



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Gisele Verônica das Mercês Rocha

**AVALIAÇÃO DA QUITOSANA COMO COAGULANTE NA REDUÇÃO DA
TURBIDEZ DE EFLUENTES MINERÁRIOS**

Ouro Preto

2025

Gisele Verônica das Mercês Rocha

**AVALIAÇÃO DA QUITOSANA COMO COAGULANTE NA REDUÇÃO DA
TURBIDEZ DE EFLUENTES MINERÁRIOS**

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. D.Sc. Múcio André dos Santos Alves
Mendes

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R672a Rocha, Gisele Veronica das Mercês.

Avaliação da quitosana como coagulante na redução da turbidez de efluentes minerários. [manuscrito] / Gisele Veronica das Mercês Rocha. - 2024.

44 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Múcio André dos Santos Alves Mendes.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Turbidez. 2. Mineração. 3. Quitosana. 4. Coagulantes. 5. Jar Test. I. Mendes, Múcio André dos Santos Alves. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gisele Verônica das Mercês Rocha

Avaliação da Quitosana como Coagulante na Redução da Turbidez de Efluentes Minerários

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil.

Aprovada em 13 de agosto de 2024.

Membros da banca

Prof. Dr. Múcio André dos Santos Alves Mendes - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Ma. Paula Cristine Silva Gomes - Universidade Federal de Ouro Preto
Profa. Dra. Ana Letícia Pilz de Castro - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Múcio André dos Santos Alves Mendes - Orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/06/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Múcio André dos Santos Alves Mendes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/06/2025, às 16:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0936280** e o código CRC **95B41588**.

*“Tem que ser selado, registrado
Carimbado, avaliado, rotulado
Se quiser voar.”
— Raul Seixas*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Múcio Mendes, pela orientação valiosa, apoio contínuo e pela paciência ao longo de toda a realização deste trabalho.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, pelas suas contribuições e sugestões que enriqueceram a qualidade deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, agradeço pelo apoio e pelas discussões construtivas que ajudaram a esclarecer muitas dúvidas e a aprimorar as ideias apresentadas.

Ao Igor Alves pelo encorajamento constante e por acreditar em mim.

Por fim, agradeço a todos os profissionais e instituições que disponibilizaram os recursos necessários e forneceram dados importantes para a realização desta pesquisa.

A todos, meu mais profundo agradecimento!

RESUMO

As mineradoras apresentam, como resultados indiretos do processo de extração de minerais, elevadas observações de solo de baixa granulometria expostos, que, se não tratados, se apresentam como um potencial poluidor ao meio ambiente. O solo, uma vez expostos, são erodidos por meio do ar ou águas de chuva. Quando esse material é carregado via condução hídrica nos dias de chuva, elas tendem a escoar para locais de menor potencial gravitacional, como SUMPS e canaletas. Por consequência, a destinação final desse material, em sua menor parcela controlada, são os corpos hídricos comuns em áreas com riquezas minerais. Hoje, as mineradoras devem entregar a estes receptores um composto com observação de material particulado inferior ao limite de 100 NTU, valor estabelecido pela Resolução 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama, 2005). Para os reservatórios situados na região do Córrego Maquiné - MG, resultados preliminares acusam um elevado potencial de turbidez, razão pela qual foi pensada a utilização do coagulante natural, quitosana, para minoração das leituras de turbidez. Neste contexto, objetivou-se estudar como a quitosana, um composto fibroso natural, se comporta na redução da turbidez de águas mineradoras. Para tanto, foram feitos ensaios em laboratório no Jar Test, para distintas taxas de aplicação do coagulante, que posteriormente tiveram os dados analisados em software específico para delineamento de melhor proporção para esse fim. Neste estudo, foram realizados ensaios de bancada para determinar a eficiência da quitosana como coagulante no tratamento de águas com alta turbidez. Por meio dos testes, foi possível verificar que a redução de turbidez varia significativamente de acordo com as concentrações de quitosana e os níveis de pH. Os dados foram analisados utilizando o software estatístico Minitab, e um modelo de regressão foi ajustado para identificar as condições ideais de aplicação. A análise estatística revelou que a quitosana apresenta maior eficácia em faixas de pH ácido (4,5 a 5,5) e alcalino (7,0 a 8,5), com as maiores reduções de turbidez observadas para dosagens de quitosana: 20 mg/L a 55 mg/L em meio ácido, pH na faixa de 4,5 a 5,5 e em 55 mg/L a 80 mg/L em meio alcalino, pH na faixa de 7,0 a 8,5. O modelo estatístico proposto apresentou um alto coeficiente de determinação (R^2), indicando um bom ajuste aos dados experimentais e uma sólida capacidade preditiva. Esses resultados corroboram a literatura existente e apontam para a necessidade de ajustes precisos de pH e dosagem de quitosana para otimizar a remoção de turbidez em águas residuais.

Palavras-chaves: Turbidez, Quitosana, Mineração, Coagulantes, Jar Test, Superfície de Resposta.

ABSTRACT

Mining companies present, as indirect results of the mineral extraction process, high observations of exposed soil with low grain size, which, if not treated, presents a potential pollutant to the environment. The soil, once exposed, is eroded by air or rainwater. When this material is carried by water conduction on rainy days, it tends to flow to places with lower gravitational potential, such as SUMPs and gutters. Consequently, the final destination of this material, in its smallest controlled portion, is the water bodies common in areas with mineral wealth. Today, mining companies must deliver to these recipients a compound with observation of particulate matter below the limit of 100 NTU, a value established by Resolution 357 of the National Environmental Council (CONAMA, 2005). For the reservoirs located in the Córrego Maquiné region - MG, preliminary results indicate a high potential for turbidity, which is why the use of the natural coagulant, chitosan, was considered to reduce turbidity readings. In this context, the objective was to study how chitosan, a natural fibrous compound, behaves in reducing the turbidity of mining waters. To this end, laboratory tests were performed using the Jar Test for different coagulant application rates, and the data were subsequently analyzed using specific software to design the best proportion for this purpose. In this study, bench tests were performed to determine the efficiency of chitosan as a coagulant in the treatment of water with high turbidity. Through the tests, it was possible to verify that the reduction in turbidity varies significantly according to chitosan concentrations and pH levels. The data were analyzed using Minitab statistical software, and a regression model was adjusted to identify the ideal application conditions. Statistical analysis revealed that chitosan is more effective in acidic (4.5 to 5.5) and alkaline (7.0 to 8.5) pH ranges, with the greatest turbidity reductions observed for chitosan dosages: 20 mg/L to 55 mg/L in acidic medium, pH range 4.5 to 5.5, and 55 mg/L to 80 mg/L in alkaline medium, pH range 7.0 to 8.5. The proposed statistical model showed a high coefficient of determination (R^2), indicating a good fit to the experimental data and a solid predictive capacity. These results corroborate the existing literature and point to the need for precise adjustments of pH and chitosan dosage to optimize turbidity removal in wastewater.

Keywords: Turbidity, Chitosan, Mining, Coagulants, Jar Test, Response Surface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema usual do tratamento dos efluentes gerados no processo de beneficiamento de minerais. _____	14
Figura 2 - Metodologia do trabalho. _____	21
Figura 3 – Pesagem de 2,5g de quitosana para diluição em meio ácido clorídrico. _____	22
Figura 4 – (a) Solução da quitosana em solução ácida; (b) Solução da quitosana em água destilada. _____	243
Figura 5 – (a) Jarros Jar Test após 60s de sedimentação; (b) Jarros Jar Test após 30 minutos de sedimentação _____	25
Figura 6 – (a) Jarros Jar Test após 120s de sedimentação, da direita para esquerda: J1 a J5; (b) Jarros Jar Test após 30 minutos de sedimentação para os cinco primeiros ensaios, da direita para esquerda: J1 a J5 _____	26
Figura 7 – (a) Jarros Jar Test após 120s de sedimentação, da direita para esquerda: J6 a J10; (b) Jarros Jar Test após 30 minutos de sedimentação para os cinco primeiros ensaios, da direita para esquerda: J6 a J10. _____	27
Figura 8 - Delineamento Composto Central para $k = 2$. _____	28
Figura 9 - Gráfico pH vs Dosagem Quitosana. _____	32
Figura 10 - Resposta maximizada para obtenção do ponto ótimo. _____	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referências para testagem prévia _____	243
Tabela 2 - Tabela de pontos pré-planejamento experimental Parte 1 _____	25
Tabela 3 - Tabela de pontos pré-planejamento experimental Parte 2 _____	26
Tabela 4 - Planejamento dos ensaios para DCCR _____	29
Tabela 5 - Planejamento experimental DCCR _____	29
Tabela 6 – Valores de redução da turbidez em porcentagem Parte 1 – Jarros 1 a 6 _____	30
Tabela 7 – Valores de redução da turbidez em porcentagem Parte 2 – Jarros 7 a 13 _____	30
Tabela 8 - Resumo do modelo gerado, parâmetros S e R ² . _____	31

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivo Geral	13
1.1.1	Objetivos específicos	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	A mineração do minério de ferro e a gestão dos efluentes.....	13
2.2	Turbidez.....	15
2.3	Coagulantes	15
2.4	Jar Test.....	17
2.5	Metodologia da Superfície de Resposta	18
3.	METODOLOGIA.....	21
3.1	Materiais	21
3.1.1	Água Sintética	21
3.1.2	Quitosana	22
3.2	Métodos	24
3.2.1	Ensaio prévios	24
3.2.2	Pré-planejamento Experimental	25
3.2.3	Planejamento Experimental.....	27
4.	RESULTADOS	30
5.	CONCLUSÃO.....	34
6.	REFERÊNCIAS	35
	APENDICE A – FOTOGRAFIA DOS ENSAIOS	39

A.1 FASE 1 ENSAIOS EM LABORATÓRIO	39
A.2 FASE 2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO	41

1. INTRODUÇÃO

Há anos buscam-se meios para aumentar a qualidade das águas para as distintas formas de consumo. A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, prevê metas de curto a longo prazo que visam o enquadramento de qualidade das águas para as diversas classes existentes, inclusive as águas de classe especial, que são aquelas passíveis de desague em rios.

