

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RENAN HIDEO GOUVEIA IWAMOTO

**REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO:
PRODUÇÃO DE CATALISADOR POR SÍNTESE VERDE**

PONTA GROSSA

2025

RENAN HIDEO GOUVEIA IWAMOTO

**REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO:
PRODUÇÃO DE CATALISADOR POR SÍNTESE VERDE**

**Methylene Blue Removal:
Catalyst Production by Green Synthesis**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Giane Gonçalves Lenzi

PONTA GROSSA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RENAN HIDEO GOUVEIA IWAMOTO

**REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO:
PRODUÇÃO DE CATALISADOR POR SÍNTESE VERDE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 27/Junho/2025

Giane Gonçalves Lenzi
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Maria Eduarda Kounaris Fuzik
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Marcelo Vargas Querino
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**PONTA GROSSA
2025**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos que me apoiaram nesta jornada. Primeiramente, a Deus, pela força, pela fé e por guiar meus passos em todos os momentos. Sua presença é a base de tudo o que conquistei, e a Ele toda honra e toda glória.

À Daniele e Edison, meus amados pais, o meu muito obrigado. Vocês são meu porto seguro, a fonte inesgotável de amor, carinho e incentivo. Cada um de vocês contribuiu para que eu chegasse até aqui, e sem vocês eu não seria ninguém hoje.

À Yasmim, seu apoio incondicional, sua paciência e sua compreensão foram essenciais. Você se fez presente em todos esses anos, em todo caminho da minha faculdade, me ajudando e apoiando para que eu não desistisse dos meus sonhos.

E, claro, à minha orientadora Giane Gonçalves, meu muito obrigado pela dedicação, pela paciência e pelos ensinamentos. Sua expertise e orientação foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento profissional. Serei eternamente grato por sua valiosa contribuição.

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso, investigou a eficácia de um catalisador verde na remoção do corante azul de metileno de soluções aquosas, empregando o processo fotocatalítico. O catalisador foi preparado com base no método sol-gel, a partir da chia (semente da planta *Salvia hispanica*) com a adição de Nióbio. Foi utilizado um planejamento experimental e avaliados em 18 ensaios, considerando a influência de três fatores principais: pH (2, 5,81 e 8), concentração do catalisador (0,5, 0,75 e 1 g.L⁻¹) e concentração inicial de azul de metileno (0,5 e 10 mg.L⁻¹). A porcentagem de remoção do corante foi determinada por espectrofotometria UV-Vis em diferentes intervalos de tempo. A análise estatística dos resultados foi realizada por meio de uma Análise de Variância (ANOVA) multifatorial. Os resultados da ANOVA indicaram que, entre os fatores estudados, apenas a concentração inicial de azul de metileno exerceu um efeito estatisticamente significativo na porcentagem de remoção ($p = 0.018$). Testes *post hoc* de Tukey confirmaram uma diferença significativa na remoção entre as concentrações de 5 g.L⁻¹ e 10 mg.L⁻¹ de corante ($p = 0.018$), sendo a eficiência de remoção consistentemente maior para a menor concentração inicial.

Palavras-chave: Azul de Metileno; Catalisador verde; Remoção; Planejamento Experimental; ANOVA.

ABSTRACT

This capstone project investigated the effectiveness of a catalyst in removing methylene blue dye from aqueous solutions, employing the Experimental Design methodology. Eighteen experiments were conducted, considering the influence of three main factors: pH (2, 5.81, and 8), catalyst concentration (0.5, 0.75, and 1 g.L⁻¹), and initial methylene blue concentration (0.5 and 10 mg.L⁻¹). The percentage of dye removal was determined by UV-Vis spectrophotometry at different time intervals, based on calibration curves previously established for each assay. The statistical analysis of the results was performed using a multifactorial Analysis of Variance (ANOVA). The ANOVA results indicated that, among the factors studied, only the initial methylene blue concentration had a statistically significant effect on the removal percentage ($p = 0.018$). Tukey's *post hoc* tests confirmed a significant difference in removal between the 5 mg.L⁻¹ and 10 mg.L⁻¹ dye concentrations ($p = 0.018$), with removal efficiency consistently higher for the lower initial concentration.

Keywords: Methylene Blue; Catalyst; Removal; Experimental Design; ANOVA.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 - Fórmula estrutural do Azul de Metileno.....	14
Figura 2 - Representação do processo sol-gel.....	18
Figura 3 - Mucilagem da chia.....	20
Figura 4 - Estufa da Solid Steel usada na secagem.....	21
Figura 5 - Mufla da Jung usada para a calcinação.....	22
Figura 6 - Solução já preparada para análise.....	24
Figura 7 - Varredura do Azul de Metileno.....	25
Figura 8 - Ilustração do sistema reacional.....	26
Figura 9 - Sistema da fotocatalise.....	27
Figura 10 - Microscopia eletrônica de varredura do catalisador.....	28
Figura 11 - Composição encontrada pelo EDS a) micrografia contendo os elementos encontrados; b) Mapa do Espectro.....	29
Figura 12 - Espectrofotômetro UV-VIS.....	30
Figura 13 - Curvas de calibração da fotólise.....	30
Figura 14 - Curva de calibração da adsorção.....	32
Figura 15 - Curvas de calibração dos 18 ensaios.....	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Planejamento de experimentos.....	23
Quadro 2 - Resultado da fotólise da solução de 5 mg.L ⁻¹	31
Quadro 3 - Resultado da fotólise da solução de 10 mg.L ⁻¹	31
Quadro 4 - Resultado da adsorção.....	32
Quadro 5 - Resultado das absorbâncias no pH 2.....	34
Quadro 6 - Resultado das absorbâncias no pH 5,81.....	35
Quadro 7 - Resultado das absorbâncias no pH 8.....	35
Quadro 8 - Porcentagem de remoção de cada ensaio.....	36
Quadro 9 - Resultados da ANOVA.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos fatores.....	23
--	-----------

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. Indústria Têxtil.....	12
2.1.1. Azul de metileno.....	13
2.2. Adsorção.....	14
2.2.1. Fotocatálise.....	15
2.3. Catalisador.....	16
2.3.1. Sol gel.....	17
2.3.2. Chia.....	18
2.3.3. Nióbio.....	19
3. METODOLOGIA.....	19
3.1 Catalisador.....	19
3.1.1 Preparo do catalisador.....	20
3.1.2 Processo de secagem.....	20
3.1.3 Calcinação.....	21
3.2 Testes Fotocatalíticos.....	22
3.2.1 Planejamento Experimental.....	22
3.2.2 Preparação da solução de azul de metileno.....	24
3.2.3 Análise de desempenho de Remoção da Cor.....	25
3.2.4 Preparação para fotocatalise.....	25
3.2.5 Fotocatálise.....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1 Rendimento do catalisador.....	28
4.2 Caracterização do catalisador.....	28
4.3 Ensaio experimentais.....	29
4.3.1 Fotólise sob irradiação UV Artificial.....	30
4.3.3 Fotocatálise heterogênea sob irradiação UV Artificial.....	33
4.3.3.1 Curvas de calibração.....	33
4.3.3.2 Análise de absorbância dos ensaios.....	34
4.3.3.3 Porcentagem de remoção dos corantes.....	35
4.4 Planejamento experimental e análise estatística.....	36
4.4.1 Planejamento de experimento.....	36
4.4.2 Análise de variância.....	37
5. CONCLUSÕES.....	39

1. INTRODUÇÃO

O corante, segundo Rossi (2008) apresenta um histórico de milhares de anos, os primeiros registros são de 2600 a.C, extraídos de fontes naturais. No Brasil, no século XVI, surge uma importante fonte de corante natural, advindo do famoso Pau-Brasil (*Caesalpinia echinata*), da cor vermelha, e durante o século XIX o fornecimento do corante índigo, extraído da planta *Indigofera tinctoria*, mais conhecida como anil.

O primeiro corante artificial foi sintetizado por William Henry Perkin, durante suas férias de Páscoa do Royal College of Chemistry de Londres. Sua tentativa de produzir a quinina, usada como antimalárico, acidentalmente produziu o corante púrpura de anilina. Assim começou a indústria de produção de corantes artificiais (Resnick, 2018)

A área de tingimento e lavagem na indústria têxtil é um dos processos mais importantes para conferir cor e acabamento aos tecidos, mas é também uma das áreas com maior impacto no ambiente, principalmente devido à produção de águas residuais contendo corantes. Este processo envolve a adição de corantes químicos às fibras têxteis. Segundo Alcântara e Daltin (1996, p.325), “é importante dizer que não há corante que tinga todas as fibras existentes, e não há uma fibra que pode ser tingida por todos os corantes conhecidos”. Como resultado, muita água é desperdiçada juntamente com corantes, produzindo-se muitos poluentes, incluindo sais, metais pesados e outros compostos tóxicos que duram mais que a natureza. Se essas águas residuais forem lançadas sem tratamento adequado, poluirão os corpos d'água, reduzirão a penetração solar e afetarão a fotossíntese dos organismos aquáticos. Além disso, alguns corantes contêm substâncias tóxicas e cancerígenas, que representam uma ameaça à saúde humana e à biodiversidade.

