Fósforo Total	mg/L P	0,05
Manganês Total	mg/L Mn	0,1
Mercúrio Total	mg/L Hg	0,0002
Níquel Total	mg/L Ni	0,025
pH	-	6-9
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L SDT	500
Turbidez	NTU	100
Zinco Total	mg/L Zn	0,18

*VMP = Valores Máximos Permitidos.

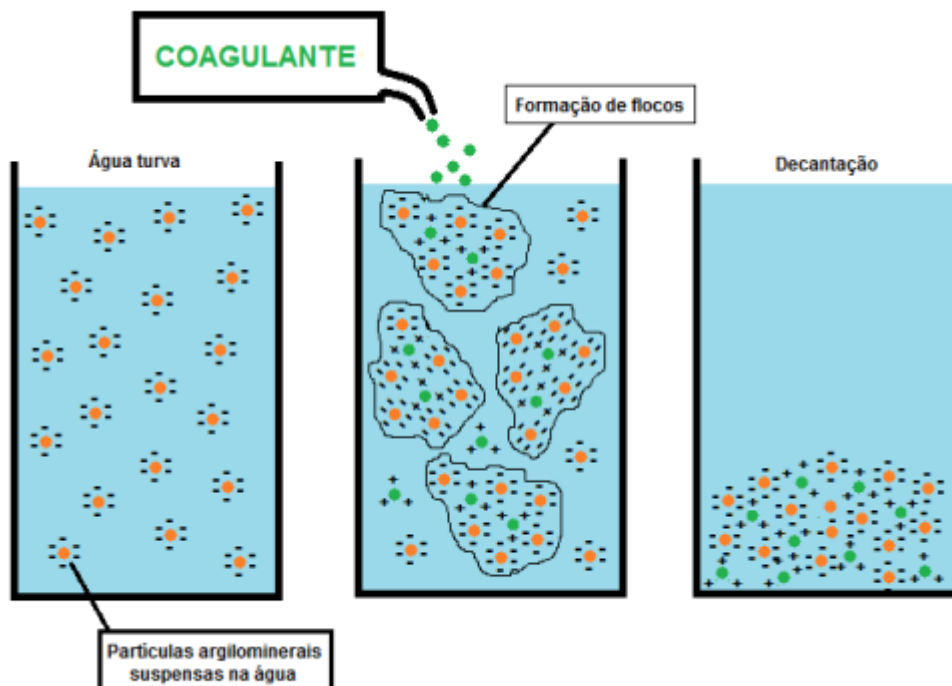
Fonte: Adaptado de CONAMA 357 (2005).

3.6. Técnicas Convencionais para o Tratamento de Água

As técnicas utilizadas para o tratamento de água, estão diretamente relacionadas aos parâmetros da qualidade da água a ser tratada (ROSCHILD, 2021). Quanto pior for a qualidade da água, mais lento é o seu processo de tratamento, além de apresentar um custo mais elevado. Existem diversas técnicas que são utilizadas para o tratamento de água, entre elas pode-se citar as técnicas de tratamento com simples desinfecção, que se baseiam na adição de cloro à água, também conhecida como cloração; as técnicas de tratamento simplificado, que correspondem a adição de cloro e flúor na água, processo no qual chamamos de fluoretação; as técnicas de tratamento convencional, que abrangem os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção de pH; e, por fim, as técnicas de tratamento avançado, nas quais podemos citar como exemplo a flotação, centrifugação, membranas filtrantes, clarificador de contato, entre outras (ROSCHILD, 2021).

O tratamento convencional de água, inicia-se através do processo de coagulação. A coagulação é um processo físico-químico em que a substância coagulante adicionada à água, proporciona à formação de coágulos, através de uma mistura rápida (ROSCHILD, 2021). Através da coagulação, é possível a desestabilização das partículas coloidais e em suspensão. Além disso, proporciona a remoção da turbidez orgânica e inorgânica, remoção das cores aparentes e cores verdadeiras da água, eliminação de bactérias, vírus e organismos patogênicos susceptíveis de serem separados por coagulação, eliminação de algas e plânctons presentes nas águas e, por fim, a eliminação de substâncias produtoras de gostos e odores. O policloreto de alumínio, sulfato ferroso, cloreto férrico, sulfato de alumínio e coagulantes orgânicos são alguns exemplos de coagulantes utilizados para o tratamento de água. A Figura 3.3 ilustra a ação dos coagulantes no processo de coagulação.

Figura 3.3 – Processo de Coagulação.

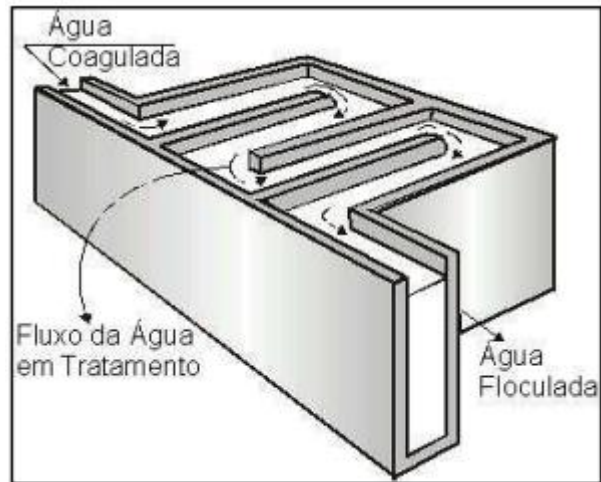


Fonte: Adaptado de NaturalTec (2022).

Em seguida, têm-se o processo de floculação, onde a água coagulada é submetida a agitação lenta durante um período de tempo, até que os flocos alcancem tamanho e massa específica suficientes para que sejam removidos por sedimentação nos decantadores ou por flotação nos flotadores (ROSCHILD, 2021). Este processo pode ser realizado em unidades mecanizadas ou hidráulicas. A necessidade da variação da intensidade de agitação se dá em função da qualidade

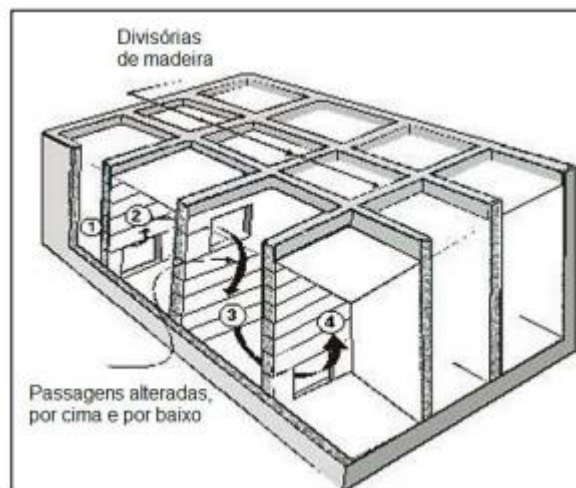
da água bruta (VOLTAN, 2014). Os flocladores podem possuir um fluxo vertical ou horizontal, e podem ser mecânicos ou hidráulicos, conforme apresentado nas Figuras 3.4 e 3.5.

Figura 3.4 - Floclador Hidráulico de Fluxo Horizontal.



Fonte: Vianna (1997).

Figura 3.5 - Floclador Hidráulico de Fluxo Vertical.

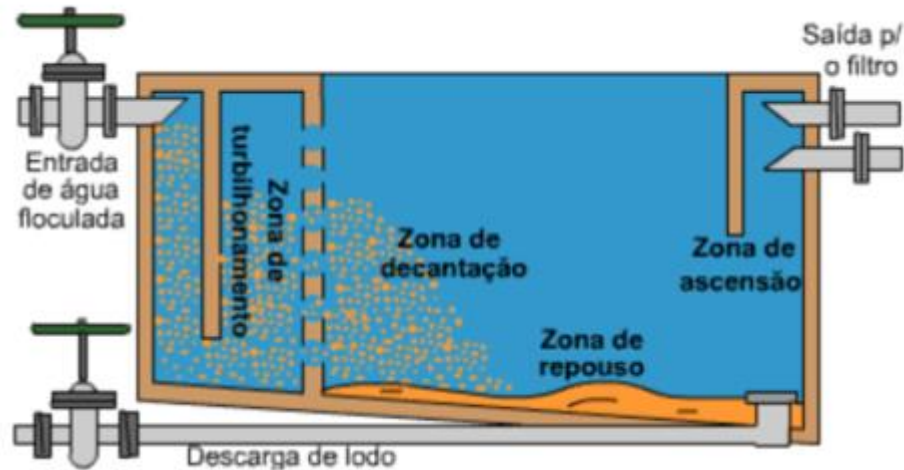


Fonte: Vianna (1997).

Após as etapas de coagulação e flotação, a água é encaminhada aos decantadores, que são os responsáveis pela separação das partículas sólidas através da gravidade. No decantador, os sólidos são sedimentados em seu fundo, para que sejam removidos em forma de lodo. Os decantadores convencionais podem possuir o fluxo horizontal, através de uma seção retangular, ou o fluxo vertical, através de seções circulares. Já os decantadores de alta taxa, também

conhecidos como decantadores laminares, podem possuir o fluxo ascendente ou descendente (ROSCCHILD, 2021). A Figura 3.6 ilustra um decantador de fluxo horizontal.

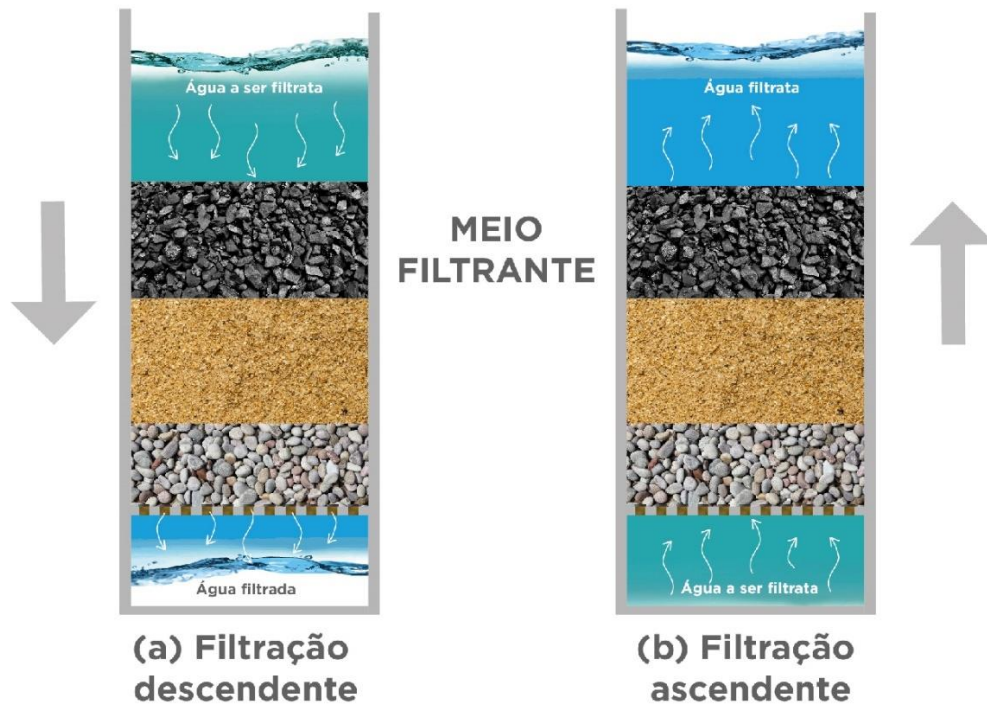
Figura 3.6 – Decantador de Fluxo Horizontal.