Para as diversas finalidades que os recursos hídricos são explorados, é de preocupação legal assegurar a qualidade para: proteção das comunidades aquáticas, abastecimento humano, recreação, aquicultura/pesca, irrigação, dessedentação de animais, navegação e harmonia paisagística (Costa & Conejo, 2009). O parâmetro turbidez, que pode ser traduzido como uma expressão da propriedade óptica que faz com que a luz seja espalhada e absorvida em vez de transmitida sem mudança de direção ou nível de fluxo através da amostra (APHA, WERF AWWA 2005), é um parâmetro controlado nas quatro primeiras aplicações citadas anteriormente. Quando o material particulado se encontra em suspensão; que normalmente estão associados ao agravamento do fenômeno de erosão propiciado por atividade de mineradoras, obras civis e agricultura, maior será a turbidez de uma água (VON SPERLING, 2005). Nos últimos anos tal propriedade tem sido alvo de estudos, logo opções que visem a minoração desse aspecto em nossas águas têm sido cada vez mais conhecidas.

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro (2021), em 2020 foram extraídos aproximadamente 322,7 milhões de toneladas de minério de ferro apenas no estado de Minas Gerais. Tal intensa atividade de exploração mineral, crucial para a economia nacional, traz à tona uma vasta área de solo exposto para a região, aumentando significativamente a propensão de erosões. Na ausência de adoção de meios para proteção superficial, a condução das águas das chuvas propicia um escoamento de água extremamente turva até pontos estratégicos situados nas plantas das mineradoras, locais estes onde o material será decantado e com isso minimizado os riscos de um escoamento desordenado. Essas lagoas artificiais formadas nos períodos chuvosos são caracterizadas por dispor de uma água com elevada turbidez e de propriedades hidráulicas; como raio hidráulico, profundidade e vazão de entrada e saída distintas. Apesar da estratégia de retenção da água apresentar-se inicialmente como positiva, ainda se faz necessário realizar trabalhos sobre esse composto antes do seu despejo nos rios.

Quando existente, o tratamento das águas ocorre em etapas que contam com uso de químicos, como é o caso da coagulação. Hoje a coagulação ainda tem como sinônimo compostos à base de alumínio, substâncias estas que têm como principal malefício associação a diversas debilidades para as vidas que a este são expostas, sem contar a grande quantidade de lodo final gerado.

Na contramão do uso de produtos industrializados, hoje já pode ser observado uma quantidade significativa de publicações que exploram compostos naturais no tratamento de águas residuais de distintos setores industriais. São exemplos: semente de moringa, o tanino, o quiabo e o mais abundante: a quitosana.

Os benefícios observados no tratamento de águas com compostos naturais, em substituição aos compostos químicos, são diversos, sendo os principais: lodo residual em menores porções e o baixo índice de toxicidade (MUNIZ, 2018).

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização de quitosana como coagulante para a remoção de turbidez de efluente provenientes da indústria minerária.

1.1.1 Objetivos específicos

- Avaliar a influência do pH e da dosagem do coagulante orgânico quitosana, no processo de clarificação da água.
- Obter um modelo matemático da redução da turbidez em relação ao pH e às concentrações do agente coagulante.
- Identificar os valores ótimos para os parâmetros de pH e concentração de quitosana na remoção de turbidez da água residuária de mineração.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A mineração do minério de ferro e a gestão dos efluentes

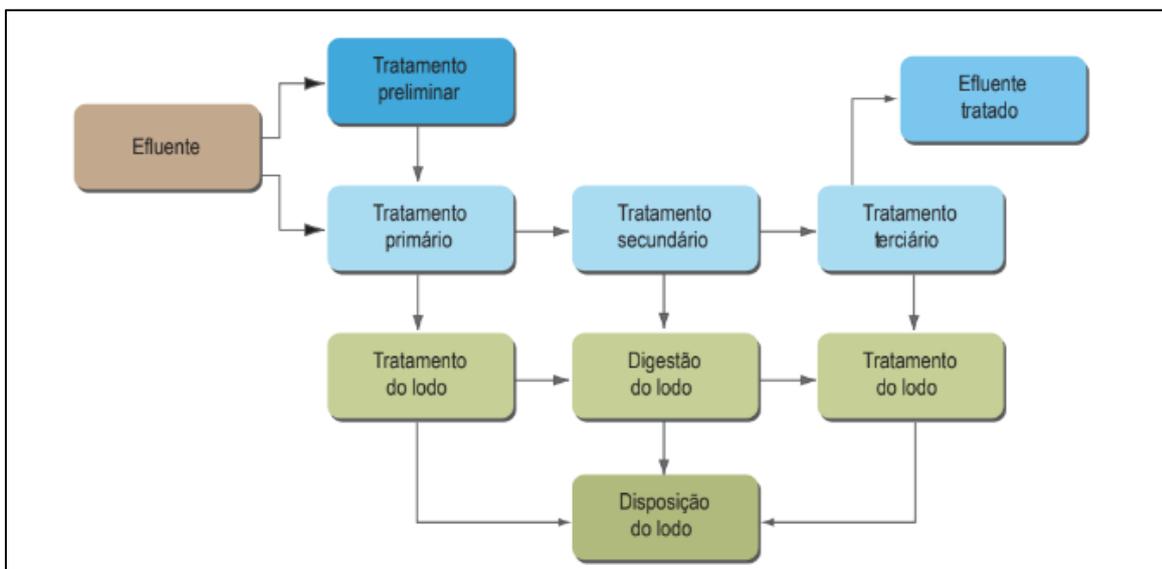
O Brasil, desde sua colonização, é um país de destaque na exportação de *commodities*. Mais de meio milênio depois, o Brasil ainda vê sua economia dependente dos resquícios imperialistas. Apenas o setor mineral, segundo o Indicador de Produção Mineral (IPM), representa cerca de 3,8% do PIB do Brasil (IBGE 2021, ANM), tendo já alcançado a marca de 9% em 2006 (IBRAM).

Segundo a Lei nº 13.540/2017 (BRASIL, 2017), mensalmente são repassados à União, aos estados e aos municípios sede das mineradoras um percentual das alíquotas arrecadadas como contraprestação pela utilização econômica dos recursos minerais em seus respectivos territórios. Tais montantes devem ser utilizados em prol do desenvolvimento da comunidade local, na forma de melhoria da infraestrutura, da qualidade ambiental, da saúde e da educação (BRASIL, 2017). Apenas para o período de maio a outubro de 2023, foi feito um repasse de 253,46 milhões de reais para o

município de Minas Gerais, sendo 85% desse valor oriundo do beneficiamento do minério de ferro (Agência Brasil, ANM). Segundo Flávio Penido, diretor-presidente do IBRAM, a compensação financeira mineral está associada às elevações do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) sendo, portanto, irrefutável a importância do setor para o nosso país.

Em contrapartida aos benefícios gerados, segundo o Ministério do Meio Ambiente (2002), a mineração ainda se apresenta como o setor industrial de maior impacto ambiental associado. A estes podem ser listados a questão do manejo das águas: captação, reuso e lançamento de efluentes gerados em corpos hídricos. Hoje, os efluentes gerados podem ser divididos em dois: os efluentes provenientes do beneficiamento e os efluentes gerados em função da erosão. Para o primeiro caso, são usuais a adoção de medidas que utilizam tratamento físico, químico e biológico para minimizar os impactos associados (ALÍPAZ, 2006). A Figura 1 abaixo apresenta um esquema de tratamento usual nas mineradoras de ferro.

Figura 1 - Esquema usual do tratamento dos efluentes gerados no processo de beneficiamento de minerais.



Fonte: DOMINGUES; BOSON; ALÍPAZ (2006).

Apesar de terem uma composição química mais crítica, esses efluentes possuem a vantagem de serem volumes controlados e, portanto, passíveis de um tratamento planejado, ao contrário dos efluentes provenientes do escoamento superficial, que atualmente são apenas decantados em estruturas denominadas *SUMPS*. Para estes últimos, não têm sido observadas na prática medidas que visem contornar essa problemática, o que tem impactado a qualidade das águas dos rios que recebem esse tipo de efluente poluente.