Junto com a indústria têxtil, surge o ramo de lavanderias comerciais, onde algumas pessoas optam por terceirizar o serviço de lavar roupa, ação que também gera efluentes.

Em situações como essa, onde a degradação natural e até tratamentos convencionais não estão sendo muito eficazes, que se insere a catálise. Esse termo vem do grego *καταλειν*, introduzido por Berzelius, que significa afrouxar, dissolver (Figueiredo e Ribeiro, 2015 p.32). Dentro desse âmbito entra a adsorção, que é uma

operação de transferência de massa, que possui a habilidade em concentrar em sua superfície determinadas substâncias líquidas ou gasosas, gerando a separação de componentes (Ruthven apud Ferreira do Nascimento *et al*, 2020)

Diante dessa demanda, a presente pesquisa busca produzir um catalisador de nióbio, baseado em chia por meio de síntese verde, bem como verificar o rendimento de catalisador após a calcinação, caracterizar o catalisador por diferentes técnicas, avaliar a eficiência de adsorção do corante azul de metileno e determinar as melhores condições para uma atividade catalítica ótima, uma vez que a indústria e seus efluentes, principalmente da têxtil e de lavanderias, têm gerado a necessidade de alternativas mais eficientes para a retirada dos corantes. O descarte sem o devido tratamento pode acarretar diversos problemas à vida marinha e aos humanos que consomem água na região, sendo essencial que se busque por métodos mais eficientes e sustentáveis, que possibilite o alto rendimento em adsorção do azul de metileno (principal corante presente nessas indústrias).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Indústria Têxtil

De acordo com Ferreira (2022), a indústria têxtil é uma das mais antigas do mundo, utilizando diferentes tipos de corantes no processo produtivo, os quais possuem dois grupos principais, o grupo funcional, responsável pela fixação do corante à fibra, e o grupo cromóforo, responsável pela cor. Os efluentes com corantes, de acordo com o autor, possuem alta toxicidade e carcinogenicidade para os seres vivos.

Batista (2022) afirma que a indústria têxtil no Brasil é a quinta maior produtora do mundo, e a segunda maior geradora de empregos. Contudo, devido a seu porte e constante expansão, há uma grande demanda de recursos para operação e uma grande quantidade de efluentes gerados. Colpini (2020, p. p.30861), através de Benincá (2012) e Zeng *et al.* (2009), afirma que “os efluentes gerados nas indústrias têxteis são compostos por altas concentrações de matéria orgânica e fortes colorações devido à presença de corantes, se caracterizam como fontes significativas de poluição dos corpos hídricos”.

Colpini (2020) também afirma que a indústria têxtil libera altas vazões de efluentes e que os sistemas de tratamento não são adequados para remover ou eliminar substâncias como corantes. Assim, gera-se grande poluição ambiental nos corpos hídricos, sendo os corantes a principal causa de contaminação dos recursos hídricos deste setor industrial, uma vez que aproximadamente 15% deles são liberados nos efluentes gerados durante o procedimento de tingimento (Silva, 2024). Além disso, a grande necessidade de recursos naturais, sua escassez e decaimento de qualidade geram preocupações neste setor, sendo uma das metas da indústria química adequar o gerenciamento de água, a fim de minimizar a contaminação por efluentes líquidos, através de processos tecnológicos de reciclagem.

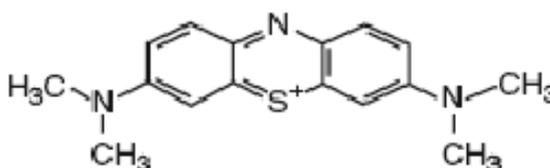
2.1.1. Azul de metileno

Makuda e Nicolini (2019) salienta que os corantes são substâncias orgânicas bastante utilizadas na indústria têxtil, a fim de fornecer cor através da ligação com as fibras do tecido, as quais podem ser de dois tipos, sendo estes os naturais - baseadas em celulose e proteínas - e os sintéticos - como viscose, acetato de celulose, poliéster, entre outros. Os corantes são divididos em corantes básicos,

ácidos, diretos, mordentes, de enxofre, de cuba, azóciois, dispersos e reativos, onde se encontra o Azul de Metileno, o qual é catiônico e apresenta grande estabilidade, pois se liga de forma iônica a grupos de cargas opostas. O azul de metileno é um composto químico aromático heterocíclico de estrutura planar, catiônico e tiazínico, que é amplamente aplicado nas indústrias têxteis, alimentícias, cosméticas e farmacêuticas (Khodaie *et al.*, 2013; Dardouri e Sghaeir, 2017; Yagub *et al.*, 2014; Starón *et al.*, 2019; Cusioli *et al.*, 2020; apud Figueiredo, 2023).

A fórmula molecular do corante Azul de Metileno é $C_{16}H_{18}ClN_3S$, conforme ilustrado na figura 1, e a massa molar é de $319,8 \text{ g.mol}^{-1}$, sendo bastante útil para tingir lãs, papéis, cabelos, algodão, jeans, entre outros (Vadivelan e Kumar, 2005, apud Makuda e Nicolini, 2019). Este composto não costuma ser tóxico, mas pode causar náuseas, vômitos, cefaléia, batimentos cardíacos aumentados, entre outros, bem como afetar o meio ambiente, se descartado de modo inadequado, limitando a passagem de luz e a ação fotossintética, alterando-se a biota aquática e aumentando a toxicidade de ecossistemas (Honorato *et al.*, 2015, apud Makuda e Nicolini, 2019).

Figura 1 - Fórmula estrutural do Azul de Metileno.



Fonte: Campagnolo, 2015.

2.2. Adsorção

A adsorção, segundo Gomes (2019, p. 17) consiste na

“[...] aderência de moléculas de um componente líquido ou gasoso a uma superfície sólida sem fazer parte de seu volume. As substâncias que ficam retidas à superfície sólida são chamadas adsorvatos, enquanto a superfície que promove a retenção do adsorvato é o adsorvente. “

Podendo ser classificado em dois tipos a depender da natureza das forças envolvidas em seu processo, sendo estas a fisissorção (adsorção física) - que ocorre

devido a uma diferença de forças de atração, sem alterações moleculares nas substâncias envolvidas no processo - e a quimissorção (adsorção química) - ocorre devido uma troca de elétrons entre as moléculas, resultando em uma reação química -, não precisando, necessariamente, ocorrer exclusivamente (Coelho *et al.*, 2014, apud Gomes, 2019).

2.2.1. Fotocatálise

A fotocatalise pode ser uma forma eficiente e versátil de controle e gerenciamento de efluentes aquosos, modificando, degradando ou mineralizando compostos orgânicos através da utilização de semicondutores (Colpini *et al.*, 2020). Estes são processos altamente vantajosos, uma vez que o corante é degradado e mineralizado durante o processo, fazendo com que ele se torne biodegradável, bem como possui capacidade antioxidante, viabilizando a utilização do resíduo em outros processos de tratamento (Batista, 2022).

De acordo com Silva (2022), o método fotocatalítico, como o próprio nome diz, é formado pelo catalisador e uma fonte de luz, produzindo um radical hidroxila quando expostos a luz podendo ser UV ou solar. A geração desta hidroxila é muito importante para o processo, uma vez que ela é altamente reativa e um importante oxidante, não seletiva, capaz de agir rapidamente sobre os resíduos orgânicos (Silva, 2022).

Existindo dois mecanismos de oxidação na fotocatalise, a via direta, que se dá quando a lacuna fotogerada na banda de valência do semicondutor reage diretamente com o composto orgânico, e a via indireta, quando a lacuna fotogerada na banda de valência reage com a molécula de H₂O adsorvida na superfície do semicondutor produzindo a radical hidroxila, que vai oxidar a matéria orgânica (Lopes *et al.*, 2015, apud Almeida, 2019)

O material semicondutor utilizado na fotocatalise é caracterizado por apresentar dois conjuntos, o de níveis de mais baixa energia - banda de valência (BV), que se encontra preenchido -, e o de níveis de mais alta energia - banda de condução (BC) e está vazio. Há, ainda, uma zona entre as bandas do semicondutor, denominada de bandgap (Monteiro, 2020).

O autor Silva (2022, p.18) afirma, ainda, que

“O processo fotocatalítico tem início com a absorção de fótons de energia maior ou igual à energia band gap do material semiconductor, havendo assim a promoção de um elétron (e^-) para a banda de condução (BC) e a geração de um buraco ou lacuna (h^+) na banda de valência (BV).”