Fonte: Adaptado de Aragão (2020).

A fim de retirar as partículas residuais em suspensão que não foram retiradas na decantação, a filtração é o processo de separação sólido-líquido utilizado para promover a remoção do material particulado presente na fase líquida. Segundo Roschild (2021), para este processo, os filtros são constituídos de meios filtrantes como areia, pedregulho e cascalho, classificados de acordo com sua granulometria e coeficiente de uniformidade, que recebem à água sob vazão controlada. O sentido da filtração pode ser descendente ou ascendente, conforme ilustra a Figura 3.7.

Figura 3.7 – Sentidos da filtração.



Fonte: Scalize (2021).

Apesar das etapas de tratamento de água já citadas oferecerem uma boa eficiência na remoção de microrganismos patogênicos, seguindo as etapas convencionais de tratamento de água, tem-se a desinfecção na sequência da etapa de filtração. Seu objetivo é a remoção de microrganismos patogênicos e quaisquer outros microrganismos indesejáveis ao tratamento, além da manutenção de um residual na água tratada visando a segurança da água caso ocorra contaminação na rede (FUSATI, 2021). Esta etapa se faz necessária para atender aos parâmetros de potabilidade da água, que determinam que toda água para consumo humano deve estar isenta de microrganismos patogênicos.

Para finalizar o tratamento convencional de água, têm-se as etapas de fluoretação e correção de pH. A primeira se dá devido a aplicação de flúor na água tratada, a fim de prevenir a ocorrência de cárie dentária, como recomendação da saúde pública. Já a segunda, ocorre através da adição de uma solução de Hidróxido de Cálcio, Ca(OH)_2 , na água filtrada, a fim de torná-la neutra ($\text{pH}=7$), evitando sua corrosividade.

3.7. Coagulação

A coagulação é a primeira etapa do tratamento de água e se dá devido ao uso de produtos químicos e/ou polímeros naturais, chamados de coagulantes, a fim de promover a interação entre as partículas para a formação de agregados com tamanhos maiores e, com isso, aumentar as chances de uma partícula interagir com a outra (LETTERMAN, AMIRTHARAJAH e O'MELIA, 1999). Compostos, na maioria das vezes, por sais metálicos de alumínio ou ferro, têm-se o sulfato de alumínio, cloreto de alumínio, aluminato de sódio, cloreto férrico, sulfato ferroso clorado e o sulfato férrico, como os principais produtos químicos utilizados no processo de coagulação (TZOUPANOS e ZOUBOULIS, 2008).

De acordo com Libânio (2008), além dos coagulantes, os auxiliares de coagulação e floculação, conhecidos como polímeros orgânicos que podem ser naturais ou sintéticos, possuem funções importantes para essa etapa de tratamento, como o aumento da velocidade de decantação dos flocos, aumento da resistência ao cisalhamento dos flocos e, além disso, reduzem a quantidade de coagulante químico adicionado à água. Tais polímeros podem ser classificados como aniônicos, não iônicos ou catiônicos (LIBÂNIO, 2008). O aniônico e o não iônico são usados após o coagulante primário para formação dos flocos de maior densidade. Já os polieletrólitos catiônicos, por apresentarem cargas positivas (cátions), podem até mesmo substituir os sais de alumínio ou ferro (mais utilizados) e também são conhecidos como coagulantes secundários e/ou auxiliares de coagulação. São utilizados em situações em que a floculação é difícil devido às variações oriundas das mudanças de temperatura da água. (LIMA, 2007).

Os auxiliares de coagulação são materiais insolúveis que, ao entrarem em contato com a água, contribuem para a eficiência da coagulação. A fim de exemplificar alguns dos auxiliares de coagulação, pode-se citar: argilas, carvão ativado e silicato de sódio (LIMA, 2007). Esses auxiliares são adicionados em águas com baixa concentração de partículas para desenvolvimento de flocos maiores e possuem uma alta velocidade de sedimentação, devido a sua alta densidade (LIMA, 2007).

3.7.1. Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio, encontrado facilmente no mercado a preços mais baratos, apresenta composição típica $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14,3H_2O$. Ao ser adicionado na massa líquida há a formação dos principais complexos a partir da hidrólise na presença do precipitado de hidróxido de alumínio ($Al(OH)_3$). O alumínio, na solução comercial do sulfato de alumínio apresenta 9% do peso

molecular do produto, ou seja, em cada 30 mg/L do produto comercial, há a presença de apenas 2,7 mg/L de alumínio (LIBÂNIO, 2008).

O sulfato de alumínio, apresenta boa eficiência na remoção de parâmetros como a turbidez, cor aparente, cor verdadeira e, até mesmo, ferro e manganês (LIBÂNIO, 2008). Fatores como a alcalinidade do pH da água, contribuem significativamente no processo de coagulação utilizando-se este coagulante. O pH possui um importante papel para que se prevaleçam as espécies hidrolisadas do coagulante e a alcalinidade funciona como uma espécie de tampão, minimizando a queda muito acentuada do pH de coagulação (LIBÂNIO, 2008). Estudos afirmam que a presença de alumínio residual em águas destinadas ao consumo e abastecimento humano pode acarretar problemas de saúde pública (ROSALINO, 2011).

3.7.2. Cloreto Férrico

O cloreto férrico é utilizado como aliado ao tratamento de águas superficiais contaminadas, pois reduz drasticamente os níveis de turbidez e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Além disso, esse coagulante é capaz de eliminar fosfatos e boa parte de metais pesados, quando a coagulação é realizada em valores elevados de pH (PAVANELLI, 2001). Segundo Pavanelli (2001), este coagulante é oriundo da reação a quente do ácido clorídrico, concentrado com o minério de ferro, seguido de resfriamento e filtração. Caso a amostra de água a ser tratada contenha determinadas concentrações de metais como ferro e manganês, ou se possuir valores muito variáveis de pH, o uso do cloreto férrico ocasionará em um elevado padrão de água tratada.

3.7.3. Policloreto de Alumínio

O policloreto de alumínio é um coagulante líquido a base de cloreto de polialumínio. É recomendado para uso no tratamento de água por apresentar eficiência na remoção de matéria orgânica e inorgânica (ARATROP, 2022). Este coagulante pode ser aplicado puro ou em solução aquosa e possui algumas vantagens como o incremento no tamanho, resistência e peso dos flocos, remoção de turbidez, atuação em ampla faixa de pH (4-10), entre outras (ARATROP, 2022).

3.7.4. Sulfato Ferroso

O sulfato ferroso pertence a categoria dos sais de ferro e possui vantagens sobre os sais de alumínio, pois formam flocos mais pesados e podem atuar em uma faixa de pH ainda mais

ampla (4-11) (MARQUES, 2022). Este coagulante é um sub-produto de diversos processamentos químicos e da decapagem do aço. É muito utilizado em águas turvas e apresenta resultados satisfatórios na remoção de cor e turbidez (MARQUES, 2022).

3.8. Polímeros Naturais Utilizados na Coagulação

Utilizados como coagulantes e auxiliares de coagulação e floculação, os polímeros naturais mais utilizados, atualmente, são os de amido e aqueles encontrados a partir de taninos (SKORONSKI *et al.*, 2014). O primeiro, é encontrado no amido de batata, mandioca e milho, e o segundo refere-se a moléculas com propriedades coagulantes, que desestabilizam os colóides com a eliminação da camada de solvatação, diminuindo o potencial zeta durante o processo de coagulação e, dessa forma, permitem a formação de flocos (SKORONSKI *et al.*, 2014). Outros polímeros naturais que podem ser utilizados para o tratamento de água são a *Moringa oleífera Lam.*, quitosana (extraída das cascas de camarões e lagostas) e, por fim, são utilizadas em diversos países aproximadamente 27 espécies de plantas e frutos que apresentam propriedades importantes no processo de coagulação (LIMA, 2007).

A priorização do uso de polímeros naturais para o tratamento de água é vantajosa, pois além de utilizarem os mesmos mecanismos que os auxiliares sintéticos, não causam risco à saúde humana e possuem baixo custo (LIMA, 2007).

A fim de comprovar a eficiência do uso de polímeros naturais para contribuição no processo de coagulação, Scarpong e Richardson (2010) realizaram um estudo comparativo sobre a utilização da *Moringa oleífera* com o sulfato de alumínio como coagulantes primários em águas com turbidez entre 88 e 195 UNT. Neste estudo, foram utilizadas as dosagens de *Moringa* entre 50 e 200 mg/L e de sulfato de alumínio entre 5 e 12,5 mg/L, e conclui-se que as dosagens de *Moringa oleífera*, além de não alterarem o pH das amostras, alcançaram excelentes resultados em relação a remoção de turbidez, acima de 90% com as dosagens acima de 50 mg/L, equiparando-se com a remoção apresentada pelo sulfato de alumínio.

3.8.1. *Tanfloc SG*

O *Tanfloc SG* é um polímero orgânico-catiônico, de origem vegetal e baixo peso molecular. Este coagulante natural, atua em sistemas de partículas coloidais, neutralizando cargas e formando pontes entre estas partículas. Através disto, os flocos são formados e posteriormente

sedimentados. É atuante a uma faixa de pH variável de 4,5 – 8,0 e não altera o pH da água (TANAC SA, 2022).

Recomenda-se sua utilização para o tratamento de águas em geral, efluentes industriais, petroquímicos, entre outros. Além disso, o *Tanfloc SG* pode ser aplicado sozinho ou em conjunto a outros agentes de coagulação, como o Cloreto Férrico (TANAC SA, 2022).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo

O município de Nova Lima está localizado na região metropolitana de Belo Horizonte e, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), possuía uma população estimada para o ano de 2020 de aproximadamente 96.157 habitantes. Pertence à bacia hidrográfica do Rio das Velhas, que é o principal afluente do Rio São Francisco. Esta bacia é dividida ao longo de seu percurso em alto, médio e baixo Rio das Velhas, abrangendo uma área de 29.173 km², onde estão localizados 51 municípios que abrigam uma população de aproximadamente 4,8 milhões de habitantes. Além disso, Nova Lima possui uma área de abrangência de 429.313 km², situados entre os municípios de Sabará, Raposos, Rio Acima, Itabirito, Brumadinho e Belo Horizonte, conforme apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Limite do Município de Nova Lima - MG.



Fonte: ANA (2015).

Considerada uma cidade de grandes riquezas naturais e culturais, além de ser historicamente reconhecida pela extração mineral, principalmente do minério de ferro, ouro e manganês, Nova Lima é integrante da região que compõe o Quadrilátero Ferrífero, e conta com a atuação de várias mineradoras que trazem consigo os impactos e toda a infraestrutura relacionada à atividade de exploração mineral.