2.2 Turbidez

Juntamente com outros fatores como cor, sabor e odor da água, a turbidez afeta as percepções e o comportamento do consumidor (NARDY, 2019). A turbidez é uma medida da quantidade de partículas sólidas em suspensão na água que, embora não seja necessariamente prejudicial, seu controle é importante, pois altos níveis de turbidez podem indicar a presença de sedimentos, microrganismos ou poluentes. Os primeiros estudos para medir a turbidez datam de 1900, quando Wipple e Jackson prepararam padrões de valor conhecido em ppm de Sílica. A medição da turbidez é realizada em Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT) no Sistema Internacional de Unidades (SI).

A turbidez da água é um parâmetro essencial no monitoramento da qualidade hídrica, pois está diretamente relacionada à presença de partículas em suspensão, muitas vezes oriundas de processos de erosão, atividades agrícolas e industriais, como a mineração. No Brasil, o controle da turbidez é estabelecido por legislações específicas, sendo a Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) a principal norma que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece padrões de qualidade, incluindo limites máximos de turbidez para diferentes classes de uso (CONAMA, 2005). Essa regulamentação visa proteger os ecossistemas aquáticos e garantir a potabilidade e a segurança do abastecimento público. A Resolução CONAMA nº 357/2005 determina, por exemplo, que para águas destinadas ao abastecimento humano após tratamento convencional, o valor máximo permitido de turbidez é de 100 UNT (unidades nefelométricas de turbidez), sendo este parâmetro crítico para evitar problemas sanitários e ecológicos (BRASIL, 2005). Portanto, a adequada gestão e monitoramento da turbidez são fundamentais para a preservação da qualidade das águas e a manutenção dos múltiplos usos desses recursos hídricos.

2.3 Coagulantes

A coagulação é o primeiro estágio do processo de separação de finos em suspensão em meio aquoso (VON SPERLING, 2005). Para tanto, se faz necessária a adição de um composto coagulante e a aplicação de energia de agitação conhecida (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Essa combinação desestabiliza os colóides estáveis e/ou neutraliza moléculas negativamente carregadas por reações químicas que se processam no contato da suspensão com o reagente (APHA; AWWA; WEF, 2017). Usualmente associada a este estágio, tem-se a fase de floculação, estágio onde a energia de agitação é consideravelmente reduzida de modo a propiciar a colisão das partículas finas recém segregadas (VON SPERLING, 2005). Na floculação, a formação de unidades maiores e mais pesadas viabiliza

a posterior remoção por sedimentação, filtração ou flotação (APHA; AWWA; WEF, 2017). Reagentes diversos são constantemente utilizados nas várias aplicações de mercado, incluindo opções de coagulantes inorgânicos à base de ferro e alumínio, e os orgânicos à base de compostos naturais (ALQUIMIA PRODUTOS QUÍMICOS, 2023).

2.3.1 Coagulantes Naturais

Desde o entendimento dos mecanismos de coagulação, a ciência tem se dedicado ao estudo de diversos coagulantes, com o objetivo de aprimorar a eficiência do tratamento de águas e efluentes. Em particular, tem-se investido na busca por coagulantes alternativos que reduzam a toxicidade das águas tratadas e a geração de lodo químico, aspectos frequentemente associados ao uso de coagulantes inorgânicos tradicionais à base de alumínio e ferro (RIBEIRO et al., 2020; SANTOS et al., 2020). A quitosana, por exemplo, apresenta baixa toxicidade e elevada biodegradabilidade, contribuindo para a melhoria da qualidade final das águas tratadas e para a minimização dos impactos ambientais (RIBEIRO et al., 2020).

Um exemplo promissor de coagulante natural que tem recebido destaque na pesquisa é a quitosana, um polissacarídeo derivado da quitina encontrada em exoesqueletos de crustáceos, que apresenta propriedades coagulantes notáveis devido à sua estrutura química rica em grupos amino.

2.3.1.1 Quitosana

A quitosana é um polissacarídeo obtido como subproduto da indústria pesqueira, resultante dos processos de desmineralização, desproteinação, despigmentação e subsequente desacetilação da quitina (BRITTO, 2008). Este composto fibroso é encontrado predominantemente nas partes não comestíveis de crustáceos, como cefalotórax, segmentos abdominais e caudas. No Brasil, apenas a casca de caranguejos e camarões tem um potencial estimado de cerca de 2000 toneladas de quitosana (SILVA, 2023). Contudo, esse material, por não ser devidamente aproveitado, é frequentemente descartado no meio ambiente, configurando-se como um passivo ambiental significativo.

Entre as principais vantagens da quitosana em comparação aos coagulantes tradicionais está sua origem natural e sua biodegradabilidade, que contribuem para a redução da geração de lodo e a minimização dos impactos ambientais (RIBEIRO et al., 2020). Além disso, a quitosana pode ser quimicamente modificada para aprimorar suas propriedades coagulantes e adaptá-la a diferentes condições de tratamento, o que amplia sua aplicabilidade em diversos setores industriais, incluindo o tratamento de águas residuais, a indústria têxtil e processos de produção de alimentos (RENAULT; SANCEY; BADOT e CRINI, 2009).

A eficácia da quitosana como coagulante está intrinsecamente relacionada a fatores como o pH, a concentração e as características específicas do efluente a ser tratado. A otimização do desempenho da quitosana requer um ajuste cuidadoso desses parâmetros (MUNIZ, 2018). Estudos recentes têm se dedicado a explorar as condições ideais para a aplicação da quitosana com o objetivo de maximizar a remoção de turbidez e melhorar a qualidade das águas tratadas (SANTOS et al., 2020; SILVA et al., 2021). Exemplos de aplicação incluem o uso da quitosana em estações de tratamento de água para abrandar a presença de partículas em suspensão, bem como em processos industriais que geram efluentes com alta carga de sólidos (FERNANDES et al., 2022). Esses estudos têm demonstrado que parâmetros como o pH da água, a dosagem do coagulante e a intensidade de agitação durante o processo de coagulação-floculação são determinantes para o desempenho ótimo do tratamento.

2.3.2 Influência do pH

O pH, potencial Hidrogeniônico, é a medida que afere o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma determinada solução (VON SPERLING, 2005). Esta classificação é função da quantidade íons de H⁺ presente na solução. Tais íons presentes no efluente afeta a solubilidade e a reatividade dos coagulantes utilizados, como a quitosana (VON SPERLING, 2005). No processo de coagulação, o composto age neutralizando as cargas elétricas das partículas em suspensão, promovendo sua aglomeração e subsequente sedimentação, logo a eficiência dessa neutralização é altamente dependente do pH, pois altera a forma e a carga das moléculas químicas da mistura (SAWYER; MCCARTY e PARKIN, 2003). Conhecido o fator pH e seu impacto no processo de coagulação, pode-se mensurar a necessidade de se terem estudos preliminares para que seja determinado as faixas ótimas de trabalho.

Além dos efeitos diretos sobre a solubilidade dos coagulantes, o pH também influencia a formação de flocos e a sedimentação dos mesmos. Em pH não ideal, a formação de flocos pode ser inadequada, levando a uma redução na eficiência de remoção de turbidez. A interação entre os coagulantes e as partículas em suspensão é, portanto, otimizada dentro de uma faixa de pH específica, que varia de acordo com o tipo de coagulante utilizado e as características do efluente (LEE; WESTERHOFF, 2006).

2.4 Jar Test

O Jar Test é uma metodologia amplamente empregada no tratamento de água para a avaliação e otimização dos processos de coagulação e floculação. Desenvolvido inicialmente para aplicações em laboratório, o método proporciona uma visão detalhada da eficácia dos coagulantes e

floculantes sob condições controladas. O objetivo principal do Jar Test é identificar as condições ideais para a remoção de partículas e turbidez da água, simulando o processo de tratamento em escala reduzida antes da aplicação em escala industrial.

2.4.1 Princípios e Procedimentos do Jar Test

O Jar Test consiste em uma série de experimentos realizados em frascos (ou "*jars*") que contêm amostras de água e coagulantes. O procedimento básico inclui:

- Preparação das Amostras: A água a ser testada é dividida em vários frascos.
- Adição de Coagulantes: Diferentes concentrações de coagulantes são adicionadas aos frascos.
- Mistura Rápida: As amostras são misturadas rapidamente para promover a dispersão do coagulante.
- Mistura Lenta: A mistura é reduzida para promover a formação de flocos.
- Sedimentação: Após a floculação, o sistema é deixado em repouso para que os flocos sedimentem.
- Análise dos Resultados: A turbidez do efluente é medida para avaliar a eficácia do coagulante.

O método permite ajustar variáveis como pH, tempo de mistura e dosagem de coagulante, proporcionando dados importantes para a otimização do processo de tratamento (VOSSMAN & KREBS, 1987).