As etapas do processo de fotocatalise podem ser divididas em cinco, sendo (a) difusão dos reagentes para a superfície da partícula do catalisador ou transferência dos reagentes na fase fluida para a superfície do catalisador, (b) adsorção dos reagentes ou de pelo menos um dos reagentes na superfície catalítica, (c) reação na superfície na fase adsorvida, (d) dessorção dos produtos e (e) difusão dos produtos na superfície (Almeida, 2019; Moya, 2015, apud Makuda e Nicolini, 2019).

Há, contudo, alguns parâmetros operacionais capazes de interferir no processo de fotocatalise, como a concentração de compostos inorgânicos - capazes de diminuir a velocidade de fotodegradação -, a concentração do fotocatalisador - proporcional à taxa de reação -, a concentração inicial do poluente orgânico - produz competição pelos sítios do catalisador -, a energia radiante incidente e comprimento de onda - devido ao espectro de absorção do semiconductor -, o pH - interfere nas etapas de adsorção e dessorção, e a temperatura - capaz de gerar degradação térmica. (; Iseke, 2015; Eduardo, 2009; apud Makuda e Nicolini, 2019)

Essa técnica possui, conforme Ferreira (2022) apresentou em seu trabalho, alta eficiência, rapidez na oxidação dos poluentes e não formação de produtos policíclicos, além de possibilitar a utilização de diversas fontes de irradiação. Sendo que a fotocatalise heterogênea pode ser aplicada no tratamento de água e geração de energia renovável a partir de energia solar e água, que são dois recursos altamente disponíveis no meio ambiente (Souza, 2023).

2.3. Catalisador

Diferentes processos têm sido utilizados para a remoção de corantes de águas, de acordo com Oliveira *et al.* (2019) dentre os quais se pode citar a adsorção com carvão ativado, decomposição enzimática e processos microbiológicos, os

quais possuem um alto custo operacional e, em alguns, casos a baixa eficiência com longos tempos de tratamento. O processo fotocatalítico tem se mostrado eficiente em tratamentos para degradação de poluentes de difícil remoção por tratamentos convencionais [1]. Desta forma, o desenvolvimento de materiais catalíticos avançados, que permitam a fotodegradação destes poluentes no meio ambiente, tem sido o foco de muitos estudos.

Os catalisadores são substâncias que, ao serem adicionadas a um processo tendem a aumentar ou reduzir a velocidade de sua reação sem ser consumida, as quais, geralmente, conseguem diferentes tipos de oxidação, sendo compostos por semicondutores na maioria das vezes (Ferreira, 2022).

O catalisador mais utilizado no processo fotocatalítico é o TiO_2 , porém outros semicondutores vêm despertando interesse [2], [3]. Uma alternativa promissora ao TiO_2 é o Nb_2O_5 , uma vez que materiais contendo nióbio têm despertado interesse crescente na pesquisa científica em catálise heterogênea, como demonstrado em estudos recentes (AMJAD et al., 2015; TANABE, 1990). Nb_2O_5 compartilha características de estabilidade química, atoxicidade e valor de band gap (3,4 eV) muito próximos aos do TiO_2 . No entanto, há uma lacuna¹ significativa nos estudos dedicados às propriedades fotocatalíticas do Nb_2O_5 (KALAN et al., 2016; YAN et al., 2015). Reações envolvendo semicondutores de nióbio dispersos em soluções, como o Nb_2O_5 , têm demonstrado potencial significativo quando excitadas por luz, promovendo reações conjuntas de oxidação e redução que podem resultar na oxidação seletiva de compostos orgânicos, na produção de hidrogênio molecular a partir da água ou na degradação de poluentes orgânicos (LOPES; PARIS; RIBEIRO, 2014).

¹[1] E. A. Serna-Galvis, A. M. Botero-Coy, D. Martínez-Pachón, A. Moncayo-Lasso, M. Ibáñez, F. Hernández,

R. A. Torres-Palma, *Water Research*, 154, (2019), 349.

[2] O. F. Lopes, V. R. Mendonça, F. B. F. Silva, E. C. Paris, C. Ribeiro, *Quim. Nova*, 38 (1), (2015), 106.

[3] R. R. N. Marques, M. J. Sampaio, P. M. Carrapiço, C. G. Silva, S. Morales-Torres, G.

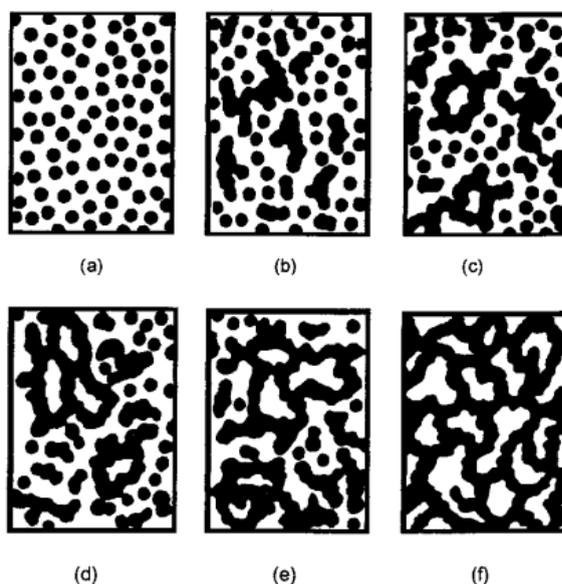
2.3.1. Sol gel

Este método é um processo homogêneo que resulta da transformação contínua de uma solução, em um sólido precursor hidratado (hidrogel) (Figueiredo e Ribeiro, 2015, p.113).

De acordo com Morais (2002), a transição sol-gel começa com a formação de fragmentos sólidos agregados, crescendo até que avance por todo o sol. A figura 2 representa essa transição (Morais, 2002, apud Rizzato, 1999).

Em (a) está representado o início do sistema, sendo constituído por partículas coloidais dispersas (sol). As partículas se ligam formando pequenas cadeias ramificadas (b) e regiões de microgel (c). Após estas etapas o sistema apresenta um comportamento elástico após alcançar metade do volume total, em crescimento, das regiões estruturadas, atingindo o ponto de gel (d). A partir deste ponto o crescimento é em conjunto, gerando uma rede que ocupa o volume de todo o sistema (e-f).

Figura 2 - Representação do processo sol-gel



Fonte: Morais, Evandro, 2022.

2.3.2. Chia

A chia é uma planta herbácea pertencente à família Lamiaceae. Tem sido cultivada no México há séculos e as sementes embebidas em água ou suco de

frutas foram e ainda são consumidas em algumas regiões como bebida refrescante (CAHILL, 2003).

Quando mergulhada em água, a semente forma um gel transparente mucilaginoso, composto essencialmente de fibras solúveis. As propriedades mucilaginosas da goma formada possuem qualidades que permitem sua aplicação em diversos produtos na indústria de alimentos (LIN et al., 1994). A chia é utilizada dentro do processo dessa pesquisa por conta dessa propriedade, permitindo substituir alcóxidos para o processo de sol-gel.

2.3.3. Nióbio

O nióbio (Nb) é o elemento 41 da tabela periódica, sendo um metal de transição, descoberto em 1801, pouco abundante na crosta terrestre, sendo geralmente encontrado junto com o tântalo. O pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) é o óxido mais estável do nióbio, podendo ser um bom semicondutor a ser empregado nos processos catalíticos ácidos, bem como possui um bandgap de 3,1 a 4,0 eV. Ademais, é um sólido branco, não solúvel em água, com estabilidade se exposto ao ar, além de dispor de uma alta absorção energética quando exposto à luz ultravioleta (UV). O que interfere diretamente nas atividades catalíticas, já que estas são funções de variáveis, como área de superfície, morfologia, estrutura cristalina, tamanho de partículas o pentóxido de nióbio, sendo esta uma substância promissora para o processo, uma vez que dispõe de propriedades como alta atividade catalítica (Lopes et al., 2015; Bolzon, 2007; Gallo, 2018; apud Makuda e Nicolini, 2019).

Assim, como afirma Souza (2023), o Nb_2O_5 surge como uma nova alternativa de fotocatalisador na degradação de contaminantes orgânicos, visto que possui similaridade das propriedades eletrônicas com o TiO_2 , apresentando caráter ácido, alta estabilidade química e alta absorção no espectro de radiação eletromagnética, indicando o potencial de aplicação deste composto.

3. METODOLOGIA

3.1 Catalisador

Para a preparação do catalisador, utilizou-se de um processo bioinspirado no método sol-gel, onde se buscou substituir a utilização do precursor químico, como alcóxidos inorgânicos, de comum uso em tratamentos de efluentes, aplicando-se a chia como uma alternativa, uma vez que ela, em contato com a água, libera a mucilagem (Figura 3), que pode ser usado como agente estruturante para a produção do biocatalisador.

Figura 3 - Mucilagem da chia



Fonte: Macedo, 2025.