Conforme dados extraídos do Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Nova Lima – MG (NOVA LIMA, 2015), cerca de 97,5% da área do município é objeto de requerimentos e autorizações de pesquisa mineral para as seguintes substâncias: Areia, Argila, Bauxita, Caulim, Cianita, Dolomito, Esteatito, Ferro, Filito, Manganês, Minério de Ferro, Minério de Manganês, Minério de Ouro, Ocre, Ouro, Quartzito, Quartzo, Serpentinó e Água Mineral. As substâncias com as maiores áreas requeridas são Ouro, Minério de Ouro, Ferro e Minério de Ferro que correspondem respectivamente a 58,98% e 40,81% da área total do município.

Devido à grande influência da mineração de ferro na região, atualmente, estão presentes no município de Nova Lima 26 barragens responsáveis pelo armazenamento dos rejeitos provenientes desse tipo de mineração. A presença dessas barragens é um fator preocupante, pois se considerarmos o rompimento hipotético de uma dessas estruturas, parte do município de Nova Lima teria sua infraestrutura comprometida, o que inclui o abastecimento e uso da água na região.

O abastecimento de água do município de Nova Lima é composto por dois sistemas de abastecimento sob concessão e administrados pela COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais), que são interligados aos sistemas de abastecimento de outros Municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte. O Sistema Integrado Rio das Velhas é responsável pelo abastecimento de 98% do município de Nova Lima, enquanto o Sistema Integrado Morro Redondo é responsável por apenas 2% do abastecimento do município.

4.2. Barragem e *Dam Break*

Para avaliação do *Dam Break* da barragem em estudo, utilizou-se o PAEBM da estrutura. O mapa de inundação estava contido no Anexo A, que pertence à sessão II do documento. Esta sessão, nos trouxe informações sobre a barragem, ZAS (Zona de Autossalvamento) e ZSS (Zona de Segurança Secundária), além de conter ações emergenciais e protocolos de evacuações.

Para aquisição das informações dos Estudos Hipotéticos de Ruptura da Barragem (*Dam Break*), foi utilizado o software QGIS 3.16 Hannover, onde informações como a distância e tempo de deslocamento da onda de inundação até à Estação de Tratamento de Água Bela Fama, foram adquiridos através dos arquivos vetoriais e matriciais disponibilizados. As análises dos

impactos causados na estrutura da Estação de Tratamento de Água, foram realizadas através de análise espacial da mancha de inundação na localidade.

Entre as características da barragem em estudo, retiradas do PAEBM da estrutura, pode-se citar que sua metodologia de construção é o alteamento a montante, seu volume de rejeitos é de aproximadamente 12.409.893,00 m³ e seu maciço possui uma altura de 45 metros. Além disso, a barragem encontra-se paralisada, ou seja, não recebe rejeitos atualmente.

Em relação ao Nível de Emergência, essa barragem está enquadrada no Nível 1 (VALE, 2022), onde são detectadas anomalias que resultem na pontuação máxima quanto ao estado de conservação ou para qualquer outra situação com potencial comprometimento de segurança da estrutura, que demanda inspeções diárias (VALE, 2021). E, considerando sua matriz de risco residual, seu risco está classificado como “Muito Alto”. A Figura 4.2 apresenta a barragem de rejeitos em estudo.

Figura 4.2 - Barragem de Rejeitos Localizada no Município de Nova Lima - MG.



Fonte: VALE SA (2020).

4.3. Análises da Qualidade da Água

Para a análise da qualidade da água, foram adquiridas duas amostras diferentes. A primeira, nomeada amostra A001, coletada no Rio das Velhas, mais precisamente no ponto onde é

realizada a captação superficial da Estação de Tratamento de Água Bela Fama, em Nova Lima – MG, responsável pelo abastecimento do município. Vale ressaltar, que a amostra foi coletada em período chuvoso (dia 15 de dezembro de 2021) e, além disso, no momento da coleta estava chovendo. Conseqüentemente, o Rio das Velhas apresentou-se com aspecto turvo, como mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Aspecto do Rio das Velhas no dia da Coleta.



Fonte: Autora (2021).

Foram coletados aproximadamente 30 litros de água no ponto onde é realizada a captação superficial da ETA Bela Fama e para isso utilizou-se: balde inox de 20 litros, caneca inox e luva nitrílica. Todos os itens foram higienizados por água deionizada antes da coleta.

Em seguida, 10 litros da amostra coletada foram distribuídos na frascaria para posterior análise da qualidade da água de acordo com alguns dos parâmetros da Resolução CONAMA Nº 357/2005, sendo eles: Alumínio Dissolvido, Arsênio Total, Cádmio Total, Chumbo Total, Cobre Dissolvido, Cor Verdadeira, Cromo Total, Demanda Bioquímica de Oxigênio, *Escherichia Coli*, Ferro Dissolvido, Fósforo Total, Manganês Total, Mercúrio Total, Níquel Total, pH, Sólidos Dissolvidos Totais, Turbidez e Zinco Total. Esses parâmetros foram escolhidos de acordo com a probabilidade de alterações após a suposta contaminação por rejeito de mineração de ferro.

A segunda amostra coletada, correspondeu à aproximadamente 10 kg de rejeito de minério de ferro, coletados diretamente da barragem em estudo neste trabalho, em duas sessões distintas para composição da amostra. Para a coleta do rejeito, foi utilizada uma bombona de armazenamento e pá para retirá-lo da barragem. Os rejeitos foram retirados em 2 sessões diferentes do barramento, sessões C e D. A Figura 4.4 ilustra a sessão C, onde o rejeito apresentava-se com o aspecto mais líquido e pastoso, já a Figura 4.5 ilustra a sessão D, onde o rejeito apresentava-se com o aspecto mais sólido e compacto.

Figura 4.4 - Aspecto do Rejeito de Minério de Ferro na Sessão C da Barragem.



Fonte: Autora (2021).

Figura 4.5 - Aspecto do Rejeito de Minério de Ferro na Sessão D da Barragem



Fonte: Autora (2021).

Após a coleta de ambas as amostras, água e rejeito, uma terceira amostra foi gerada, sintetizada em laboratório a partir das amostras coletadas anteriormente. Chamou-se essa amostra de A002. Tal sintetização teve o objetivo de simular a contaminação da água do Rio das Velhas por rejeito de mineração de ferro. Para isso, foram utilizados 20 litros de água da amostra coletada no Rio das Velhas e 4 kg de rejeito de minério de ferro, resultando em uma proporção de 20% de rejeito na mistura. Esse quantitativo foi definido de acordo com o padrão de calibração do turbidímetro utilizado, que possuía um limite máximo para medição de turbidez de aproximadamente 1000 NTU. Em seguida, a amostra gerada através da mistura água e rejeito foi dividida nos respectivos frascos necessários para a análise laboratorial e, posteriormente, encaminhada ao laboratório responsável.

A frascaria utilizada para condicionamento das amostras variou de acordo com os parâmetros a serem analisados. Para os parâmetros de Metais Solúveis e Metais Totais, foram utilizados dois frascos contendo 1 ml de Ácido Nítrico (HNO_3) para 500 ml da amostra; para os parâmetros de DBO, Fósforo Total, Fenóis e Nitrogênio, foram utilizados frascos contendo 1 ml de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) para 500 ml da amostra; para o parâmetro *Escherichia Coli*, foi utilizado frasco contendo 1 pérola de Sulfato de Sódio (Na_2SO_4); para os demais parâmetros, os frascos estavam apenas higienizados.

A análise de tais parâmetros foi realizada por laboratório especializado, com base no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, que abrange os métodos padrões para o exame da água e do esgoto.

4.4. Etapas Utilizadas para o Tratamento de Água

Em relação as etapas utilizadas para o tratamento de água e considerando o objeto do presente trabalho, os ensaios de tratamento foram realizados no Laboratório de Análises Ambientais e Sanitárias, do Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, localizado no Campus I do CEFET-MG, através do uso do equipamento de *Jar Test*. Este equipamento, conhecido como “Teste de Jarros”, é um procedimento bastante empregado nas Estações de Tratamento de Água e, através dele é possível determinar as dosagens dos coagulantes a serem empregados no tratamento, bem como definir as condições de operação das estações de tratamento de água (BAUMGARTNER, *et al.*, 2013).

Antes de dar início aos Testes de Jarros, o pH da amostra de água bruta (A001) foi medido utilizando o pHmetro, a fim de se certificar se havia a necessidade de correção para mantê-lo na faixa neutra, 6-9.

Para os testes de tratabilidade, foi utilizado o aparelho de *Jar Test* com seis cubas de 2 litros cada, onde depois de preenchidas com a água da amostra sintetizada de água e rejeito (A002), foi conduzido o primeiro teste com as dosagens de coagulantes próximas àquelas relatadas na literatura para coagulantes químicos. Vale ressaltar, que após a sintetização das amostras de água e rejeito, aguardou-se 10 minutos para a decantação parcial do rejeito por gravidade e, a água utilizada para o primeiro Teste de Jarros foi apenas a água sobrenadante após leve mistura.

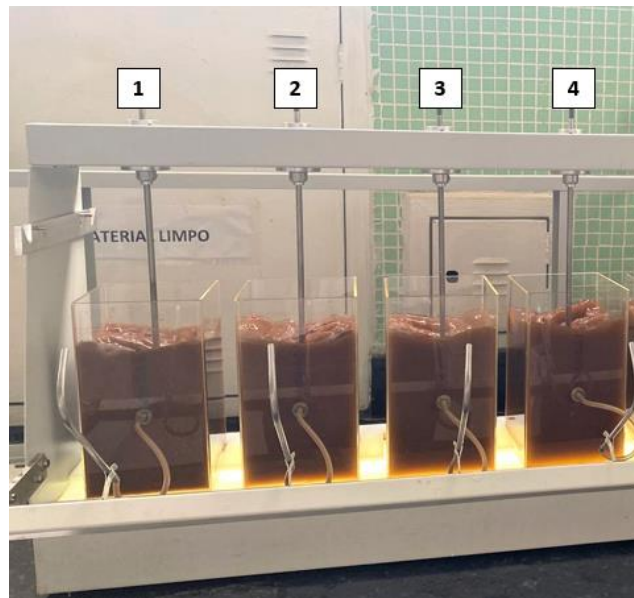
Foram realizados dois testes com diferentes coagulantes. Para o primeiro teste, o coagulante utilizado foi o *Tanfloc SG*, da marca Tanac S.A. Este coagulante foi escolhido por ser de origem essencialmente vegetal e atóxico (TANAC SA, 2022). O primeiro teste teve como objetivo determinar a dosagem ótima de coagulante.

Para a dosagem do coagulante a ser utilizada, foi feita uma solução de um grama por litro, sendo: um grama do coagulante *Tanfloc SG* para 1 litro de água destilada. Posteriormente, essa solução foi dividida em três diferentes dosagens do coagulante, sendo: 15 miligramas por litro, 25 miligramas por litro e 35 miligramas por litro.