2.5 Metodologia da Superfície de Resposta

A Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) consiste em técnicas estatísticas e matemáticas para planejamento, análise, modelagem e otimização de experimentos. Em comparação com outras metodologias de otimização de experimentos, a MSR apresenta como vantagem uma análise que pondera o efeito das variáveis de controle envolvidas (NAIR et al., 2014). A eficiência no tratamento das águas residuais, inclusive aquelas com elevada turbidez, é diretamente influenciada por dois fatores principais: a dosagem do coagulante e o pH do meio (MUNIZ, 2018). A conclusão da metodologia resulta em uma curva que permite entender a relação entre a resposta e os fatores (ANDRADE, 1977).

Dentre os diversos métodos de planejamento possíveis na MSR, são comumente explorados para ajustes em modelos quadráticos os experimentos com um número par de controles. Entre esses métodos, destacam-se o planejamento com o uso da matriz de Doehlert e o Delineamento Composto Central (DCC) (MUNIZ, 2018). No presente trabalho, optou-se pelo planejamento experimental pelo

método DCC, uma vez que este requer um menor número de experimentos e apresenta eficácia equivalente à matriz de Doehlert (MUNIZ, 2018).

3. METODOLOGIA

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), anexo à Escola de Minas, localizado na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), em Minas Gerais. A metodologia adotada para a condução do presente trabalho pode ser compreendida na Figura 2 abaixo indicada.

Figura 2 - Metodologia do trabalho.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.1 Materiais

3.1.1 Água Sintética

Contextualizada a questão da intermitência das águas nos reservatórios de interesse, tornou-se necessário realizar a dosagem do fluido em laboratório. Foram coletadas amostras da água no Córrego de Maquiné, na localidade de Catas Altas – MG. No local, também foi coletado o solo de interesse, o qual foi submetido às etapas descritas abaixo, até a obtenção de uma parcela fina adequada:

- a) Realizou-se o escalpe das partículas cuja granulometria era superior a 4 mesh (4,76mm), removendo todas as partículas mais grosseiras da amostra;
- b) Em seguida, a amostra foi submetida ao peneiramento a seco para coletar apenas as partículas cuja granulometria era inferior a 60 mesh (0,250mm);
- c) O material passante foi então submetido à moagem a úmido, com um fator de enchimento do moinho estabelecido em 50%, incluindo 30% de esferas de aço como corpos moedores e 20% de material a ser moído. A amostra foi moída por 60 minutos para garantir que o material atingisse a granulometria desejada;
- d) Por fim, o material moído foi submetido ao peneiramento a úmido para garantir que a polpa resultante fosse composta por partículas inferiores a 400 mesh (0,037mm). O peneiramento foi interrompido apenas quando a água de lavagem ficou límpida.

Com a polpa preparada e água coletada, executou-se a mistura até a obtenção de um efluente com turbidez aproximada de 1500 NTU.

Foram necessários cerca de 50 litros de água sintética para execução de todas as etapas do experimento. Os valores de pH foram ajustados com auxílio de solução de ácida: 1,5ml de ácido clorídrico (HCl) em 250ml de água destilada e/ou solução básica: 3g de Hidróxido de Sódio (NaOH) em 250ml de água destilada

3.1.2 Quitosana

A quitosana utilizada nos ensaios foi adquirida em laboratório de manipulação em dezembro de 2023. Inicialmente, foram diluídos 2,5g de coagulante em solução ácida, composta por 6,8ml de ácido clorídrico em 250ml de água destilada, além de 1g de coagulante em água destilada.

Figura 3 – Pesagem de 2,5g de quitosana para diluição em meio ácido clorídrico.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Figura 4 – (a) Solução da quitosana em solução ácida; (b) Solução da quitosana em água destilada.



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2 Métodos

3.2.1 Ensaios prévios

Com o objetivo de alcançar uma otimização final mais eficaz, buscou-se referências bibliográficas que já indicavam valores otimistas para a redução de turbidez para distintos efluentes industriais. Na etapa de testagem dos ensaios, adotou-se os seguintes valores nas etapas de coagulação e floculação, respectivamente: adição do coagulante a solução, agitação em 300 rpm por 60 segundos seguida pelo decréscimo da rotação para 40 rpm mantida por 15 minutos. Após os tempos de agitação, as misturas foram deixadas em repouso e então realizou-se a primeira coleta no tempo de 2 minutos, seguida da segunda coleta no tempo de 30 minutos.

Nessa prévia, foram realizados cinco ensaios nas proporções de pH, solução de quitosana e turbidez conforme indicado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Valores de referências para testagem prévia

Jarro	Volume da solução [ml/l]	Turbidez a 120s [NTU]	Turbidez a 1800s [NTU]	pH inicial	pH final	Redução [%]
1*	7,0	1070	882	7.68	7.88	17,57%
2**	3,0	1305	308	7.76	4.17	76,40%
3**	96,0	1247	291	8.06	2.21	76,66%
4**	0,3	1232	889	8.06	6.82	27,84%
5*	7,0	1260	878	5.06	6.53	30,32%

* Solução de quitosana 1% diluída na proporção: 1g de quitosana para 100ml de água destilada;

** Solução de quitosana 1% diluída na proporção: 2.5g de quitosana em 250ml de solução de ácido clorídrico 1% (HUANG, CHEN e PAN, 2000).

O aspecto visual da redução pode ser notado na Figura 5 abaixo apresentada.

Figura 5 – (a) Jarros Jar Test após 60s de sedimentação; (b) Jarros Jar Test após 30 minutos de sedimentação



(a)

(b)

Fonte: Autora Própria, 2024.

3.2.2 Pré-planejamento Experimental

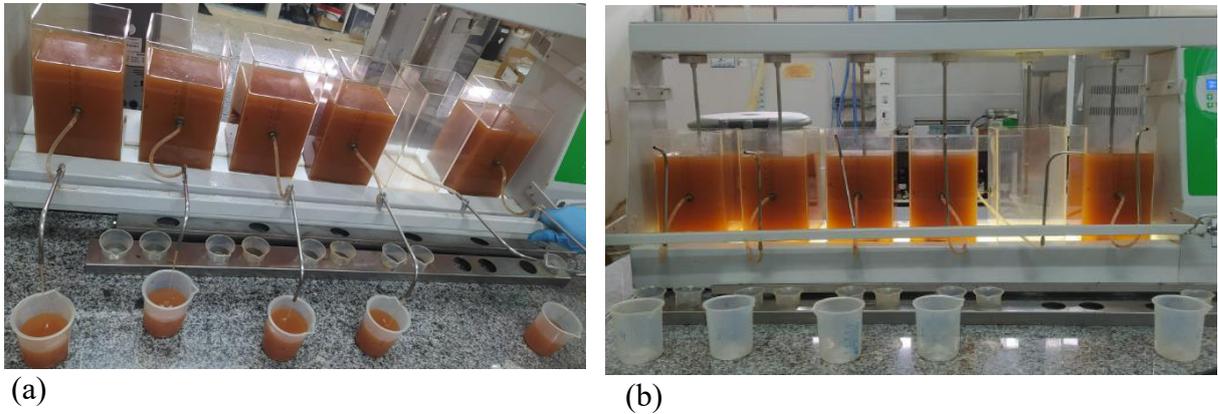
Com a conclusão da etapa anterior, na qual se observou o melhor desempenho com a quitosana diluída em meio ácido, ampliou-se a amostragem para 10 ensaios, divididos em dois ciclos de testagem, variando as proporções de pH, solução de quitosana e turbidez. Os valores obtidos estão indicados na Tabela 2 e 3, abaixo.

Tabela 2 - Tabela de pontos pré-planejamento experimental | Parte 1

Jarro	NTU inicial	pH inicial	NTU a 2min	pH a 2min	NTU a 30min	pH a 2min	NTU a 2min	NTU a 30min
J1	1596	7.47	1545	7.64	1346	7.29	3%	16%
J2	1595	7.61	1510	7.29	1382	7.28	5%	13%
J3	1517	7.68	1451	6.91	1367	6.90	4%	10%
J4	1494	7.70	1423	6.73	1298	6.67	5%	13%
J5	1403	7.70	1369	6.43	1249	6.32	2%	11%

A percepção visual de redução da turbidez do primeiro ciclo dos ensaios pode ser obtida com auxílio da Figura 6 abaixo indicada.

Figura 6 – (a) Jarros Jar Test após 120s de sedimentação, da direita para esquerda: J1 a J5; (b) Jarros Jar Test após 30 minutos de sedimentação para os cinco primeiros ensaios, da direita para esquerda: J1 a J5



Fonte: Autoria Própria,

Para a segunda parte do ensaio, os valores foram compilados na Tabela 3 abaixo indica.

Tabela 3 - Tabela de pontos pré-planejamento experimental | Parte 2

Jarro	NTU inicial	pH inicial	NTU a 2min	pH a 2min	NTU a 30min	pH a 2min	NTU a 2min	NTU a 30min
J6	1478	7.75	1436	7.72	1311	7.70	3%	11%
J7	1410	7.85	1059	3.97	189	3.92	25%	87%
J8	1393	7.89	961	3.55	182	3.51	31%	87%
J9	1471	7.89	1012	3.18	263	3.15	31%	82%
J10	1462	7.95	1028	2.85	280	2.81	30%	81%

A percepção visual de redução da turbidez do segundo ciclo dos ensaios pode ser obtida com auxílio da Figura 7 abaixo indicada.