3.1.1 Preparo do catalisador

No preparo do catalisador, utilizou-se 50g de semente de chia em 250 ml de água, mantendo-se a solução em repouso por um dia e, em seguida, foi adicionado 5 g de pentóxido de níobio à solução, sendo agitado constantemente.

3.1.2 Processo de secagem

Após o preparo da solução, esta foi colocada na estufa (figura 4) a 100°C por 24 horas para secagem, sendo homogeneizada a cada 4 horas, a fim de melhorar a superfície de contato da solução com o calor. Após 24 horas, a solução foi retirada

da estufa e macerada para diminuir o tamanho das partículas, para, por fim, ser encaminhada para a mufla para realizar a calcinação.

Figura 4 - Estufa da Solid Steel usada na secagem



Fonte: Iwamoto, 2025.

3.1.3 Calcinação

Para o último processo do catalisador foi feita a calcinação, na mufla da figura 5, que é um processo de aquecimento a 400°C durante 3 horas, utilizando-se a temperatura de calcinação da chia, a fim de remover componentes voláteis e matéria orgânica. Esse processo foi feito sem atmosfera inerte. Ao fim, o material foi macerado novamente, para a uniformização do tamanho das partículas do catalisador, obtendo-se o catalisador finalizado e pronto, que foi caracterizado por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para a realização das análises de remoção do azul de metileno.

Figura 5 - Mufla da Jung usada para a calcinação



Fonte: Iwamoto, 2025.

3.2 Testes Fotocatalíticos

3.2.1 Planejamento Experimental

Na realização das análises, foram definidas 3 variáveis que podem ter grande influência nos resultados desejados, sendo estes: o pH, a concentração de catalisador e as partículas por milhão de azul de metileno na solução a ser analisada.

Com o objetivo de diminuir o número de ensaios necessários, identificou-se quais dessas variáveis apresenta maior influência, melhor compreensão da interações entre as variáveis e potencial para gerar maior confiabilidade nos resultados, utilizando-se o planejamento de experimentos (DOE - *Design of Experiments*), que é uma metodologia utilizada para atingir os objetivos já descritos anteriormente. O tipo de DOE utilizado será o fatorial completo, onde os 3 tipos de variáveis serão levados em consideração. Para o pH, utilizou-se 2, 5,81 e 8; para a concentração de catalisador (g/L), utilizou-se $0,5\text{g.L}^{-1}$, $0,75\text{g.L}^{-1}$ e 1g.L^{-1} , e por fim, ppm de azul de metileno, tendo sido utilizado 5 e 10.

Tabela 1 - Classificação dos fatores

Fatores	Ponto Central		
	(-1)	(0)	(+1)
pH (%)	2	5,81	8
Concentração Catalisador(g.L ⁻¹)	0,5	0,75	1
Concentração de Corante (mg.L ⁻¹)	5	-	10

Fonte: Iwamoto, 2025.

Dessa forma, realizou-se 18 ensaios, conforme descrito no quadro 1.

Quadro 1 - Planejamento de experimentos

Ensaio	pH	[Catalisador] (g.L ⁻¹)	[Azul de Metileno] (mg.L ⁻¹)
1	2	0,5	5
2	2	0,5	10
3	2	0,75	5
4	2	0,75	10
5	2	1	5
6	2	1	10
7	5,81	0,5	5
8	5,81	0,5	10
9	5,81	0,75	5
10	5,81	0,75	10
11	5,81	1	5
12	5,81	1	10
13	8	0,5	5
14	8	0,5	10
15	8	0,75	5
16	8	0,75	10
17	8	1	5
18	8	1	10

Fonte: Iwamoto, 2025.

3.2.2 Preparação da solução de azul de metileno

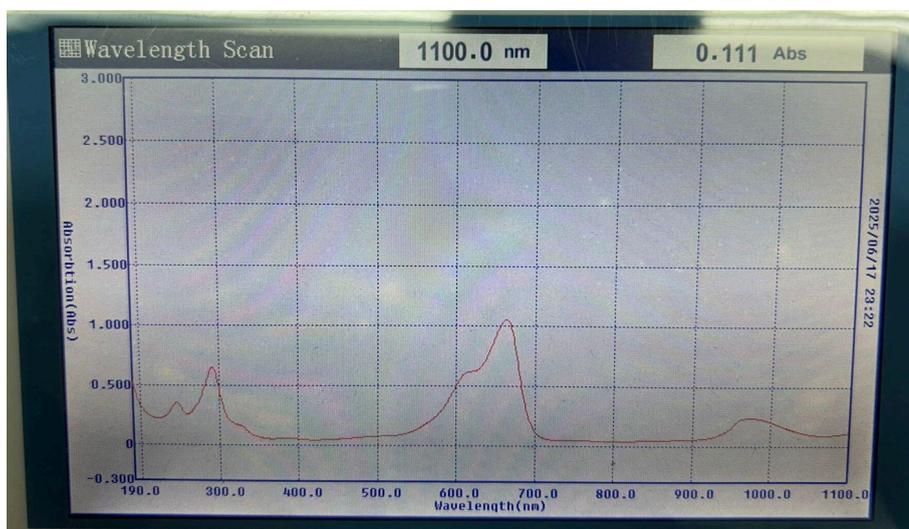
Para a preparação da solução com o corante, pesou-se o valor correspondente ao ensaio a ser realizado (de acordo com o quadro 1) de azul de metileno em um becker de 50ml. Após a pesagem, foi utilizado água destilada para dissolver e adicionar ao balão volumétrico de 1L (Figura 6). Antes mesmo da realização dos ensaios foi realizada uma varredura na no azul de metileno para encontrar o pico máximo de absorbância (figura 7).

Figura 6 - Solução já preparada para análise



Fonte: Iwamoto, 2025.

Figura 7 - Varredura do Azul de Metileno



Fonte: Iwamoto, 2025.

Para análise de absorbância é utilizado onde o comprimento de onda onde possui maior absorção, pois qualquer alteração na concentração gera uma diferença grande na absorbância, facilitando na análise. De acordo com a varredura realizada é possível ver que o comprimento de onda máximo é de 665 nm.

3.2.3 Análise de desempenho de Remoção da Cor

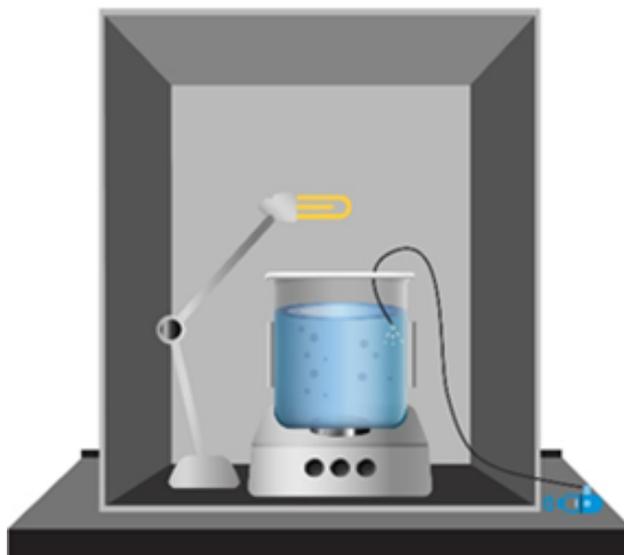
Ao analisar a remoção da cor foi utilizado um espectrofotômetro UV-VIS. As alíquotas foram retiradas nos seguintes intervalos de tempos: 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60 e 120 minutos. Para isso, foram organizados 16 tubos de ensaios, em 2 grupos de 8, sendo identificados de acordo com o tempo descrito. Após retirada de cada alíquota, o tubo de ensaio foi colocado na centrífuga, para separar o líquido do precipitado, que é o catalisador, transferindo-se o líquido para o segundo grupo de tubos para, por fim, fazer a análise de absorbância.

3.2.4 Preparação para fotocatalise

A partir da solução com corante azul de metileno, descrita no item 3.2.1, foi retirado 500 ml da solução e misturado com a massa correspondente ao ensaio realizado, em um becker de 600 ml. O becker foi colocado em uma caixa de alumínio, para evitar a entrada de luz solar, acoplado ao sistema de resfriamento. O

processo é realizado em agitação magnética constante e com ar sendo borbulhado no sistema (Figura 8).

Figura 8 - Ilustração do sistema reacional



Fonte: (Almeida et al., 2019).