Tendo em vista a capacidade das cubetas de dois litros, as dosagens de coagulantes foram corrigidas para: 30 mililitros na cubeta 1, 50 mililitros na cubeta 2 e 70 mililitros na cubeta 3. A cubeta 4 foi deixada sem coagulante, a fim de comparar a diferença da cubeta sem nenhuma dosagem de coagulante. Através dessa variação, foi possível identificar a necessidade do coagulante para o tratamento e sua melhor dosagem para alcance dos objetivos deste trabalho. As demais cubetas do *Jar Test*, 5 e 6, não foram utilizadas durante o primeiro Teste de Jarros.

A Figura 4.6 ilustra as quatro cubetas utilizadas durante a realização do primeiro Teste de Jarros.

Figura 4.6 - Primeiro Teste de Jarros.



Fonte: Autora (2021).

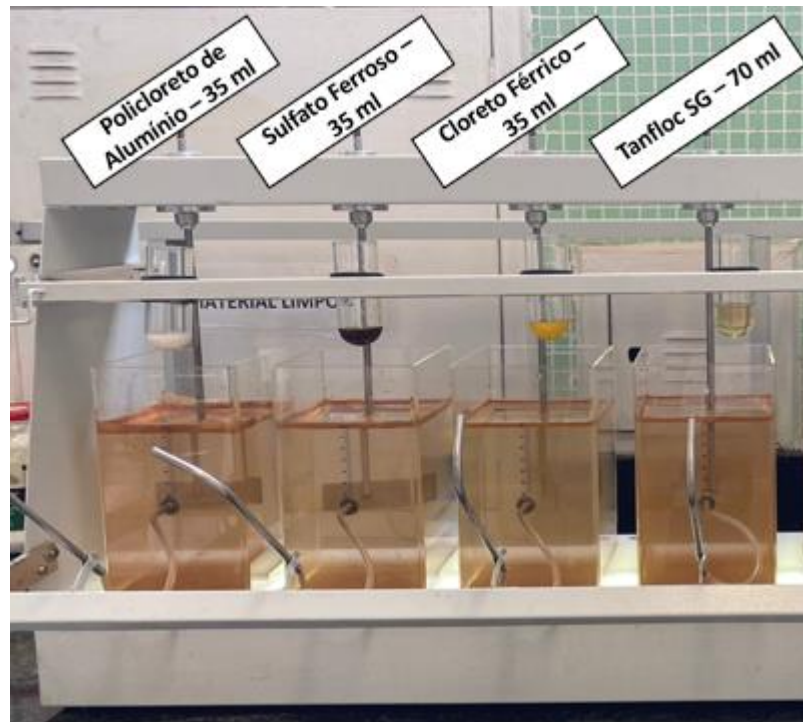
Em relação a operacionalidade do *Jar Test*, foram adotados os parâmetros de projeto segundo orientações da NBR 12.216/92, sendo eles: gradientes de mistura rápida de 1000 s^{-1} , tempo de mistura rápida de 5 s, gradientes de floculação de 70, 40 e 20 s^{-1} com tempo de detenção hidráulico de 10 min para cada gradiente. Após essas etapas, as amostras foram deixadas em repouso por 20 min para decantação da água. Em seguida, foram retiradas alíquotas de cada amostra para leitura de turbidez e comparação dos resultados obtidos.

O segundo Teste de Jarros, foi realizado a partir do resultado da ação do coagulante *Tanfloc SG*, oriundo do primeiro teste. Para ele, foram utilizados coagulantes de origem industrial e natural. Nas três primeiras cubetas do *Jar Test*, foram utilizados, em soluções de 35 mililitros, os coagulantes Policloreto de Alumínio, Sulfato Ferroso e Cloreto Férrico, respectivamente.

Para a quarta cubeta, foi utilizada a solução de *Tanfloc SG* que obteve o melhor desempenho no primeiro Teste de Jarros, com concentração de 35 miligramas por litro, originando uma solução de 70 mililitros para a cubeta de dois litros.

A Figura 4.7 ilustra as quatro cubetas utilizadas durante a realização do segundo Teste de Jarros.

Figura 4.7 - Segundo Teste de Jarros.



Fonte: Autora (2021).

Após o segundo Teste de Jarros, foram realizadas medições de turbidez, utilizando o aparelho turbidímetro, para as amostras presentes nas quatro cubetas do *Jar Test*, a fim de se certificar em relação a eficiência de remoção de turbidez dos coagulantes utilizados.

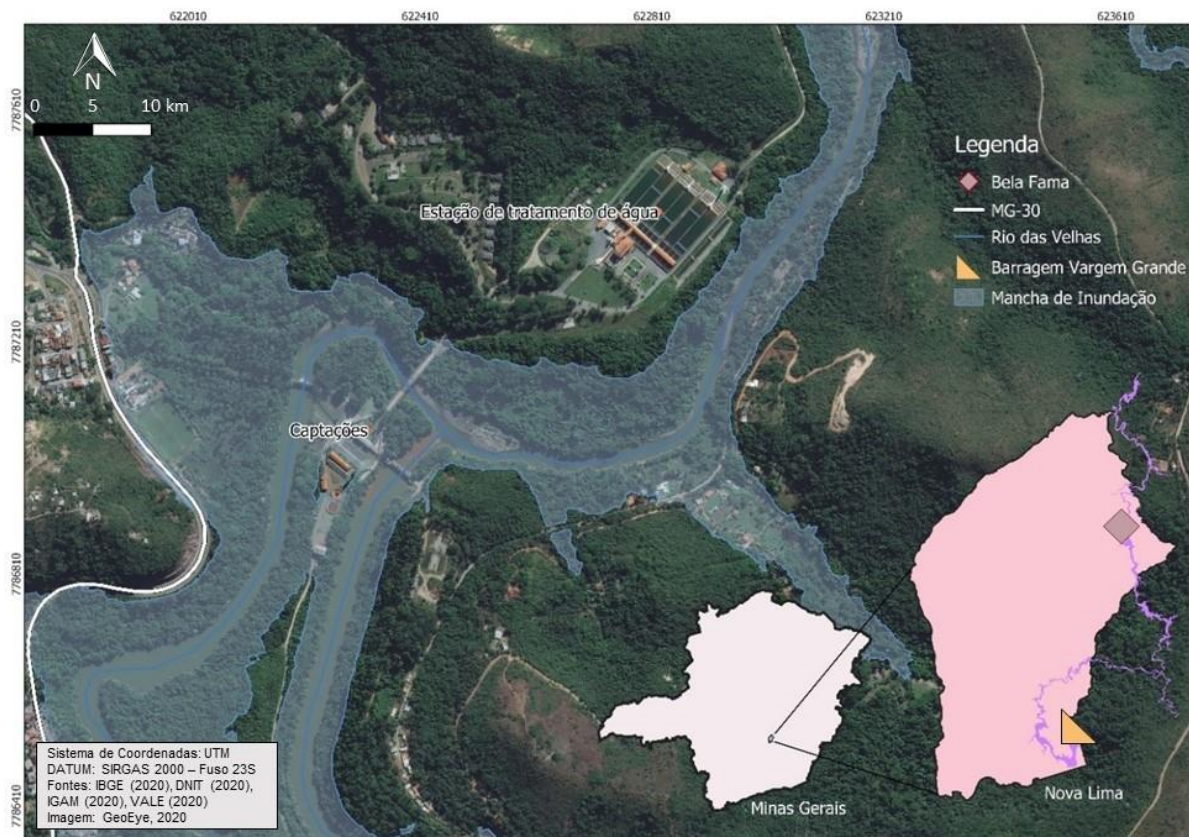
A amostra presente na cubeta que obteve o melhor resultado em relação a remoção de turbidez, foi encaminhada ao laboratório especializado para análise da qualidade da água, considerando alguns dos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 357/2005. Chamou-se essa amostra de A003.

5. RESULTADOS

5.1. Análise do Dam Break

A Figura 5.1, mostra parte da mancha de inundação da barragem em estudo. Pode-se perceber que a mancha não atinge a Estação de Tratamento de Água, denominada ETA Bela Fama, mas contamina o curso d'água de onde é feita a captação superficial de água para tratamento, o Rio das Velhas. Além de atingir a casa de máquinas do sistema de captação, o que poderá interromper o fornecimento de água para a ETA até que medidas sejam tomadas para à correção dos problemas causados no sistema de bombeamento, bem como da ponte de acesso ao sistema de captação e desidratação de lodo, comportas de barramento e comportas de direcionamento de água superficial para um dos braços de captação no Rio das Velhas.

Figura 5.1 - Localização da ETA Bela Fama e Mancha de Inundação.



Fonte: Autora (2021).

Além do sistema de captação, sua mancha de inundação atingiria, de imediato, dois municípios, sendo eles Nova Lima e Rio Acima, considerados Zonas de Autossalvamento – ZAS. Após atingir os municípios citados, a mancha de inundação iria em direção a 8 municípios,

abrangendo Raposos, Sabará, Belo Horizonte, Santa Luzia, Vespasiano, Lagoa Santa, Jaboticatubas e Pedro Leopoldo, considerados Zonas de Segurança Secundária – ZSS. Além disso, o estudo de *Dam Break* dessa estrutura nos mostra que em sua Zona de Autossalvamento residem aproximadamente 151 pessoas, 221 animais e possui um total de 84 habitações.

Considerando os impactos ambientais provenientes do hipotético rompimento da estrutura em estudo, a garantia do abastecimento de água para as comunidades afetadas é um fator preocupante, tendo em vista, a contaminação dos cursos d'água e captações superficiais pelo rejeito contido nas barragens.

O Sistema de Abastecimento de Água do Rio das Velhas, onde está localizada a Estação de Tratamento de Água Bela Fama, é o maior sistema de produção individual de água da COPASA (COPASA, 2016). Segundo informações obtidas através da análise do *Dam Break* da estrutura em estudo no presente trabalho, a distância da barragem até à ETA Bela Fama é de aproximadamente 50 km, e o tempo calculado para a chegada da mancha de inundação neste local é de 3 horas e 48 minutos.

Considerando a contaminação do Rio das Velhas, parte do Sistema de Abastecimento de Água do Rio das Velhas estaria prejudicado e, com isso, o município de Nova Lima enfrentaria sérios problemas em relação ao abastecimento de água de sua população. Além disso, os impactos se estenderiam a toda Região Metropolitana de Belo Horizonte, que possui 40% de seu abastecimento de água oriundo desse sistema, atendendo a aproximadamente dois milhões de pessoas.