Figura 7 – (a) Jarros Jar Test após 120s de sedimentação, da direita para esquerda: J6 a J10; (b) Jarros Jar Test após 30 minutos de sedimentação para os cinco primeiros ensaios, da direita para esquerda: J6 a J10.



(a)

(b)

Fonte: Autora própria, 2024

3.2.3 Planejamento Experimental

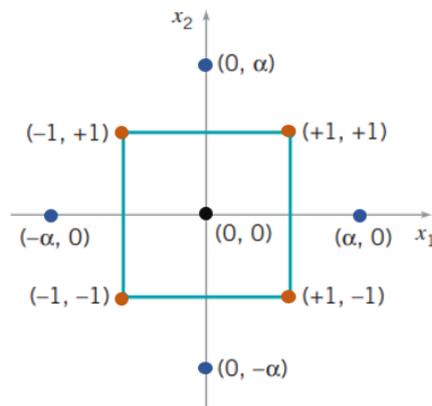
3.2.3.1 Delineamento Composto Central (DCC)

Desde que as MSR foram introduzidas pelos estatísticos Box e Wilson em 1951, o planejamento composto central (DCC) tem sido o mais explorado (MONTGOMERY, 2009). A equação final da superfície de resposta do método, quando se trata de fatores pares de controle, é apresentada na Equação 1 abaixo, onde β_{ii} medem os efeitos quadráticos puros, β_{ij} os termos mistos e ε o erro experimental.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon \quad (1)$$

A partir da equação, obtém-se um modelo quadrático composto por quatro pontos fatoriais, quatro pontos axiais e um ponto central. Os pontos fatoriais auxiliam na estimativa dos pontos de interação, os pontos axiais auxiliam na estimativa dos termos quadráticos e o ponto central auxilia na estimativa do erro experimental. A Figura 8 ilustra a geometria do planejamento de experimento DCC.

Figura 8 - Delineamento Composto Central para k = 2.



● Pontos Fatoriais ● Pontos Axiais ● Ponto Central

Fonte: Adaptado de MONTGOMERY, 2009.

A partir de distribuição espacial da Figura 8 anteriormente apresentada, obtém-se a Equação 2 que dita o número de determinações necessárias para o esboço da superfície de resposta, sendo k o número de fatores e nc o número de repetição no ponto central.

$$n = 2^k + 2 \times k + nc \quad (2)$$

Em seu trabalho Mendonça cita que, um DCC apresenta propriedades especiais quando o número de pontos centrais é igual a cinco e para k igual a dois. Nesse sentido, de (2) tem-se que:

$$n = 2^2 + 2 \times 2 + 5$$

$$n = 13$$

3.2.3.2 Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Para os dias atuais, existe uma variante mais eficiente do DCC, chamada de método DCCR. Nesse método, a variância dos valores preditos (ϵ) é mantida constante para um raio de modelo de regressão, quando α assume o valor conforme a Equação (3).

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (3)$$

$$\alpha = \sqrt[4]{2^2} = 1,4142$$

Em seu trabalho, Muniz faz com que $-\alpha$ coincida com a menor observação de dosagem e pH testadas, enquanto α coincide com a maior observação de dosagem e pH testadas. Replicando a estratégia do delineamento envolvendo os valores do pré-planejamento obtidos para o coagulante em

questão, os testes foram novamente executados em laboratório, variando o pH do meio entre os estágios: ácido (pH=4,3790), próximo ao neutro (pH=6,5) e alcalino (pH=8,62), para dosagens de quitosana entre 0 a 80 mg/L em águas com leituras de turbidez na faixa de 1500 NTU.

Assim, a Tabela 4 indica o arranjo inserido no DCCR, enquanto a Tabela 5 indica o cenário final para a condução dos ensaios em laboratório.

Tabela 4 - Planejamento dos ensaios para DCCR

Fatores de controle	Níveis codificados e reais das variáveis independentes				
	-1,414	-1	0	1	1,414
pH	4,3790	5,0	6,5	8,0	8,6210
Quitosana (mgL ⁻¹)	0,0	11,71	40,0	68,29	60,0

Tabela 5 - Planejamento experimental DCCR

Ordem padrão	Ordem de execução	Tipo	Dosagem (mgL ⁻¹)	ml/2L de água	pH
1	1	1	11,71	2,34	5,00
5	2	-1	0,00	0,00	6,50
2	3	1	68,29	13,66	5,00
12	4	0	40,00	8,00	6,50
7	5	-1	40,00	8,00	4,38
9	6	0	40,00	8,00	6,50
8	7	-1	40,00	8,00	8,62
6	8	-1	80,01	16,00	6,50
11	9	0	40,00	8,00	6,50
4	10	1	68,29	13,66	8,00
13	11	0	40,00	8,00	6,50
3	12	1	11,71	2,34	8,00

10	13	0	40,00	8,00	6,50
----	----	---	-------	------	------

4. RESULTADOS

Os resultados encontrados foram indicados na Tabela 6 e Tabela 7 abaixo, conforme ilustrado nas Figuras A.1 e Figuras A.2 (ver Apêndice A).

Tabela 6 – Valores de redução da turbidez em porcentagem | Parte 1 – Jarros 1 a 6

Jarro	ml/2L de água	NTU inicial	pH inicial	NTU 120s	pH 120s	NTU 1800s	pH 1800s	Redução a 120s	Redução a 1800s
J1	2,34	1513	5,00	612	4,25	95,3	4,27	60%	94%
J2	0,00	1506	6,50	1255	6,66	1265	6,55	17%	16%
J3	13,66	1495	5,00	510	3,56	94,3	3,54	66%	94%
J4	8,00	1551	6,50	603	3,95	99,4	3,95	61%	94%
J5	8,00	1522	4,38	907	3,69	108	3,7	40%	93%
J6	8,00	1541	6,50	618	3,92	99,9	3,88	60%	94%

Tabela 7 – Valores de redução da turbidez em porcentagem | Parte 2 – Jarros 7 a 13

Jarro	ml/2L	NTU inicial	pH inicial	NTU 120s	pH 120s	NTU 1800s	pH 1800s	Redução a 120s	Redução a 1800s
J7	8,00	1571	8,62	543	4,55	159	4,49	65%	90%
J8	16,00	1562	6,50	519	3,56	128	3,55	67%	92%
J9	8,00	1520	6,50	576	3,94	125	3,92	62%	92%
J10	13,66	1498	8,00	492	3,79	118	3,8	67%	92%
J11	8,00	1523	6,50	577	3,9	115	3,89	62%	92%
J12	2,34	1546	8,00	1442	7,02	1358	7	7%	12%

J13	8,00	1503	6,50	576	3,88	124	3,94	62%	92%
-----	------	------	------	-----	------	-----	------	-----	-----

A partir dos resultados laboratoriais com uso do **Minitab Statistical Software** foi possível determinar o valor ótimo de concentração de Quitosana e pH para uma maior eficiência de redução da turbidez da água estudada. Nesta etapa, a partir do arranjo e input dos valores experimentais, uma série de informações são geradas: os atributos estatísticos aplicados a Curva Contorno Redução de Turbidez, listados na Tabela 8 abaixo indicada; o gráfico ilustrado na Figura 9 abaixo e a Equação 4 de Regressão em Unidades Não Codificadas que rege o seu esboço gráfico.

Para os atributos desvio padrão (S) e coeficiente de variação (R^2) são apresentados os seguintes valores:

Tabela 8 - Resumo do modelo gerado, parâmetros S e R^2 .

S	R^2	R^2 ajustado	R^2 predito
0,104587	91,60%	87,40%	61,65%

Nesse sentido, foi verificado o desvio e variação entre os valores dos dados ensaiados e os valores ajustados. Para a ordem de grandeza dos parâmetros ensaiados: pH e concentração, concluiu-se que o desvio observado possui pouca variação. Já em termos do valor do coeficiente de correlação, R^2 , concluiu-se o modelo possui um bom ajuste em relação aos valores ensaiados, já que está próximo de 100% (Olmez, 2009). A qualidade do ajuste é reforçada em relação aos elevados valores obtidos em R^2 ajustado e R^2 predito, coeficientes estes que respondem sobre o potencial de se explicar variações nas respostas e novas observações, respectivamente.