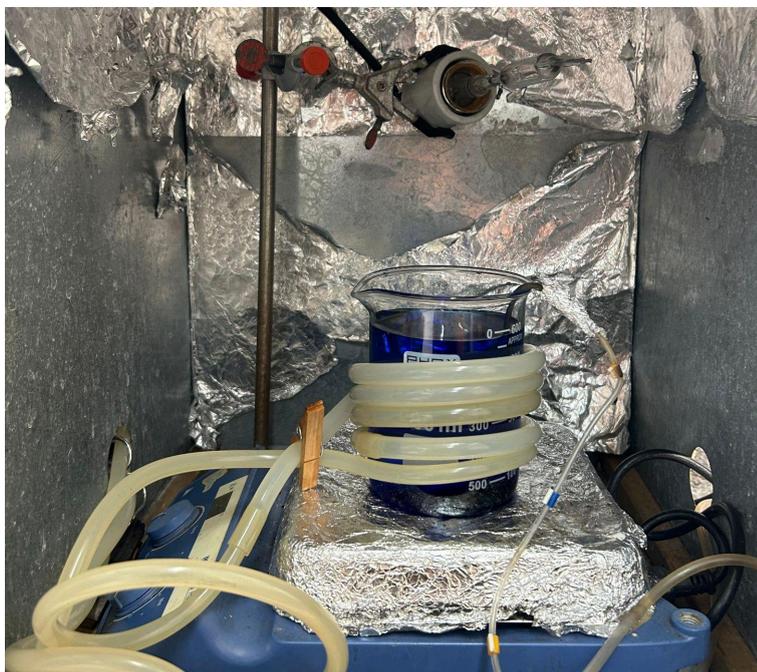
3.2.5 Fotocatálise

As reações catalíticas ocorreram em um reator batelada de 600 ml, contendo 500 ml da solução com corante a ser analisada. As reações foram conduzidas de forma aberta com um fluxo de ar borbulhado no meio numa vazão de $0,5L \cdot \text{min}^{-1}$.

Uma lâmpada de 250W foi colocada acima do béquer (aproximadamente 10 cm da solução), e para manter a homogeneidade, a solução foi agitada magneticamente. Em volta do reator foi envolto uma mangueira ligada a um refrigerador, que visa manter a solução em temperatura constante. Após todo o sistema ser instalado (figura 9), adicionou-se o catalisador (de acordo com o ensaio a ser realizado, conforme enumerado no quadro 1).

Nos tempos determinados, conforme mencionado no item 3.2.3, retirou-se amostras da solução, sendo depositadas em tubos, devidamente identificados com os tempos correspondentes, o quais foram centrifugados e analisadas no espectrofotômetro UV-VIS, em comprimento de onda de 665 nm, correspondente ao comprimento de maior absorção do azul de metileno. Os dados de absorbância obtidos foram anotados, e, por meio deles, realizou-se as curvas de calibração.

Figura 9 - Sistema da fotocatalise



Fonte: Iwamoto, 2025.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

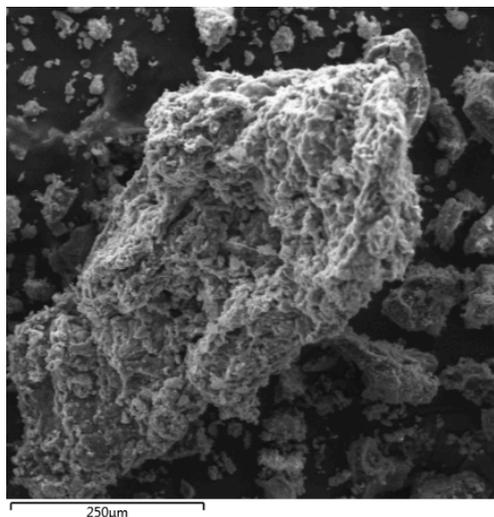
4.1 Rendimento do catalisador

Antes do processo de calcinação o catalisador com o cadinho pesou 48,0139 g, e após o processo foi de 37,0109 g, o peso do cadinho é 32,7021 g. A massa inicial de 10,0541 g se tornou em 4,3088 g, ficando um rendimento de 57,14%.

4.2 Caracterização do catalisador

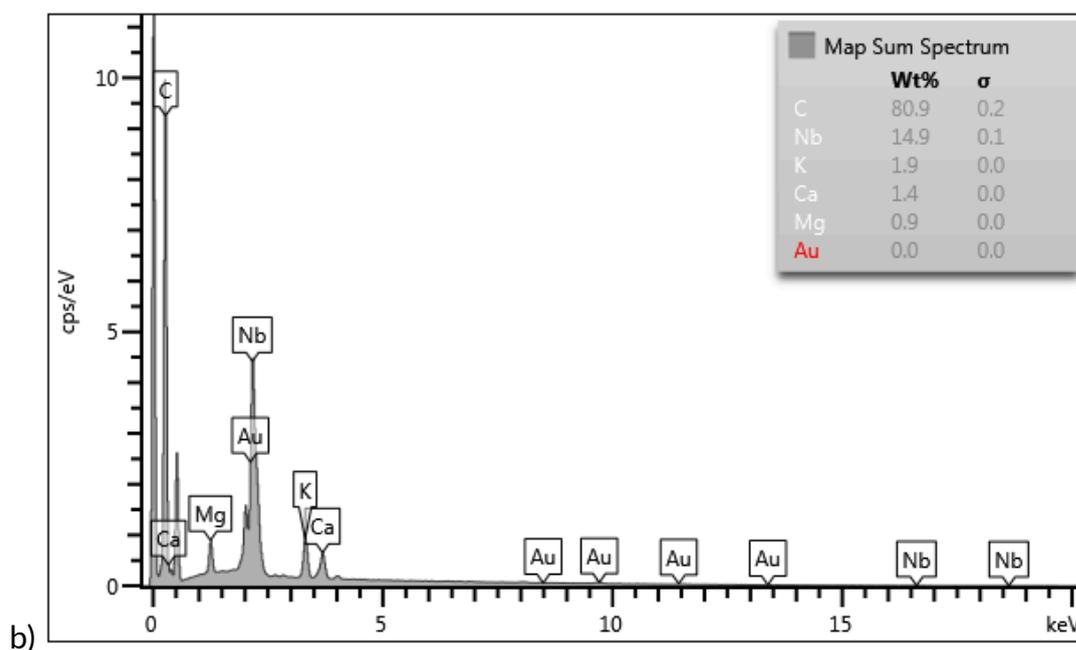
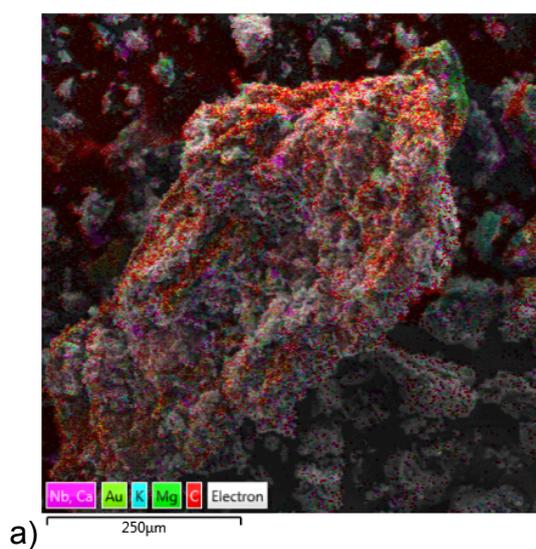
As figuras 10 e 11 correspondem à imagem e o gráfico obtidos por meio da microscopia eletrônica de varredura. A análise por MEV revelou uma morfologia com superfície irregular, composta de aglomerados de tamanhos pequenos e com rugosidade superficial. Por meio do EDS, observamos que a composição superficial é na sua maior parte carbono (80,9%), e o nióbio (14,9%). Os componentes como cálcio, magnésio e potássio estão presentes por conta da chia, já o ouro está presente por conta da metalização do material para o MEV e o EDS.

Figura 10 - Microscopia eletrônica de varredura do catalisador



Fonte: Iwamoto, 2025.

Figura 11 - Composição encontrada pelo EDS a) micrografia contendo os elementos encontrados; b) Mapa do Espectro.

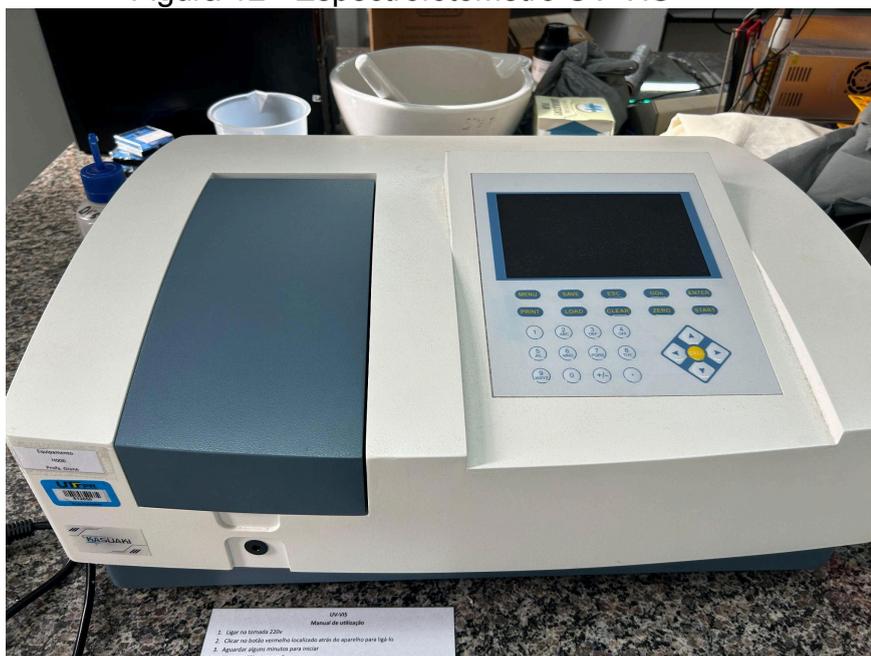


Fonte: Iwamoto, 2025.