5.2. Resultados das Ações dos Coagulantes Utilizados – Testes de Jarros

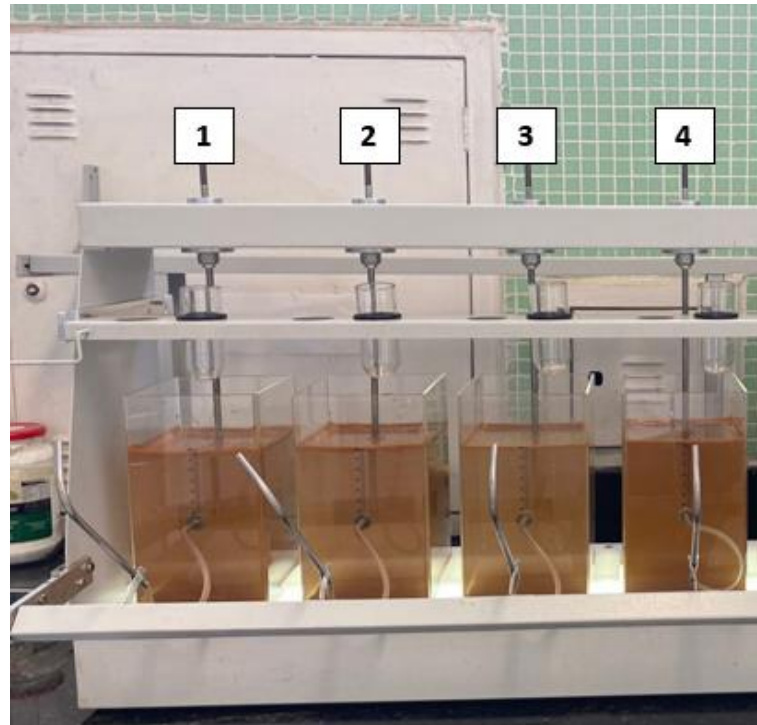
5.2.1. Primeiro Teste de Jarros

A Figura 5.2 apresenta o resultado do primeiro Teste de Jarros, realizado com uso do coagulante *Tanfloc SG*, adicionado as cubetas 1, 2 e 3, em concentrações distintas. Antes de realizar o primeiro teste, o pH da amostra A002 foi medido e certificou-se de que ele estava na faixa neutra, sendo igual a 7,11.

Vale ressaltar, que a turbidez da amostra A002 após a mistura com 4 kg de rejeito de mineração de ferro, alcançou valores próximos a 1000 NTU, atingindo o limite de leitura do turbidímetro utilizado para medição. Após essa mistura, a amostra foi deixada em decantação por 10

minutos. Em seguida, considerou-se apenas o líquido sobrenadante e mediu-se novamente sua turbidez, onde apresentou o valor de 472 NTU e, utilizando essa amostra realizou-se o primeiro Teste de Jarros.

Figura 5.2 - Resultado do Primeiro Teste de Jarros.



Fonte: Autora (2021).

Através da Figura 5.3, é possível visualizar a olho nu a ação desse coagulante em relação a remoção de turbidez, onde as cubetas 1, 2 e 3 apresentam-se com a cor um pouco mais clara do que a cubeta 4, onde não havia a presença do coagulante. Isso pode ser comprovado através do resultado das medições de turbidez de todas as cubetas antes e depois do primeiro Teste de Jarros, apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Eficiência de Remoção de Turbidez Após o Primeiro Teste de Jarros.

Cubeta	Coagulante	Turbidez Antes (NTU)	Turbidez Depois (NTU)	Eficiência de Remoção (%)
1	Tanfloc SG - 30 ml	472	198	58
2	Tanfloc SG - 50 ml	472	156	67
3	Tanfloc SG - 70 ml	472	131	72
4	Nenhum	472	252	47

Fonte: Autora (2021).

Analisando os resultados obtidos, percebe-se que a cubeta 3, da qual passou pela ação da maior quantidade do coagulante *Tanfloc SG*, em solução de 70 mililitros, obteve a melhor eficiência de remoção de turbidez, alcançando 72%.

Além disso, é possível perceber através dos resultados apresentados, que quanto maior a quantidade de solução do coagulante *Tanfloc SG* adicionada ao tratamento da amostra, maior foi a remoção de turbidez. Porém, a remoção obtida apenas com o uso deste coagulante, nas diferentes concentrações e soluções utilizadas, não foi o suficiente para que a amostra se enquadrasse aos padrões de lançamento da resolução vigente, CONAMA N° 357/2005, onde estabelece um limite de 100 NTU para os corpos hídricos enquadrados na Classe 2.

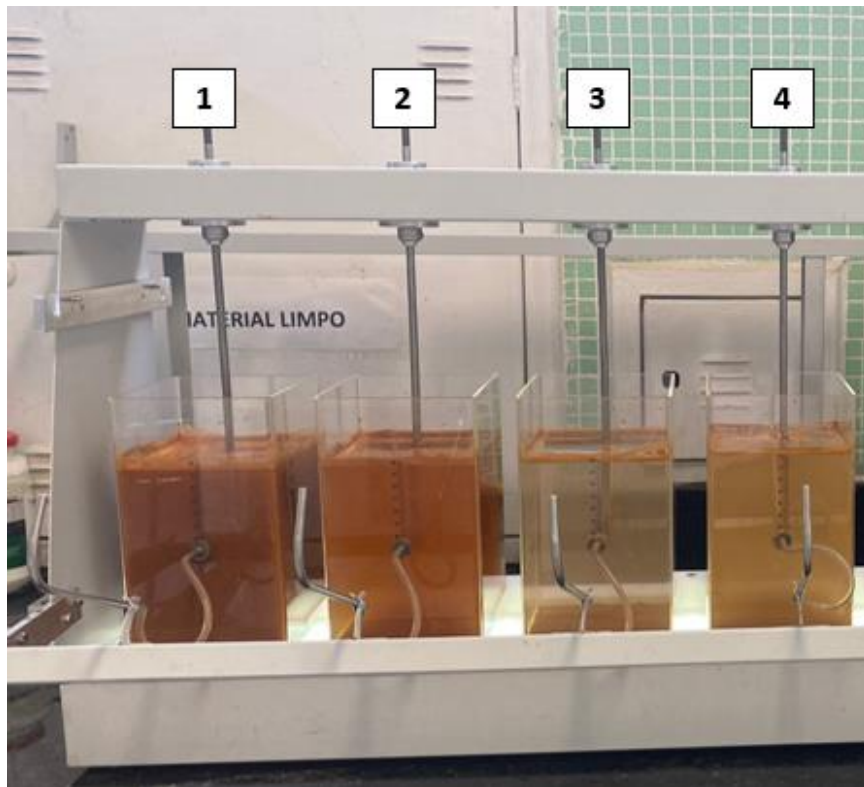
Em contrapartida, estudos realizados utilizando o coagulante *Tanfloc SG* mostram-se bastante eficientes em relação à remoção de turbidez, como é o caso do estudo realizado por Leal *et al.* (2019), onde utilizou-se o *Tanfloc SG* para redução de turbidez da água bruta da ETA Santana de Parnaíba e obtiveram reduções de aproximadamente 20 NTU para 1,5 NTU. Este estudo ainda menciona sobre as vantagens em se utilizar este coagulante, como a redução dos riscos ambientais, aumento da eficiência dos filtros, menor geração de lodo, redução de turbidez e cor aparente da água bruta (LEAL *et al.*, 2019).

5.2.2. Segundo Teste de Jarros

O segundo Teste de Jarros foi realizado após análise do melhor resultado oriundo do primeiro Teste de Jarros, onde as três primeiras amostras já haviam sofrido a ação do coagulante *Tanfloc SG*, e a quarta amostra estava sem coagulante.

Para o segundo teste, utilizou-se três tipos de coagulantes industrializados, dispostos nas cubetas 1, 2 e 3, em soluções de 35 mililitros, sendo Policloreto de Alumínio, Sulfato Ferroso e Cloreto Férrico, respectivamente. Além destes, na cubeta 4, utilizou-se uma solução de 70 mililitros do coagulante *Tanfloc SG*, de origem natural. Esta solução de *Tanfloc SG*, foi utilizada novamente por obter o melhor desempenho em relação à remoção de turbidez durante o primeiro Teste de Jarros. A Figura 5.3 apresenta os resultados obtidos através do segundo Teste de Jarros.

Figura 5.3 - Resultado do Segundo Teste de Jarros.



Fonte: Autora (2021).

Através do segundo Teste de Jarros, pôde-se perceber a ação de todos os coagulantes empregados e avaliar sua efetividade. Os coagulantes utilizados nas cubetas 1 e 2, Policloreto de Alumínio e Sulfato Ferroso, visualmente não obtiveram bons resultados em relação a remoção de turbidez e diminuição da cor aparente.

O coagulante natural, *Tanfloc SG*, utilizado em solução de 70 ml na cubeta 4, cubeta da qual não teve a ação de nenhum coagulante durante o primeiro Teste de Jarros, obteve uma eficiência de 65% de remoção de turbidez.

Por fim, o Cloreto Férrico, coagulante industrializado empregado à cubeta 3, apresentou uma eficiência de remoção de turbidez de 82%, considerada a melhor eficiência obtida no segundo Teste de Jarros. Através da ação desse coagulante, a turbidez passou de 472 para 87 NTU, enquadrando-se aos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 357/2005.

Vale ressaltar, que durante o segundo Teste de Jarros, as partículas sólidas que haviam se sedimentado no primeiro teste foram ressuspensas. Portanto, considerou-se como turbidez inicial o valor de 472 NTU, conforme considerado também no primeiro teste.

A Tabela 5.2 apresenta a eficiência de remoção de turbidez após a realização do segundo Teste de Jarros, para as quatro cubetas utilizadas.

Tabela 5.2 – Eficiência de Remoção de Turbidez Após o Segundo Teste de Jarros.

Cubeta	Coagulante	Turbidez Antes (NTU)	Turbidez Depois (NTU)	Eficiência de Remoção (%)
1	<i>Tanfloc SG</i> 30 ml + Policlureto de Alumínio 35 ml	472	395	16
2	<i>Tanfloc SG</i> 50 ml + Sulfato Ferroso 35 ml	472	307	35
3	<i>Tanfloc SG</i> 70 ml + Cloreto Férrico - 35 ml	472	87	82
4	Apenas <i>Tanfloc SG</i> - 70 ml	472	165	65

Fonte: Autora (2021).

5.3. Resultados das Análises da Qualidade da Água

Em relação as análises da qualidade da água, foram encaminhadas para laboratório especializado três amostras distintas, sendo:

- A001: Água superficial coletada no Rio das Velhas, diretamente no ponto de captação da ETA Bela Fama;
- A002: Água superficial coletada no Rio das Velhas misturada com 4 kg de rejeito de minério de ferro;
- A003: Amostra A002 após tratamento com uso dos coagulantes *Tanfloc SG* (70 ml) e Cloreto Férrico (35 ml);

Na Tabela 5.3, têm-se os resultados da análise da qualidade da água para as três amostras definidas neste trabalho, de acordo com alguns dos parâmetros estabelecidos pelas legislações vigentes.

Tabela 5.3 - Resultado das Análises da Qualidade da Água.