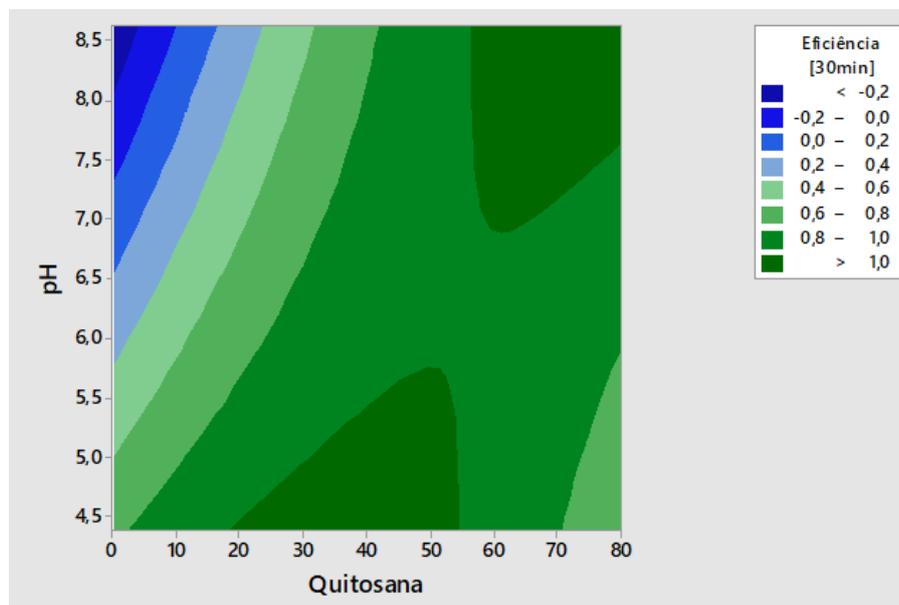
Conhecido e interpretado os atributos acima, as variáveis e coeficientes que remontam a Equação 1 anteriormente descrita, para a curva Contorno Redução de Turbidez pela metodologia DCCR é apresentada a seguir, bem como o gráfico Quitosana vs pH são apresentadas:

$$E[30min] = 1,906 - 0,00314 \times Q - 0,2613 \times pH - 0,000240 \times Q^2 + 0,00471 \times Q \times pH \quad (4)$$

Sendo: Q a dosagem utilizada;

pH o pH inicial.

Figura 9 - Gráfico pH vs Dosagem Quitosana.



Fonte: autoria própria, 2024

Os resultados obtidos, conforme ilustrado no gráfico acima, revelam que a quitosana apresenta maior eficiência na remoção de turbidez em dois intervalos de pH distintos. As maiores eficiências são indicadas pela coloração verde escura no gráfico, evidenciando duas faixas principais:

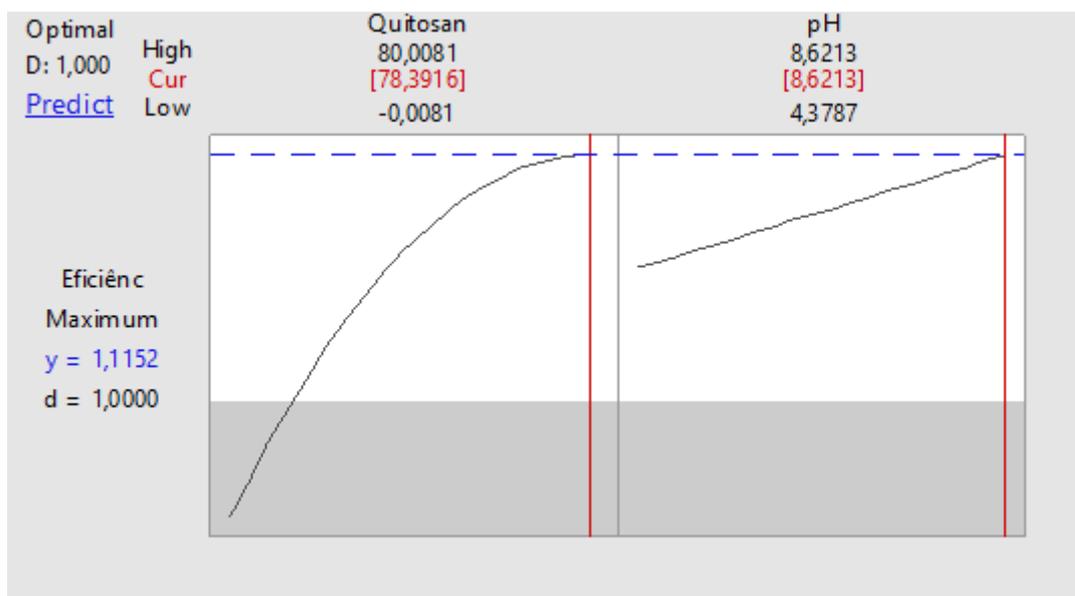
1. **Meio Ácido:** A eficiência é maximizada em pH na faixa de 4,5 a aproximadamente 5,5, com dosagens de quitosana variando de 20 mg/L a 55 mg/L.
2. **Meio Alcalino:** A eficácia da quitosana também é significativa em pH na faixa de 7,0 a 8,5, com dosagens variando de 55 mg/L a 80 mg/L.

Esses achados corroboram com as literaturas existentes, que apontam que a quitosana é mais eficaz em condições ácidas e alcalinas (MUNIZ,2018) e (SANTOS,2021).

Em contraste, em condições de elevado pH e baixas concentrações de quitosana, observou-se uma perda de eficiência na remoção da turbidez do efluente teste, o que pode estar associado à carga inadequada para neutralizar as partículas suspensas, como discutido por Flávia Monteiro e Lima Junior em 2018, onde destacou-se a importância de ajustes químicos para otimizar a remoção de turbidez em condições específicas. Esses resultados ressaltam a necessidade de otimizar tanto o pH quanto a concentração de quitosana para alcançar a máxima eficiência na remoção de turbidez.

Conhecido as faixas de trabalho de maior eficiência de redução da turbidez, os valores foram submetidos a análises para obtenção da resposta maximizada e o resultado obtido encontra-se apresentado na Figura 10 abaixo.

Figura 10 - Resposta maximizada para obtenção do ponto ótimo.



Fonte: autoria própria, 2024.

O ponto ótimo do modelo foi identificado para uma dosagem de quitosana de 78,39 mg/L e um pH de 8,62, valores que são muito próximos ao ponto máximo ajustado, que é 80,01 mg/L de quitosana e pH de 8,62. A forma parabólica da curva sugere que, além deste ponto ótimo, o segundo ramo da curva demonstra um declínio na eficiência de remoção de turbidez. Esses resultados indicam que houve uma resposta eficiente à maximização proposta, confirmando a eficácia do modelo ajustado.

5. CONCLUSÃO

Com a execução do trabalho, foi possível concluir que a quitosana possui eficiência significativa na redução de turbidez em condições tanto ácidas quanto alcalinas. No entanto, os dados também indicam que, em pH elevado e baixas concentrações de quitosana, a eficiência diminui. Este comportamento ressalta a necessidade de otimização cuidadosa do pH e da dosagem de quitosana para alcançar a máxima eficiência. A análise estatística confirma a robustez do modelo proposto, com um coeficiente de determinação elevado, demonstrando a capacidade preditiva do modelo para novas observações. A identificação do ponto ótimo fornece um guia prático para aplicações futuras, permitindo um balanceamento eficiente entre a concentração de quitosana e o pH da solução, confirmando a relevância do modelo ajustado para otimizações práticas no tratamento de águas.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **A gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília: ANA, 2006. Coordenação-Geral das Assessorias; Instituto Brasileiro de Mineração; organizadores, Antônio Félix Domingues, Patrícia Helena Gambogi Boson, Suzana Alípez.**

ANDRADE, Dalton Francisco de. **Alguns aspectos da metodologia de superfície de resposta.** Dissertação apresentada ao Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, 1977.

ASSIS, Odílio B. G., & BRITTO, Douglas de. (2008). Processo Básico de Extração de Quitinas e Produção de Quitosana a partir de Resíduos da Carcinicultura. **Revista Brasileira de Agrociência**, 14(1), 91-100.

BEZERRA, Marcos de Almeida. **Aplicação de matriz de Doehlert na otimização de um sistema de pré-concentração em linha para determinação de cobre usando Espectrometria de absorção atômica com chama.** Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal da Bahia, Salvador - Bahia, Fevereiro de 2003.

BIGOGNO, Rodrigo Gonçalves. **Quitosana Quaternizada para o Tratamento de Turbidez em Efluentes.** Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, Fevereiro de 2016.

BORTOLATTO, Rubiane. **Avaliação do uso de coagulantes naturais no polimento de efluente de abatedouro e frigorífico de suínos.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2017.

COMPARINI, Anaisa; PASSOS, Gabriela; GRAZIADEI, Helton; FERREIRA-SILVA, Paulo H.; LOUZADA, Francisco. Metodologia de Superfície de Resposta: uma introdução nos softwares R e Statística. **ICMC - USP, São Carlos - SP - Brasil.**

DI BERNARDO, Luiz; DI BERNARDO DANTAS, Ângela. Métodos e técnicas de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Vol. 11, Nº 2, abril/junho de 2006.

FELIPE, Lorena O., RABELLO, Lucas A., JÚNIOR, Ênio N. O., & SANTO, Igor José B. (2017). Quitosana: da Química Básica à Bioengenharia. **Química Nova na Escola**, 39(4), 312-320.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to Statistical Quality Control**. Arizona State University. John Wiley & Sons, Inc. 2009.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

ALQUIMIA PRODUTOS QUÍMICOS. **Tratamento de efluentes na mineração**. Disponível em: <https://www.alquimiaprodutosquimicos.com.br/tratamento-de-efluentes-na-mineracao/>. Acesso em: 14 jun. 2024.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

MORAI, Guilherme Lins. **Otimização do tratamento de águas residuárias de mineração por meio de coagulantes naturais**. Ouro Preto, 2023.