4.3 Ensaios experimentais

Este tópico detalha os resultados de todos os testes realizados. São baseados na absorvância analisada através do espectrofotômetro UV-VIS (figura 12).

Figura 12 - Espectrofotômetro UV-VIS

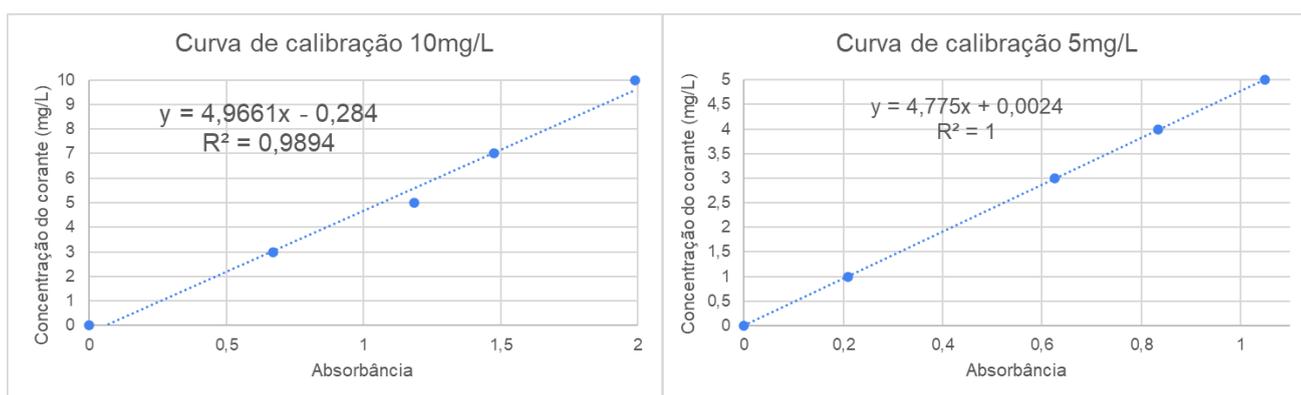


Fonte: Iwamoto, 2025.

4.3.1 Fotólise sob irradiação UV Artificial

A Figura 13 apresenta as curvas de calibração da fotólise sob irradiação UV artificial do azul de metileno, com concentrações de 5 e 10 mg.L⁻¹. Esse processo foi realizado para determinar a remoção do corante, nas condições aplicadas.

Figura 13 - Curvas de calibração da fotólise



Fonte: Iwamoto, 2025.

A fotólise foi realizada na mesma metodologia da fotocatalise, utilizando-se apenas a radiação sem catalisador, onde foram coletadas as amostras nos mesmos minutos. O quadro 2 e 3 apresentam os resultados da fotólise.

Quadro 2 - Resultado da fotólise da solução de 5 mg.L⁻¹

Tempo	Absorbância	Concentração (mg*L ⁻¹)
0	1,050	5,000
5	1,007	4,811
10	0,995	4,754
15	0,956	4,567
30	0,889	4,247
45	0,832	3,975
60	0,769	3,674
120	0,553	2,643

Fonte: Iwamoto, 2025

Quadro 3 - Resultado da fotólise da solução de 10 mg.L⁻¹

Tempo	Absorbância	Concentração (mg/L)
0	1,989	10,000
5	1,922	9,261
10	1,906	9,181
15	1,913	9,216
30	1,863	8,968
45	1,812	8,715
60	1,809	8,700
120	1,582	7,572

Fonte: Iwamoto, 2025

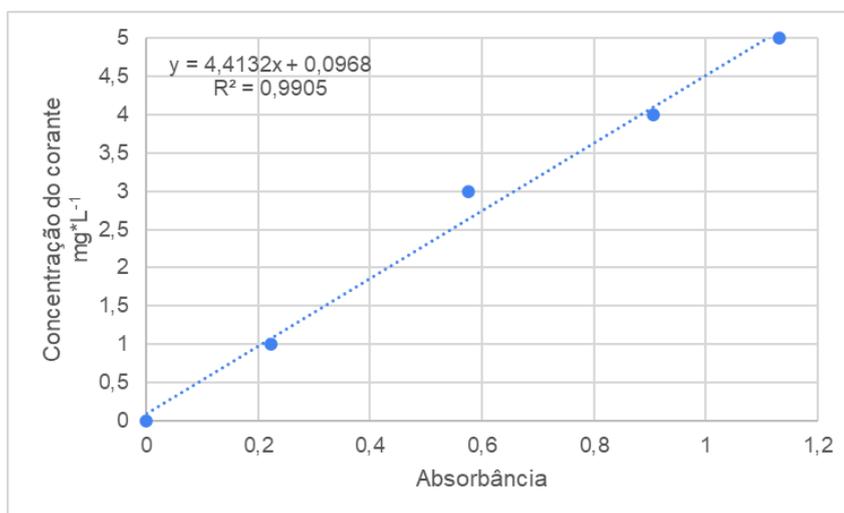
Os resultados mostram que a solução de 5 mg.L⁻¹ teve 47,14% de remoção, e a de 10 mg.L⁻¹ teve 24,28%, evidenciando a necessidade do catalisador para esse processo de remoção.

4.3.2 Adsorção do corante

O processo de adsorção foi feito sobre quase o mesmo sistema da fotocatalise. Foram separados 500 ml da solução já preparada, sob agitação magnética constante e borbulhamento do ar, porém sem o sistema de resfriamento

nem a luz UV. Ao colocar o catalisador iniciou-se o tempo e foram coletadas as amostras.

Figura 14 - Curva de calibração da adsorção



Fonte: Iwamoto, 2025

Quadro 4 - Resultado da adsorção

Tempo (min)	Absorvância	Concentração ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
0	1,132	5
5	0,682	3,11
10	0,641	2,93
15	0,604	2,76
30	0,458	2,12
45	0,389	1,81
60	0,35	1,64
120	0,24	1,16

Fonte: Iwamoto, 2025

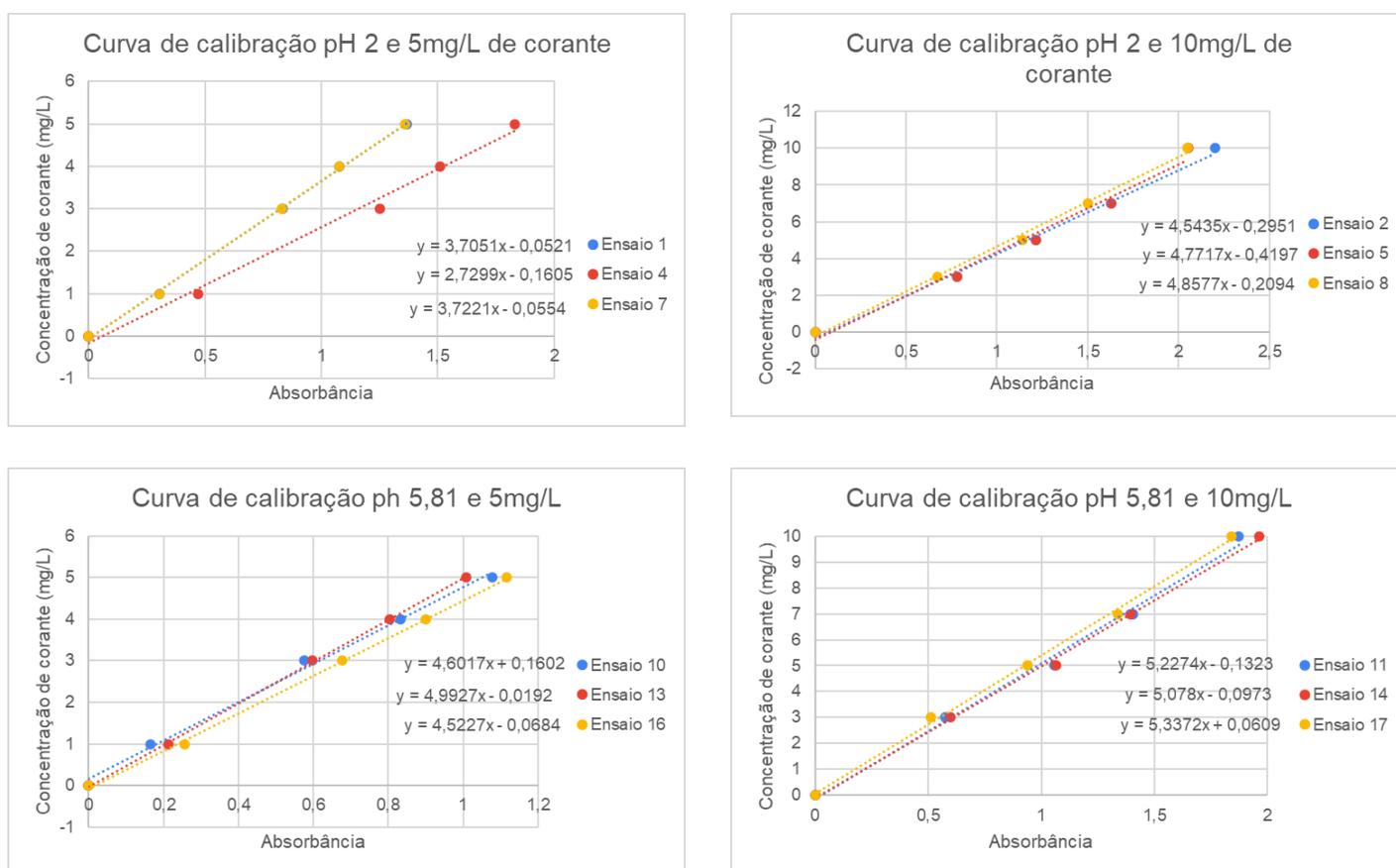
O processo de adsorção apresentou uma porcentagem de aproximadamente 77%, uma melhora significativa comparada a fotólise, demonstrando mais uma vez a necessidade do catalisador.