PARÂMETROS	UNIDADE	A001	A002	A003
Alumínio Dissolvido	mg/L Al	0,30	0,17	<0,02
Arsênio Total	mg/L As	0,001	<0,001	<0,001
Cádmio Total	mg/L Cd	<0,001	<0,001	<0,001
Chumbo Total	mg/L Pb	<0,01	<0,01	<0,01
Cobre Dissolvido	mg/L Cu	<0,009	<0,009	<0,009
Condutividade Elétrica	µS/cm	48,2	50,3	56,3
Cor Verdadeira	mg Pt/L	44	<10	<10
Cromo Total	mg/L Cr	<0,01	<0,01	<0,01
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L O ₂	4,87	<3	3,49
Escherichia Coli	NMP/100mL	6000	-	<1
Ferro Dissolvido	mg/L Fe	0,53	<0,1	6,26
Ferro Total	mg Fe/L	2,03	8,26	6,80
Fósforo Total	mg/L P	0,11	3,05	0,12
Manganês Total	mg/L Mn	0,31	1,76	1,74
Merúrio Total	mg/L Hg	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Níquel Total	mg/L Ni	<0,01	<0,01	<0,01
Nitrogênio Total	mg N/L	0,8	0,6	0,6
pH	-	7,49	7,35	7,47
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L SDT	54,0	20,3	31,7
Sólidos Sedimentáveis	ml/L	<0,3	0,50	<0,3
Sólidos Suspensos Totais	mg SST/L	128	1419	71,7
Sólidos Totais	mg ST/L	182	1439	103
Turbidez	NTU	241	1000	87
Zinco Total	mg/L Zn	<0,02	<0,02	0,10

Fonte: Autora (2021).

5.3.1. Comparação entre as amostras A001 e A002

Pode-se perceber que a amostra A001, referente à água bruta do Rio das Velhas antes da suposta contaminação por rejeito de mineração de ferro, já apresentava elevados índices de turbidez, enquadrando-se fora dos parâmetros estabelecidos pela resolução vigente, onde o limite é de 100 NTU. Porém, sabe-se que isto se deu devido ao período chuvoso no qual a amostra foi coletada e que, em condições normais, o Rio das Velhas apresenta turbidez dentro dos limites determinados pela legislação.

Após a adição do rejeito, amostra A002, a turbidez passou de 241 NTU para 1000 NTU. Sabe-se que a turbidez é o parâmetro do qual nos possibilita medir o espalhamento de luz oriundo da presença de partículas em suspensão ou coloidais e, além disso, é causada pela presença de materiais sólidos em suspensão. Isso explica o aumento exponencial da turbidez após a adição do rejeito à amostra.

A adição de rejeito à amostra também contribuiu significativamente para o aumento de parâmetros como os sólidos totais, sólidos suspensos totais e sólidos sedimentáveis. A concentração de sólidos suspensos influencia diretamente a turbidez, pois dificulta a penetração de luz à água (CHAGAS, 2015). Problemas como assoreamento de barragens e reservatórios, arraste de nutrientes e contaminantes, e a degradação de ambientes aquáticos estão associados ao transporte de sedimentos (CARRERAS, 2010).

Considerando os metais presentes e analisados nessas amostras, têm-se o alumínio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, ferro, manganês, mercúrio, níquel e zinco. Com a adição do rejeito, pode-se notar mudanças em relação as quantidades de alumínio e ferro dissolvido, que diminuíram. Já em relação a quantidade de manganês e ferro total presentes na amostra, teve-se um aumento após a adição do rejeito, passando de 0,31 para 1,76 mg/L e 2,03 para 8,26 mg/L, respectivamente. Isto pode ser explicado devido à presença de manganês e ferro na composição do rejeito de minério de ferro.

5.3.2. Comparação entre as amostras A002 e A003

Sabe-se que a amostra A002 é a junção da amostra A001, que corresponde à água superficial do Rio das Velhas, com 4 kg de rejeito de mineração de ferro. Além disso, sabe-se que a amostra A003 refere-se ao resultado obtido após o tratamento de água feito na amostra A002, obtido após os testes de coagulação e utilização de dois coagulantes distintos, o *Tanfloc SG* e o Cloreto Férrico.

Após a utilização desses coagulantes, a turbidez diminuiu significativamente, passando de 1000 para 87 NTU. Essa diminuição foi o suficiente para que a amostra A003 se enquadrasse nos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005, para corpos hídricos Classe 2.

Além da turbidez, foi possível observar uma diminuição relevante dos parâmetros de sólidos suspensos totais e sólidos totais, passando de 1.419 para 71,7 mg/L e 1.439 para 103 mg/L, respectivamente. Já em relação ao parâmetro de sólidos dissolvidos totais, este apresentou-se com um aumento de 20,3 para 31,7 mg/L. Este aumento se deve, possivelmente, ao coagulante que não se dissolveu totalmente na amostra tratada, ou da desestabilização e consequente ressuspensão de coloides causada pela adição dos coagulantes.

Em relação a presença dos metais, após o tratamento da amostra, pode-se observar uma diminuição de parâmetros como o alumínio dissolvido, passando de 0,17 para <0,02 mg/L, ferro total, passando de 8,26 para 6,80 mg/L e manganês total, passando de 1,76 para 1,74 mg/L. Já em relação ao ferro dissolvido, obteve-se um aumento após a ação do coagulante, passando de <0,1 para 6,26 mg/L. Isso ocorreu, possivelmente, devido a presença de ferro dissolvido no coagulante utilizado para o tratamento, o Cloreto Férrico.

Vale ressaltar, que o pH das amostras não sofreu alterações significativas durante o tratamento, permanecendo na faixa neutra, demonstrando assim que não haveria possibilidade de consumo de produtos químicos para manutenção do pH do meio durante o processo de coagulação.

5.4. Discussões em Relação ao Tratamento de Água e Enquadramento às Legislações

5.4.1. Enquadramento aos Padrões de Lançamento Estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005

Visando a aplicação de técnicas de tratamento à amostra A002, que se refere à mistura da água superficial coletada no Rio das Velhas com o rejeito de mineração de ferro, o presente trabalho empregou as etapas de coagulação, floculação e decantação, visando a remoção de turbidez e consequentemente metais e microrganismos.

Dentre os testes realizados, optou-se por enviar para análise laboratorial, a luz da Resolução CONAMA N° 357/2005, a amostra que obteve melhor resultado na remoção de turbidez após ação dos coagulantes, à amostra A003.

A análise da amostra A003, levou em consideração os seguintes parâmetros: alumínio dissolvido, arsênio total, cádmio total, chumbo total, cobre dissolvido, condutividade elétrica, cor verdadeira, cromo total, demanda bioquímica de oxigênio, *escherichia coli*, ferro dissolvido, ferro total, fósforo total, manganês total, mercúrio total, níquel total, nitrogênio total, pH, sólidos dissolvidos totais, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos totais, sólidos totais, turbidez e zinco total. A escolha desses parâmetros se deu devido a possibilidade de alteração considerando a adição do rejeito à água.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos após a aplicação dos coagulantes *Tanfloc SG* e Cloreto Férrico e sua comparação aos padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005, para corpos hídricos Classe 2.

Tabela 5.4 - Comparação dos Resultados Obtidos Através da Análise da Amostra A003 e os Padrões de Lançamento Estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005.

PARÂMETROS	UNIDADE	CONAMA 357 (VMP)	A003
Alumínio Dissolvido	mg/L Al	0,1	<0,02
Arsênio Total	mg/L As	0,01	<0,001
Cádmio Total	mg/L Cd	0,001	<0,001
Chumbo Total	mg/L Pb	0,01	<0,01
Cobre Dissolvido	mg/L Cu	0,009	<0,009
Cor Verdadeira	mg Pt/L	75	<10
Cromo Total	mg/L Cr	0,05	<0,01
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L O ₂	5	3,49
Escherichia Coli	NMP/100mL	1000	<1
Ferro Dissolvido	mg/L Fe	0,3	6,26
Fósforo Total	mg/L P	0,05	0,12
Manganês Total	mg/L Mn	0,1	1,74
Mercúrio Total	mg/L Hg	0,0002	<0,0002
Níquel Total	mg/L Ni	0,025	<0,01
pH	-	6-9	7,47
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L SDT	500	31,7
Turbidez	NTU	100	87
Zinco Total	mg/L Zn	0,18	0,10

*VMP = Valores Máximos Permitidos.

Fonte: Autora (2021).

Analisando os dados obtidos acima, percebe-se que em relação aos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005 para os corpos hídricos Classe 2, à amostra A003 enquadrou-se em 15 dos 18 parâmetros, sendo eles: alumínio dissolvido, arsênio total, cádmio total, chumbo total, cobre dissolvido, cor verdadeira, cromo total, demanda bioquímica de oxigênio, *escherichia coli*, mercúrio total, níquel total, pH, sólidos dissolvidos totais, turbidez e zinco total.

Em relação aos parâmetros de ferro dissolvido e manganês total, à amostra A003 obteve valores acima dos limites estabelecidos, o que se faz necessário a aplicação de outras etapas ou tecnologias de tratamento para se enquadrar aos padrões estabelecidos pela resolução vigente.

Entre as tecnologias existentes para a remoção de metais em águas, têm-se a oxidação e, em sequência, etapas para a remoção do precipitado formado. Vale ressaltar, que a oxidação química do ferro é uma condição necessária para o tratamento, pois diminui a concentração solúvel do metal, o que facilita e proporciona sua remoção em etapas de tratamento que

empregam a separação sólido/líquido (MORUZZI e REALI, 2012). Em sequência, a remoção dos precipitados formados pode ser feita através da filtração, sedimentação ou flotação.

Estudos realizados por Oliveira *et al.* (2019), apresentam resultados satisfatórios sobre o uso da fitorremediação na remoção de metais de águas contaminadas por rejeito de mineração de ferro. Este estudo usou como base o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana – MG, e analisou o potencial de uma macrófita aquática, a espécie *Salvinia auriculata*, em remover metais como ferro, manganês e alumínio. Foram realizados dois experimentos distintos, onde no primeiro a *Salvinia auriculata* apresentou eficiência média de 31,10%, 67,68% e 68,52% para remoção dos metais ferro, manganês e alumínio, enquanto no segundo apresentou eficiência média de remoção de 36,4%, 70,3% e 44,07%, respectivamente.

Outro parâmetro que não se enquadrou aos limites estabelecidos pela resolução vigente foi o fósforo total. Este nutriente, em grandes quantidades, pode causar uma proliferação desenfreada de algas, o que diminui consideravelmente o nível de oxigênio para os seres vivos aquáticos presentes no corpo hídrico.

Para a remoção de fósforo total e enquadramento da amostra aos padrões da Resolução CONAMA N° 357/2005, pode-se empregar processos de tratamentos físicos, químicos ou biológicos. Uma ótima opção para a remoção de fósforo é o uso da filtração associada a materiais adsorventes, como areia, carvão ativado e brita. Esta técnica possui boa eficiência de remoção e foi comprovada através de estudo realizado por Fangmeier, Gennari e Reisdorfer (2015), onde utilizou-se dois filtros contendo carvão ativado, areia e brita, e obteve-se após a filtração, reduções de 18,73% e 16,41%, respectivamente. Além disso, a filtração é uma técnica de baixo custo e alta disponibilidade dos recursos necessários.