BRASIL. Lei nº 13.540, de 18 de dezembro de 2017. Altera as Leis nºs 7.990, de 28 de dezembro de 1989, e 8.001, de 13 de março de 1990, que dispõem sobre a compensação financeira pela exploração de recursos minerais, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 154, n. 243, p. 1, 19 dez. 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113540.htm. Acesso em: 20 ago. 2024.

MORAIS, Gustavo Lopes. **Otimização do tratamento de efluente lácteo sintético com o uso de coagulantes alternativos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 2018.

MUNIZ, Gustavo Lopes. **Otimização do tratamento de efluente lácteo sintético com o uso de coagulantes alternativos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 2018.

OLIVEIRA, Lucas Guedes de. **Fundamentos da Metodologia de Superfície de Resposta e suas Aplicações em Manufatura Avançada: Uma Análise Crítica**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Fevereiro de 2018.

MONTEIRO, Flavia; LIMA, Junior. Uso de Quitosana e Carboximetilquitosana como coagulantes de águas de elevada turbidez. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 58., 2018, Vitória. Anais [...]. Vitória: ABQ, 2018. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2018/trabalhos/5/1284-26731.html>. Acesso em: 13 ago. 2024.

HAZELTON, P. D., & GROSSMAN, G. D. (2009). **The effects of turbidity and an invasive species on foraging success of rosyside dace (*Clinostomus funduloides*)**. *Freshwater Biology*, 54(9), 1977–1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02248.x>. Acesso em: 02 ago. 2024.

SAWYER, C. N., MCCARTY, P. L., & PARKIN, G. F. (2003). **Chemistry for Environmental Engineering and Science** (5th ed.). McGraw-Hill.

LEE, W., & WESTERHOFF, P. (2006). **Dissolved Organic Nitrogen Removal During Water Treatment by Coagulation**. *Journal of Environmental Engineering*, 132(4), 330-338.

RENAULT, F., SANCEY, B., BADOT, P.-M., & CRINI, G. (2009). Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. *European Polymer Journal*, 45(5),

1337-1348. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.12.027>. Acessado em 02 ago. 2024.

SANTOS, Pablo Vinícius Silva. ***Biocoagulação por quitosana como alternativa no tratamento de águas residuárias da indústria mineral: redução de turbidez e salvaguardo da biota aquática***. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução 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. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 142, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=102151>. Acesso em: 20 ago. 2024.

RIBEIRO, H. S. et al. Quitosana: aplicações e potencial como coagulante natural em processos de tratamento de água. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 3, p. 559-569, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbesa/a/3cqzxZ9GTV7g5TzVwFG7RGv/?lang=pt>. Acesso em: 14 ago. 2024.

SANTOS, M. C. et al. Aplicação de quitosana no tratamento de água: revisão de parâmetros operacionais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 2, p. 305-316, 2020.

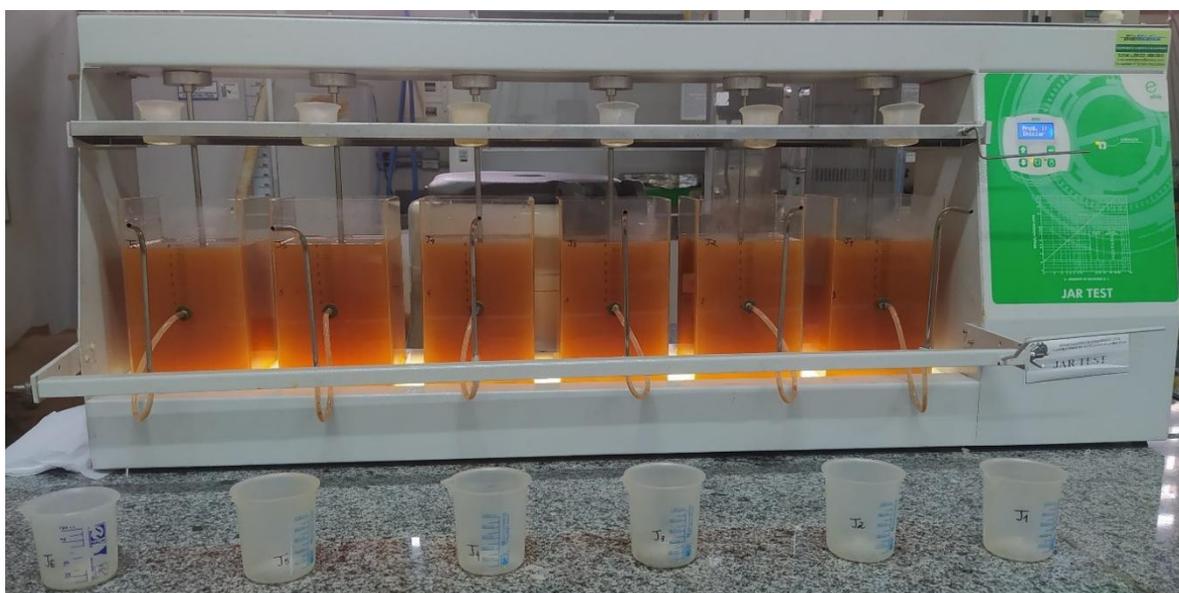
APENDICE A – FOTOGRAFIA DOS ENSAIOS

A.1 FASE 1 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Tabela A.1. 1– Tratamento e turbidez das fases dos ensaios

	J1 2,34 ml/2l	J2 0 ml/2l	J3 13,66 ml/2l	J4 8,00 ml/2l	J5 8,00 ml/2l	J6 8,00 ml/2l
NTU inicial	1513	1506	1495	1551	1522	1541
pH inicial	5,00	6,50	5,00	6,50	4,38	6,50
NTU a 2min	612	1255	510	603	907	618
pH a 2min	4,25	6,66	3,56	3,95	3,69	3,92
NTU a 30min	95,3	1265	94,3	99,4	108	99,9
pH a 30min	4,27	6,55	3,54	3,95	3,7	3,88
E (2min)	60%	17%	66%	61%	40%	60%
E (30min)	94%	16%	94%	94%	93%	94%

Figura A.1. 1 Aspecto visual da água sintética antes do início da etapa de coagulação/floculação e sedimentação



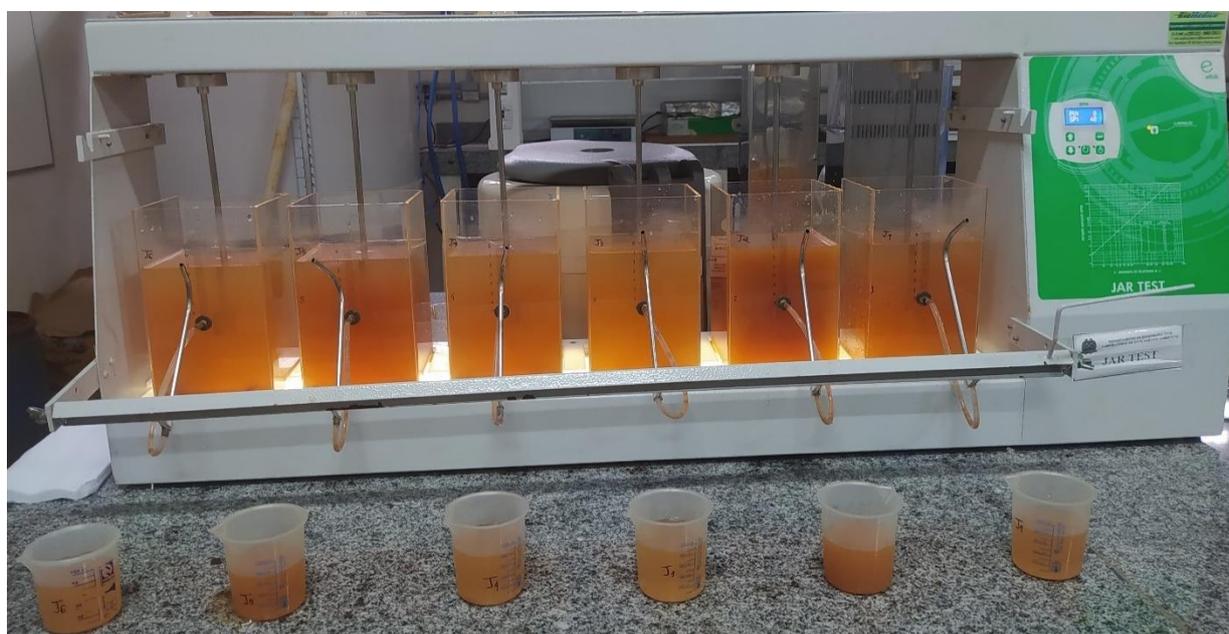
Fonte: Autora própria, 2024.

Figura A.1. 2 Valores de pH e NTU antes da execução dos ensaios para os jarros J1 a J6.



Fonte: Autora própria, 2024.