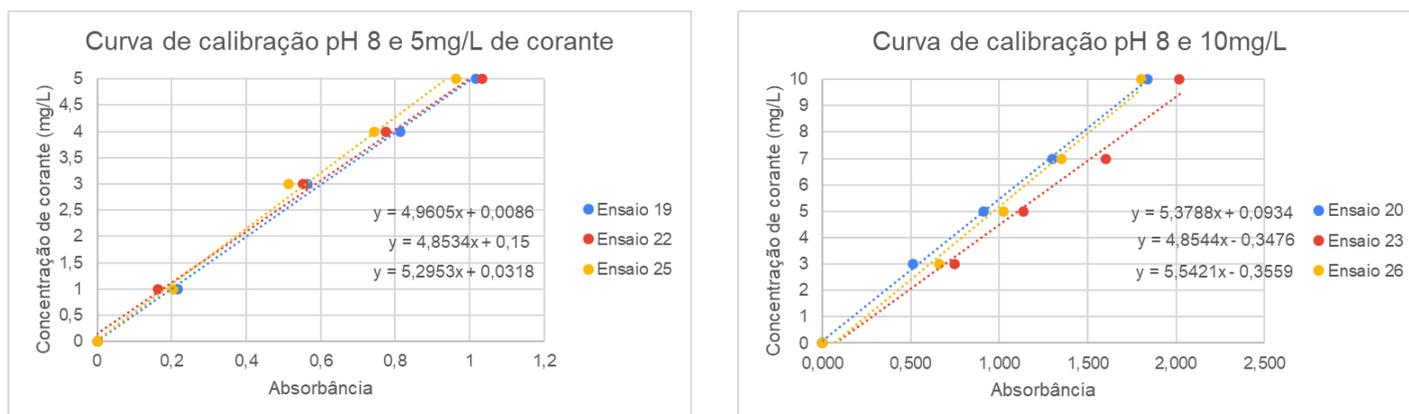
4.3.3 Fotocatálise heterogênea sob irradiação UV Artificial

4.3.3.1 Curvas de calibração

Por conta da necessidade de um número grande de ensaios, e não existindo a possibilidade de fazer uma solução estoque suficiente para todos, foi realizada a curva de calibração para cada ensaio, com objetivo também de encontrar as concentrações mais fielmente possíveis. A figura 15 apresenta 6 gráficos, divididos em pH e concentração de catalisador, que abrange as 18 curvas de calibração.

Figura 15 - Curvas de calibração dos 18 ensaios





Fonte: Iwamoto, 2025

4.3.3.2 Análise de absorvância dos ensaios

A avaliação da remoção do corante azul de metileno foi realizada por meio da análise de absorvância das amostras coletadas ao longo do tempo. Essa análise foi conduzida utilizando um espectrofotômetro UV-Vis, instrumento amplamente utilizado para monitoramento de compostos em solução devido à sua precisão e sensibilidade. O método baseia-se na absorção de radiação em comprimentos de onda específicos, permitindo correlacionar a intensidade da cor da solução à concentração do corante presente.

Quadro 5 - Resultado das absorvâncias no pH 2

	Absorvância					
Tempo (min)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
0	1,368	2,200	1,830	2,052	1,033	2,049
5	1,333	2,006	1,566	1,975	0,393	1,899
10	1,271	1,918	1,515	1,924	0,319	1,851
15	1,275	1,946	1,478	1,916	0,259	1,794
30	1,137	1,860	1,299	1,759	0,155	1,623
45	1,074	1,726	1,196	1,712	0,109	1,531
60	0,998	1,768	1,120	1,608	0,109	1,390
120	0,633	1,392	0,760	1,155	0,083	0,960

Fonte: Iwamoto, 2025

Quadro 6 - Resultado das absorvâncias no pH 5,81

Tempo	Absorbância					
	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10	Ensaio 11	Ensaio 12
0	1,078	1,941	1,008	1,961	1,117	1,839
5	0,918	1,787	0,863	1,876	0,945	1,724
10	0,901	1,750	0,714	1,790	0,931	1,681
15	0,894	1,723	0,746	1,751	0,868	1,634
30	0,823	1,582	0,660	1,603	0,847	1,586
45	0,620	1,488	0,683	1,553	0,822	1,444
60	0,661	1,335	0,666	1,567	0,743	1,389
120	0,309	1,024	0,458	1,238	0,587	0,856

Fonte: Iwamoto, 2025

Quadro 7 - Resultado das absorvâncias no pH 8

Tempo	Absorbância					
	Ensaio 13	Ensaio 14	Ensaio 15	Ensaio 16	Ensaio 17	Ensaio 18
0	1,017	1,839	1,033	2,018	0,963	1,800
5	0,547	1,379	0,439	1,382	0,811	1,778
10	0,488	1,464	0,332	1,345	0,743	1,788
15	0,421	1,477	0,276	1,240	0,816	1,764
30	0,303	1,400	0,166	1,074	0,684	1,742
45	0,228	1,376	0,119	0,933	0,561	1,603
60	0,149	1,147	0,097	0,877	0,481	1,666
120	0,107	0,805	0,124	0,450	0,289	1,491

Fonte: Iwamoto, 2025

4.3.3.3 Porcentagem de remoção dos corantes

Os resultados obtidos, dos ensaios previamente determinados pelo planejamento (quadro 1), por meio da fotocatalise heterogênea sob irradiação UV artificial estão representados no quadro 8. A porcentagem de remoção é baseada na análise de absorvância nos tempos já especificados, calculando a concentração final por meio da equação da reta da curva de calibração de cada experimento.

Quadro 8 - Porcentagem de remoção de cada ensaio

Ensaio	pH	Concentração de catalisador (g.L ⁻¹)	Concentração inicial (mg.L ⁻¹)	% Remoção do corante
1	2	0,50	5	54,14
2	2	0,50	10	39,71
3	2	0,75	5	61,72
4	2	0,75	10	51,88
5	2	1,00	5	94,92
6	2	1,00	10	55,43
7	5,81	0,50	5	68,36
8	5,81	0,50	10	47,76
9	5,81	0,75	5	54,66
10	5,81	0,75	10	38,08
11	5,81	1,00	5	48,26
12	5,81	1,00	10	53,7
13	8	0,50	5	89,22
14	8	0,50	10	55,77
15	8	0,75	5	84,96
16	8	0,75	10	81,63
17	8	1,00	5	70,02
18	8	1,00	10	20,39

Fonte: Iwamoto, 2025.

Comparando com a fotólise realizada, foi possível observar uma melhora significativa com a adição do catalisador. O máximo de remoção alcançado foi de 94,92%, correspondente ao ensaio 5, porém outros ensaios como 13, 15 e 16 também apresentaram bons resultados.

4.4 Planejamento experimental e análise estatística

4.4.1 Planejamento de experimento

Para o desenvolvimento e otimização do processo na remoção de azul de metileno da solução aquosa, empregou-se um planejamento de experimentos. Essa abordagem estatística foi fundamental para investigar, de forma eficiente e sistemática, a influência simultânea de múltiplos fatores nas respostas do processo.