5.4.2. *Enquadramento aos Padrões Estabelecidos pela Portaria N° 888/2021*

Em relação ao enquadramento aos padrões estabelecidos pela Portaria N° 888/2021, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, a Tabela 5.5 nos traz a comparação da amostra A003 em relação a alguns dos padrões e limites máximos estabelecidos por essa Portaria, dos quais foram analisados no presente trabalho.

Tabela 5.5 - Comparação dos Resultados Obtidos Através da Análise da Amostra A003 e os Padrões de Potabilidade Estabelecidos pela Portaria N° 888/2021.

PARÂMETROS	UNIDADE	PORTARIA 888 (VMP)	A003
Alumínio Dissolvido	mg/L Al	0,2	<0,02
Arsênio Total	mg/L As	0,01	<0,001
Cádmio Total	mg/L Cd	0,003	<0,001
Chumbo Total	mg/L Pb	0,01	<0,01
Cobre Dissolvido	mg/L Cu	2	<0,009
Cor Verdadeira	mg Pt/L	15	<10
Cromo Total	mg/L Cr	0,05	<0,01
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L O ₂	NA	3,49
Escherichia Coli	NMP/100mL	Ausente	<1
Ferro Total	mg/L Fe	0,3	6,8
Fósforo Total	mg/L P	NA	0,12
Manganês Total	mg/L Mn	0,1	1,74
Mercúrio Total	mg/L Hg	0,001	<0,0002
Níquel Total	mg/L Ni	0,07	<0,01
pH	-	6-9	7,47
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L SDT	500	31,7
Turbidez	NTU	5	87
Zinco Total	mg/L Zn	5	0,10

*VMP = Valores Máximos Permitidos.

Fonte: Autor (2021).

Através dos resultados obtidos pela análise da qualidade da água da amostra A003, dos 18 parâmetros analisados, a amostra enquadrando-se em 14. Entre os parâmetros que se mostraram fora dos limites estabelecidos pela Portaria N° 888/2021, têm-se *escherichia coli*, ferro total, manganês total e turbidez.

Após a aplicação dos coagulantes utilizados neste trabalho, *Tanfloc SG* e Cloreto Férrico, apesar de apresentarem boas eficiências em relação à remoção de turbidez, tal eficiência não foi efetiva para atendimento à Portaria N° 888/2021, no qual o limite estabelecido para turbidez é de 5 NTU. Para que a amostra se enquadre a este limite, faz-se necessário a aplicação de outras etapas de tratamento de água.

Além da Turbidez, os metais ferro e manganês, apresentaram-se acima dos limites máximos permitidos pela Portaria N° 888/2021. Sabe-se que a presença de ferro, acima dos níveis permitidos, é responsável pelo aparecimento de gosto e odor à água, além de possibilitar o aparecimento de bactérias ferruginosas nocivas às redes de abastecimento, que ainda provocam a coloração avermelhada na água. Além disso, o excesso de ferro no organismo pode causar

diversos problemas relacionados à saúde humana, como cirrose, diabetes, insuficiência cardíaca e até mesmo problemas em relação a produção hormonal (SPDM, 2014).

Estudos realizados por Queiroz *et al.* (2021) mostram que o excesso de manganês no organismo pode comprometer o sistema nervoso central e causar doenças neurodegenerativas, como Parkinson e Alzheimer. Este estudo foi realizado devido a grande quantidade de rejeitos de mineração de ferro que foram depositados no Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana – MG. Segundo Queiroz *et al.* (2021), após o rompimento, com o tempo o manganês ia se dissociando dos rejeitos e se diluindo na água, o que aumentava consideravelmente sua concentração no corpo hídrico.

Tendo em vista a remoção desses metais presentes na água, recomenda-se aprimorar o tratamento de água com a inserção de etapas que visem a remoção desses metais, quais sejam, a oxidação, adsorção com carvão ativado, ou até mesmo a fitorremediação, considerada sustentável e de baixo custo.

Por fim, outro parâmetro que se apresentou acima dos limites estabelecidos foi a *escherichia coli*. Esta bactéria é considerada como o principal indicador de poluição fecal nas águas. Para sua remoção, pode-se aplicar a desinfecção química, utilizando cloro ou dióxido de cloro, por exemplo.

6. CONCLUSÃO

Com base no trabalho realizado, verificou-se que a hipotética contaminação de água por rejeitos oriundos da mineração de ferro, contribuiu de forma negativa em relação as características da água natural. Tal contribuição, afetou significativamente alguns dos parâmetros estabelecidos pelas resoluções vigentes, no que tange ao lançamento de efluentes nos corpos hídricos e potabilidade da água para consumo humano.

Entre as principais mudanças das características da água após a adição do rejeito de mineração de ferro, teve-se o aumento de metais como o ferro e o manganês, que podem acarretar sérios problemas de saúde, quando apresentam-se em excesso no organismo humano; o aumento de nutrientes como o fósforo, podendo causar eutrofização nos corpos hídricos; e o aumento significativo de outros parâmetros como turbidez e sólidos dissolvidos totais, que provocam diminuição do oxigênio e da penetração da luz na água, o que reduz a fotossíntese dos organismos.

O tratamento de água realizado com o uso do equipamento *Jar Test*, aplicando-se dosagens dos coagulantes *Tanfloc SG* e Cloreto Férrico em dois diferentes testes de jarros, trouxeram resultados positivos em relação a remoção de turbidez e sólidos. Porém, o resultado obtido não foi o suficiente para enquadrar a amostra aos padrões de lançamento de efluentes e potabilidade da água para consumo humano, estabelecidos pelas resoluções CONAMA N° 357/2005 e Portaria N° 888/2021, respectivamente.

Em relação à análise do *Dam Break* da barragem em estudo, concluiu-se que sua mancha de inundação atingiria parte do Sistema de Abastecimento de Água do Rio das Velhas, no que tange a sua captação superficial. Dessa forma, a Estação de Tratamento de Água Bela Fama, não será atingida em caso de rompimento real dessa estrutura. Porém, o comprometimento do Rio das Velhas pela contaminação por rejeitos de mineração de ferro, traria grandes impactos ao abastecimento e uso da água em Nova Lima e toda a Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Por fim, visando propor alternativas sustentáveis e de baixo custo para o tratamento de águas contaminadas por rejeito de mineração de ferro e atendimento às legislações vigentes, faz-se necessária a adição de etapas complementares ao tratamento, visando principalmente a remoção dos metais ferro e manganês.

7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se a checagem anual da lista de barragens enquadradas em Níveis de Emergência, disponibilizada pela Agência Nacional de Mineração - ANM. Além disso, deve-se avaliar anualmente o estudo de *Dam Break* da estrutura em questão, para se certificar de que não houve alterações em relação à mancha de inundação e corpos hídricos afetados pelo hipotético rompimento da estrutura.

Em relação a coleta de água superficial, para obtenção de melhores resultados, recomenda-se realizar a coleta fora do período chuvoso, para não ser impactado devido as alterações na qualidade da água causadas pelas chuvas.

Os dados obtidos através da ação dos coagulantes utilizados no presente trabalho foram satisfatórios para a remoção de Turbidez e Sólidos. Porém, para a remoção de metais como o Ferro e o Manganês, presentes na composição dos rejeitos de mineração de ferro, recomenda-se a aplicação de técnicas de tratamento de água voltadas à remoção de metais, como a oxidação e a fitorremediação.

Por fim, em relação aos padrões de lançamento de efluentes e padrões de potabilidade da água, deve-se acompanhar as atualizações pertinentes e considerar somente as resoluções vigentes.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 12.216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ANDRADE, L.C.R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

ARAÚJO, C. B. (2006). **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Relatório de Segurança de Barragens 2015**. Brasília: Agência Nacional de Águas. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR. Brasília/DF: 2015.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Classificação Nacional de Barragens de Mineração**. Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração. 2021. Disponível em: <<https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem>>. Acesso em: 08 jul. 2021.

ARAGÃO, A. **Tratamento de água: etapas do sistema convencional**. Canteiro de Engenharia. 2020. Disponível em: <<https://canteirodeengenharia.com.br/2020/07/08/tratamento-de-agua/>>. Acesso em: 06 fev. 2022.

ARATROP – A ARTE DA QUÍMICA. **Policloreto de Alumínio Industrial**. Disponível em: <<http://www.aratrop.com.br/conteudo/policloreto-de-aluminio.html>>. Acesso em: 27 dez. 2021.

BAUMGARTNER, J.R., SOUZA, K.F., VALA, L., NETO, N.A.P., e LIMA, P.M.O. **Jar Test**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2013. Disponível em: <<https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2008/11/relatorio-jar-test.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

BRASIL. **Decreto Nº 10.282, de 20 de março de 2020**. Regulamenta a Lei nº 13.979, de 6 de fevereiro de 2020, para definir os serviços públicos e as atividades essenciais. Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10282.htm>. Acesso em: 05 ago. 2021.

BRASIL. **Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais [...]. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2010/lei-12334-20-setembro-2010-608607-publicacaooriginal-129691-pl.html>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

BRASIL. **PORTARIA Nº 70.389, de 17 de maio de 2017.** Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração [...]. Brasília, DF: Diretor-Geral do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPN, 2017. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/20222904/do1-2017-05-19-portaria-n-70-389-de-17-de-maio-de-2017-20222835>. Acesso em: 14 ago. 2021.

BRASIL. **PORTARIA GM/MS Nº 888, de 04 de maio de 2021.** Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF: Ministro do Estado da Saúde, 2021. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre 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. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfda_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2021.

CARDOSO, F.A.C., PIMENTA, M.M. e ZINGANO, A.C. **Métodos Construtivos de Barragens de Rejeitos de Mineração.** 2016. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5367/pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

CARDOZO, F.A.C. e RUYER, C.A. **Projeto Conceitual de Barragem de Rejeito e Avaliação de Estabilidade.** 2019. XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul. Disponível em: <<https://conferencias.ufsc.br/index.php/geosul2019/2019geosul/paper/view/126/203>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

CARRERAS, N. M. et al. **The use of sediment colour measured by diffuse reflectance spectrometry to determine sediment sources: Application to the Atert River catchment (Luxembourg).** Journal of Hydrology, Luxembourg, v. 382, p. 49-63, 2010.