Figura A.1. 3 - Aspecto visual da água sintética após a agitação no tempo 2 minutos de sedimentação



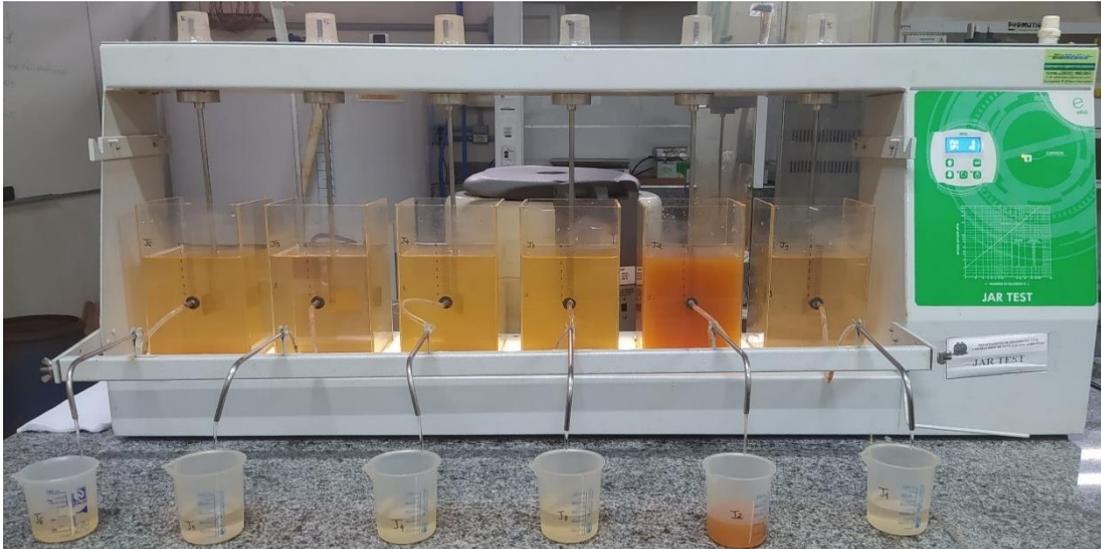
Fonte: Autora própria, 2024.

Figura A.1. 4 – Valores de pH e NTU no tempo de sedimentação igual a 2 minutos



Fonte: Autora própria, 2024.

Figura A.1. 5 – Aspecto visual da água sintética após a agitação no tempo 30 minutos de sedimentação | J1 a J6



Fonte: Autora própria, 2024.

Figura A.1. 6 – Valores de pH e NTU no tempo de sedimentação igual a 30 minutos.



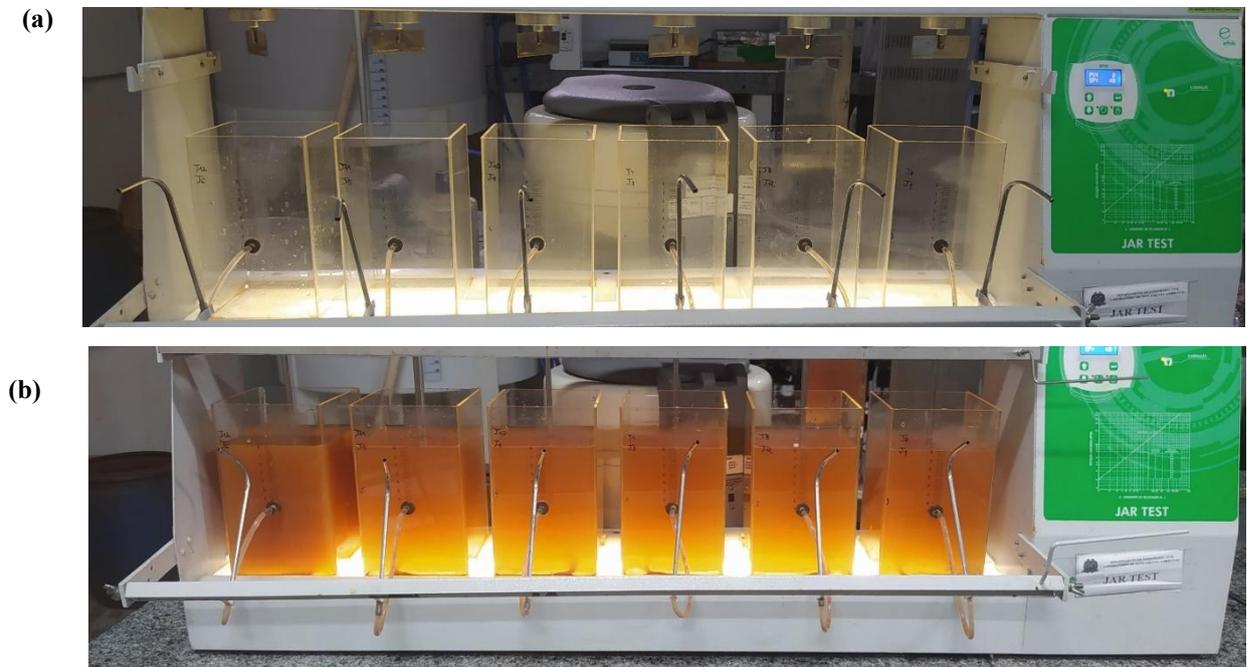
Fonte: Autora própria, 2024.

A.2 FASE 2 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Tabela A.2. 1 – Tratamento e turbidez das fases dos ensaios

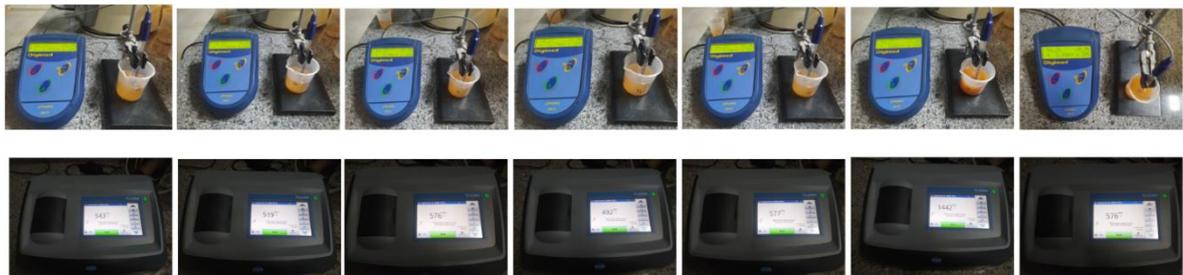
	J7 8,00 ml/2l	J8 16,00 ml/2l	J9 8,00 ml/2l	J10 13,66 ml/2l	J11 8,00 ml/2l	J12 2,34 ml/2l	J13 8,00 ml/2l
NTU inicial	1571	1562	1520	1498	1523	1546	1503
pH inicial	8,62	6,50	6,50	8,00	6,50	8,00	6,50
NTU a 2min	543	519	576	492	577	1442	576
pH a 2min	4,55	3,56	3,94	3,79	3,9	7,02	3,88
NTU a 30min	159	128	125	118	115	1358	124
pH a 30min	4,49	3,55	3,92	3,8	3,89	7	3,94
E (2min)	65%	67%	62%	67%	62%	7%	62%
E (30min)	90%	92%	92%	92%	92%	12%	92%

Figura A.2. 1 – (a) Limpeza dos jarros para execução dos ensaios restantes; (b) Aspecto visual da água sintética antes do início da etapa de coagulação/floculação e sedimentação | J7 a J13.



Fonte: autoria própria, 2024.

Figura A.2. 2 – Valores de pH e NTU antes da execução dos ensaios para os jarros J7 a J13.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura A.2. 3 – Aspecto visual e coleta da água sintética após a agitação no tempo 2 minutos de sedimentação | J7 a J13.



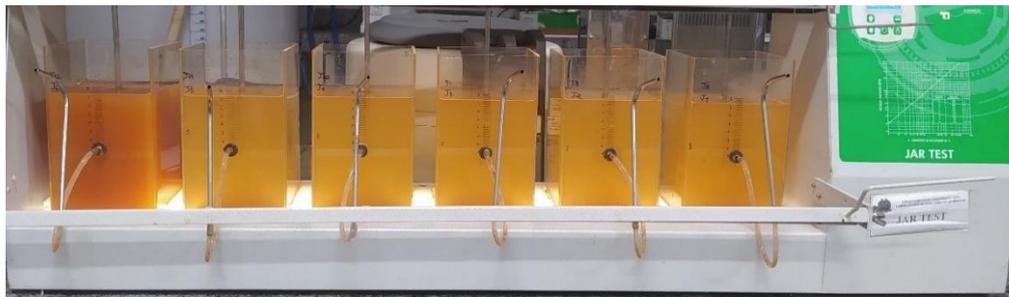
Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura A.2. 4 – Valores de pH e NTU no tempo de sedimentação igual a 2 minutos dos ensaios para os jarros J7 a J13.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura A.2. 5 – Aspecto visual da água sintética após a agitação no tempo 30 minutos de sedimentação | J7 a J13.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura A.2. 6 – Valores de pH e NTU no tempo de sedimentação igual a 30 minutos dos ensaios para os jarros J7 a J13.



Fonte: Autoria própria, 2024.