Diferente de experimentos univariados, onde apenas um fator é variado por

vez, o Planejamento Experimental nos permitiu avaliar os efeitos individuais de cada variável (pH, concentração do catalisador e concentração inicial de azul de metileno) bem como as interações entre elas. Isso significa que é possível entender não apenas como cada fator afeta a remoção isoladamente, mas também como a combinação desses fatores pode otimizar ou inibir o desempenho do catalisador.

A utilização dessa metodologia minimizou o número de ensaios necessários, economizando tempo e recursos, e, mais importante, forneceu uma base robusta para a análise estatística dos resultados. Assim, foi possível identificar as condições ideais para a máxima remoção do corante, garantindo conclusões mais precisas e confiáveis sobre a eficácia do catalisador desenvolvido. O planejamento está detalhado no quadro 1.

4.4.2 Análise de variância

A análise estatística dos resultados do planejamento (quadro 1) foi realizada através da Análise de Variância (ANOVA) utilizando o software JASP. O objetivo dela é verificar a significância dos fatores pH, corante e catalisador, além da influência da combinação deles.

Quadro 9 - Resultados da ANOVA

Fator/Interação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
pH	0,087	2	0,044	2,443	0,203
Corante	0,271	1	0,271	15,153	0,018
Catalisador	0,022	2	0,011	0,617	0,584
pH * Corante	0,046	2	0,023	1,289	0,370
pH * Catalisador	0,180	4	0,045	2,513	0,197
Corante * Catalisador	0,053	2	0,026	1,478	0,331
Residuals	0,072	4	0,018	-	-

Fonte: Iwamoto, 2025.

Através do resultado da ANOVA é possível afirmar que apenas a concentração do corante tem efeito significativo no processo de remoção, nas condições avaliadas. O valor-p determina se o fator é ou não significativo, aderindo

$p < 0,05$ para sim e $p > 0,05$ para não. Todos os fatores, exceto a concentração de corante, possuem valor-p maior.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo principal a produção de um catalisador à base de chia e nióbio por síntese verde e a avaliação de sua eficiência na remoção do corante azul de metileno de soluções aquosas, por meio de um planejamento experimental fatorial completo. As análises realizadas permitiram caracterizar o material sintetizado e determinar as condições operacionais que influenciam o processo de remoção.

A caracterização do catalisador por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou que o material possui uma morfologia heterogênea, com partículas de tamanhos variados e superfícies rugosas. A análise elementar confirmou que o catalisador é predominantemente carbonáceo (80,9% em peso) e com presença do nióbio (14,9%), distribuído homogeneamente pela matriz. A presença de outros elementos como Mg, K e Ca também foi identificada e se dá ao fato da utilização da chia. Essas características morfológicas e composicionais são favoráveis para a aplicação em processos de adsorção e/ou catálise, oferecendo potencial para uma alta área superficial e a disponibilidade de sítios ativos.

Os resultados dos 18 ensaios experimentais, analisados por uma Análise de Variância (ANOVA) multifatorial, demonstraram que, dos fatores investigados – pH, concentração do catalisador e concentração inicial de azul de metileno –, apenas a concentração inicial de azul de metileno exerceu um efeito estatisticamente significativo na porcentagem de remoção ($p = 0.018$). Verificou-se que a eficiência de remoção foi consistentemente maior para a menor concentração inicial de corante (5 mgg.L^{-1}) em comparação com a concentração mais elevada (10 mg.L^{-1}), um resultado esperado em processos de remoção de poluentes.

Em contrapartida, o pH ($p = 0.203$) e a concentração do catalisador ($p = 0.584$) não apresentaram influência estatisticamente significativa na remoção de azul de metileno nas faixas estudadas. Além disso, a ausência de interações significativas entre os fatores ($p > 0.05$ para todas as interações de segunda ordem) indica que a ação de cada fator é relativamente independente dentro do escopo experimental.

Dentro das condições escolhidas para verificar a melhor atividade catalítica houve bons resultados. O máximo de remoção foi do ensaio 5 (94,92%), que

corresponde aos fatores: pH 2, concentração de catalisador de 1 g.L^{-1} e concentração de corante de 5 mg.L^{-1}

Antes do processo de calcinação havia uma massa inicial de 10,0541 g, e após diminuiu para 4,3088 g, ou seja, houve um rendimento de aproximadamente 57 % de catalisador.

Diante do exposto, este trabalho demonstrou a viabilidade da produção de um catalisador por síntese verde, utilizando chia e nióbio, e sua eficácia na remoção de azul de metileno. A significância da concentração inicial do corante sublinha a importância da otimização para efluentes com diferentes cargas de poluentes.

Para trabalhos futuros, sugere-se a investigação sobre a reutilização do catalisador após múltiplos ciclos de uso, avaliar a eficiência de remoção de outros poluentes orgânicos, verificar de forma mais detalhada o mecanismo de adsorção do catalisador e analisar o ponto de carga zero, para entender qual o melhor pH para uma atividade catalítica ótima

REFERÊNCIAS

Alcântara, M.; DALTIN, D. Química do processamento têxtil. **Química Nova**, v. 19, n. 3, p. 320-30, 1996.

Almeida, L. N. B.; Lenzi, G. G.; Pietrobelli, J. M. T. A.; Santos, O. A. A. Caffeine degradation using ZnO and Ag/ZnO under UV and solar radiation. **Desalination and Water Treatment**, v. 153, p. 85–94, 2019.

Amjad, U. et al. MgO and Nb₂O₅ oxides used as supports for Ru-based catalysts for the methane steam reforming reaction. **Catalysis Today**, v. 257, p. 122–130, nov. 2015. DOI: 10.1016/j.cattod.2015.02.010.

Dražić, J. L.; Faria, A. M. T.; Silva, C. **Catalysis Today**, 209, p. 108, 2013.

IPEF. **Corantes Naturais: Fontes, Aplicações e Potencial para Uso da Madeira**.

Disponível em:

https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistorico/informacoestecnicas/corantes_naturais_f_fontes_aplicacoes_e_potencial_para_uso_da_madeira.aspx. Acesso em: 2 fev. 2025.

Kalan, R. E. et al. P25 titanium dioxide coated magnetic particles: Preparation, characterization and photocatalytic activity. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 187, p. 249–258, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.01.008>.

Lin, Kuei-ying. Structure of chia seed polysaccharide exudate. **Science Direct**, Indiana-USA, v. 23, n. 1, p. 13-18, fev./1993. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014486179490085X>. Acesso em: 17 fev. 2025.

Lopes, O. F.; Paris, E. C.; Ribeiro, C. Synthesis of Nb₂O₅ nanoparticles through the oxidant peroxide method applied to organic pollutant photodegradation: A mechanistic study. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 144, p. 800–808, 2014.

Macedo, D. **Benefícios de Consumir chia**. Disponível em:

<http://daniellemacedo.com.br/2018/02/16/beneficios-de-consumir-chia/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

Mendonça, S.; Marquez, H.; Oliveira, L. Propriedades nutricionais e funcionais da chia (*Salvia hispanica* L.): Uma revisão. **Revista Brasileira de Alimentos**

Funcionais, v. 10, n. 2, p. 25-38, 2020. Acesso em 17 fev. 2025.

Morais, Evandro Augusto de. **Incorporação de Er em SnO₂ obtido via sol-gel: uma análise de xerogéis e filmes finos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. doi:10.11606/D.88.2002.tde-25102005-103032. Acesso em: 17 fev. 2025.

Nascimento, Ronaldo Ferreira do et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020. E-book. (Estudos da pós-graduação). Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53271>. Acesso em: 4 fev. 2025.

Pet Química. **Corantes, suas descobertas e contribuições**. Disponível em: <http://www.petquimica.ufc.br/corantes-suas-descobertas-e-contribuicoes/>. Acesso em: 2 fev. 2025.

Resnick, B. **How 18-year-old William Henry Perkin accidentally discovered the first synthetic dye**. Disponível em: <https://www.vox.com/science-and-health/2018/3/12/17109258/sir-william-henry-perkin-google-doodle-birthday-180-mauveine-purple-dye>.

Ribeiro, Luís Figueiredo; Ribeiro, Fernando Ramôa. **Catálise Heterogênea**. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2015. p. 1-548.

Tanabe, K. Application of niobium oxides as catalysts. **Catalysis Today**, v. 8, n. 1, p. 1–11, out. 1990. DOI: 10.1016/0920-5861(90)87003-L.

Yan, Y. et al. Carbon nanotube catalysts: recent advances in synthesis, characterization and applications. **Chemical Society Reviews**, v. 44, n. 10, p. 3295–3346, 2015. DOI: 10.1039/C4CS00492B.