CARVALHO, N. **Brasil tem 46 barragens em situação de emergência, três delas com risco de rompimento iminente.** Brasil 61. 2022. Disponível em: <<https://brasil61.com/n/brasil-tem-46-barragens-em-situacao-de-emergencia-tres-delas-com-risco-de-rompimento-iminente-bras226504#:~:text=Ainda%20de%20acordo%20com%20a,e%20controladas%20pela%20em presa%20Vale.>>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

CBDB - COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no Brasil. Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens.** 524 p. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

CHAGAS, D. S. **RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS E**

TURBIDEZ DA ÁGUA MEDIDA COM SENSOR DE RETROESPALHAMENTO ÓPTICO. 2015. 78f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Bahia, 2015. Disponível em: <<https://www1.ufrb.edu.br/pgea/images/Teses/DENIZE-SAMPAIO-CHAGAS.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2022.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS – COPASA. **Dimensão Ambiental.** Belo Horizonte. 2016. Disponível em: <<http://www.copasa.com.br/media2/RelAnual2011/Copasa/ambiental.html>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

DUARTE, A. P. **CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO E DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NO ESTADO DE MINAS GERAIS EM RELAÇÃO AO POTENCIAL DE RISCO.** 2008. 130 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

FANGMEIER, M. GENNARI, A. e REISDORFER, G. **TRATAMENTO DE FÓSFORO EM EFLUENTE FINAL COM USO DE FILTRO DE CARVÃO ATIVADO, AREIA E BRITA.** Revista Destaques Acadêmicos, Vol. 7, N. 4, 2015. CETEC/UNIVATES. Disponível em: <<http://univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/502>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

FUSATI. **Desinfecção da Água.** Filtros e Tratamento de Água. 16 fev. 2021. Tratamento de Efluentes. Disponível em: <<https://www.fusati.com.br/desinfeccao-da-agua/#:~:text=Como%20C3%A9%20Feita%20a%20desinfec%C3%A7%C3%A3o%20da%20C3%81gua&text=Entre%20os%20m%C3%A9todos%20de%20desinfec%C3%A7%C3%A3o,%C3%A9%20a%20higieniza%C3%A7%C3%A3o%20da%20C3%A1gua.>>. Acesso em: 08 fev. 2022.

GANDRA, A. **Produção do setor mineral cresce 7% em 2021 e faturamento aumenta 62%.** Agência Brasil. Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2022-02/producao-do-setor-mineral-cresce-7-em-2021-e-faturamento-aumenta-62>>. Acesso em: 02 jan. 2022.

GAZOLLA, P. **CONHEÇA UM POUCO MAIS SOBRE AS BARRAGENS DE REJEITO.** Blog Minerajr. Ouro Preto – MG. 26 set. de 2019. Disponível em: <<https://minerajr.ufop.br/blog.texto26setembro.html>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

G1 - GLOBO. **Há 3 anos, rompimento de barragem de Mariana causou maior desastre ambiental do país e matou 19 pessoas.** São Paulo. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/ha-3-anos-rompimento-de-barragem-de-mariana-causou-maior-desastre-ambiental-do-pais-e-matou-19-pessoas.ghtml>>. Acesso em: 05 jan. 2022.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Lauda 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: 15 ago. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/novavila.html>>. Acesso em: 09 jul. 2021.

KAWAMURA, S. **Effectiveness of natural polyelectrolytes in water treatment**. Journal American Water Works Association, v. 83, n. 10, p. 88-91, 1991.

KOSSOFF, D., DUBBIN, W. E., ALFREDSSON, M., EDWARDS S. J., MACKLIN, M. G., & HUDSON-EDWARDS, K. A. (2014). **Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation**. Applied Geochemistry, 51, 229-245.

LAMBERT, L.F.M., SOARES, R.P.S. e CRISTINO, S. **Fitorremediação como solução para recuperação de solos contaminados pelo petróleo**. Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas, Tocantins, 2012. Disponível em: <<https://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/2322/1506>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

LEAL, F. S., NUNES, C. A., CARVALHO, W., OLIVEIRA, A.F. **Implantação de coagulante de alta performance à base de tanino para tratamento de água com foco na redução de turbidez da água bruta**. 2019. Portal Tratamento de Água. Disponível em: <<https://tratamentodeagua.com.br/artigo/coagulante-tanino-tratamento-agua-turbidez/>>. Acesso em: 08 fev. 2022.

LETTERMAN R. D., AMIRTHARAJAH A., O’MELIA C. R. **Coagulation and flocculation. Water Quality and Treatment**. New York, McGraw Hill, Inc., 6.1–6.66. 1999. LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2ª Edição. Campinas. Editora Átomo. 2008. 444 p.

LIMA, G. J. A. **Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto**. Dissertação de mestrado em engenharia ambiental, UERJ, Rio de Janeiro/RJ. 2007. 154p.

MARQUES, F. **Entenda o que é coagulante e qual sua função no tratamento de água**. Acquasolution. São José dos Campos/SP. Disponível em: <<https://acquablog.acquasolution.com/entenda-o-que-e-coagulante-e-qual-sua-funcao-no-tratamento-de-agua/#respond>>. Acesso em: 27 dez. 2021.

MICROAMBIENTAL. **Análise de Bactérias Coliformes na Água: por que fazer?** Análises de Água. Jan. 2021. Disponível em: <<https://microambiental.com.br/analises-de-agua/analise-de-bacterias-coliformes-na-agua-por-que-fazer/>>. Acesso em: 27 dez. 2021.

MORUZZI, R.B. e REALI, M.A.P. **OXIDAÇÃO E REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS EM ÁGUAS PARA FINS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO OU INDUSTRIAL – UMA ABORDAGEM GERAL**. Revista de Engenharia e Tecnologia. ISSN 2176-7270. 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/134886/ISSN2176-7270-2012-04-01-29-43.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 dez. 2021.

NATURALTEC. **ETA's – Reatores Físico – Químicos**. 2022. Disponível em: <<https://www.naturaltec.com.br/etas-compactas/>>. Acesso em: 08 fev. 2022.

NOVA LIMA, Prefeitura Municipal de Nova Lima. **PMSB – PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO DO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA/MG**. Caracterização Socioeconômica e Geoambiental, 2015. Disponível em: <https://novalima.mg.gov.br/uploads/legislacoes/OSA_2014-075_MJ_DIAGNOSTICO_PMSB_NOVA_LIMA-V1-CARACTERIZACAO-R2.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021

OLIVEIRA, D. M., CARA, D. V. C., XAVIER, P. G., PAULA, M. S., SOBRAL, L. G. S., LIMA, R. B. e LOUREIRO, A. **Fitorremediação: o estado da arte**. Rio de Janeiro: CETEM – MCT, 2006, 32 p. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/330/1/sta-39.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

OLIVEIRA, M., COSTA, J. F., SOUZA, T. D. e REIS, B. C. **USO DA FITORREMEDIAÇÃO NA REMOÇÃO DE METAIS DE ÁGUAS CONTAMINADAS POR REJEITOS DE MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, MARIANA-MG**. Encontro Técnico AESABESP. 30º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. 2019. Disponível em: <<https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2019/11/fitorremediacao-rejeitos-mineracao.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2021.

PAVANELLI, G. **EFICIÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE COAGULANTES NA COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO DE ÁGUA COM COR OU TURBIDEZ ELEVADA**. 2001. 223 f. Dissertação (Mestre em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

QUEIROZ, V. **Qual a Composição dos Rejeitos de Minério de Ferro?** CSC – Geologia e Engenharia. 2020. Disponível em: <<https://cscambiental.com.br/qual-a-composicao-dos-rejeitos-de-minerio-de-ferro/>>. Acesso em: 14 jul. 2021.

QUEIROZ, H. M., YING, S. C., ABERNATHY, M., BARCELLOS, D., GABRIEL, F. A., OTERO, X. L., NÓBREGA, G. N., BERNARDINO, A. F. e FERREIRA, T. O. **Manganese: The overlooked contaminant in the world largest mine tailings dam collapse**. Environment International, Volume 146, January 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016041202032239X?via%3Dihub>>. Acesso em: 05 jan. 2022.

ROSALINO, M. R. R. **Potenciais efeitos da presença de alumínio na água de consumo humano**. 2011. 65 p. Dissertação Mestrado.

ROSCILD, C. V. P. **Tratamento de Água**. [2021]. Apresentação (Disciplina de Mestrado – Sistemas Urbanos de Água). Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Rio Grande do Sul.

RUPPENTHAL, J. E. **Toxicologia**. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria - Rede e-Tec Brasil. Santa Maria, 2013.

SASSINE, V. **Laudo aponta que Rio Doce estará sujeito a condições imprevisíveis.** Jornal O Globo. 2015. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/brasil/laudo-aponta-que-rio-doce-estara-sujeito-danosimprevisiveis-18378346>>. Acesso em: 19 ago. 2021.

SCALIZE, P. S. **Tecnologias sociais de saneamento rural.** Tema 1 – Partes constituintes e tecnologias de tratamento de água. Saneamento Básico Rural. 2021. Disponível em: <https://publica.ciar.ufg.br/ebooks/saneamento-e-saude-ambiental/modulos/5_modulo_saneamento/02-1.html>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SCARPONG, G e RICHARDSON, C.P. **Coagulation efficiency of Moringa oleifera for removal of turbidity and reduction of total coliform as compared to aluminum sulfate.** African Journal of Agriculture Research. 2010. Vol 5. n° 21. 2939- 2944 p.

SEMAD. **PARECER ÚNICO Nº 321/2013 (SIAM: 2062754/2013).** Licença de Operação Corretiva, ETA Rio das Velhas. Belo Horizonte. 2013. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20161020042652/http://www.semad.mg.gov.br/images/stories/URCS_SupramCentral/RioVelhas/70/copasa-00138-1992-002-2011.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2021.

SILVA, E. L. SILVA, M.A. **Segurança de barragens e os riscos potenciais à saúde pública.** Rio de Janeiro, Jul. 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/sdeb/a/GxCcNJjsWLzNqmN9HbsFgqG/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 05 jul. 2021.

SKORONSKI, E.; NIERO, B.; FERNANDES, M.; ALVES, M. M.; TREVISAN, V. **Estudo da aplicação de tanino no tratamento de água para abastecimento captada no rio Tubarão, na cidade de Tubarão, SC. Ambiente e Água.** Vol. 9, Nº 4. 680-687 p. 2014.

SPDM – ASSOCIAÇÃO PAULISTA PARA O DESENVOLVIMENTO DA MEDICINA. Gestão em Saúde e Educação. **Acúmulo de ferro no corpo pode provocar danos aos órgãos.** 2014. Disponível em: <<https://www.spdm.org.br/imprensa/noticias/item/707-ac%3%BAculo-de-ferro-no-corpo-pode-provocar-danos-aos-%3%B3rg%C3%A3os#:~:text=%E2%80%9CO%20excesso%20de%20ferro%20pode,hormonal%E2%80%9D%2C%20explica%20a%20especialista.>>. Acesso em: 08 fev. 2022.

TANAC S.A. **Tanfloc SG.** Disponível em: <https://www.tanac.com.br/novo/wp-content/uploads/2021/06/CT_TANFLOC_SG_PT_0-1.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2021.

TZOUPANOS, N. D., ZOUBOULIS A. I. **Coagulation-flocculation processes in water/wastewater treatment: the application of new generation of chemical reagents.** 6th IASME/WSEAS. 309-317 p. 2008. Grécia. 2008.

VALE. **Reparação e Desenvolvimento. Segurança de Barragens.** [2021]. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/seguranca-de-barragens.aspx>. Acesso em: 12 ago. 2021.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água.** 3ª edição. Belo Horizonte: Imprimatur, 1997.

VOLTAN, P. **REMOÇÃO DE DIURON E HEXAZINONA POR MEIO DE ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO, OXIDAÇÃO E TRATAMENTO EM CICLO COMPLETO**. 2014. 286 f. Tese (Doutor em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da VALE**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. 107 p. 2009. (Dissertação Mestrado).