



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÊXTIL
CURSO ENGENHARIA TÊXTIL

Stefani Shirazawa Evangelista

Estudo da degradação fotocatalítica de corantes têxteis em solução utilizando ZnO

Blumenau

2024

Stefani Shirazawa Evangelista

Estudo da degradação fotocatalítica de corantes têxteis em solução utilizando ZnO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Têxtil do Campus Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Têxtil.

Orientador(a): Prof.^o Dr.^o Carlos Rafael Silva de Oliveira

Coorientador(a): Prof.^a Dr.^a Catia Rosana Lange de Aguiar

Blumenau

2024

Evangelista, Stefani Shirazawa

Estudo da degradação fotocatalítica de corantes têxteis em solução utilizando ZnO / Stefani Shirazawa Evangelista ; orientador, Carlos Rafael Silva Oliveira, coorientador, Catia Rosana Lange Aguiar, 2024.

40 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Corantes. 3. Fotodegradação. 4. Fotocatálise. I. Oliveira, Carlos Rafael Silva . II. Aguiar, Catia Rosana Lange . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. IV. Título.

Stefani Shirazawa Evangelista

Estudo da degradação fotocatalítica de corantes têxteis em solução utilizando ZnO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Têxtil.

UFSC Blumenau, 28 de Junho de 2024.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



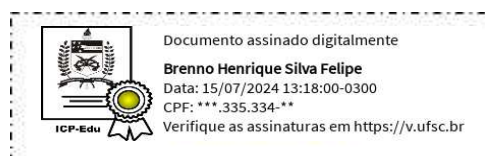
Prof. Carlos Rafael Silva de Oliveira, Dr.

Orientador



Prof.(a) Maria Elisa Philippsen Missner, Dr.(a)

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Brenno Henrique Silva Felipe Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 2024

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo imenso amor, cuidado e proteção até aqui. Ao meu pai, José Carlos, por nunca ter medido esforços para fazer o melhor por mim e por todo o apoio ao longo desses anos. À minha mãe, pelos ensinamentos e suporte incondicional. Aos meus irmãos, Maria Luiza e Guilherme, que sempre tornaram meus dias mais felizes.

Às minhas primeiras amigas que fiz logo que cheguei em Blumenau no pensionato: Lissa, Cecili e Malu. Aos amigos da automação, que se tornaram irmãos: Laura, Lucas, Vitor, José e Bruno. Sem dúvida, vocês fizeram meus anos na universidade serem muito especiais e cheios de histórias para contar. Aos irmãos em Cristo, que me receberam de braços abertos como família: Taiane, João, Andréia e Cyntia. Sem vocês, minha vida em Blumenau não teria sido a mesma.

Aos professores orientadores, Carlos Rafael S. de Oliveira e Catia R. Lange de Aguiar, por toda paciência, dedicação e carinho ao me acompanharem nessa reta final.

À técnica Andressa Fortes, do laboratório de beneficiamento, pela ajuda, companhia e cafés durante o tempo que passei no laboratório realizando os testes.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de estudar em uma das melhores universidades do país, com um ensino gratuito e de qualidade, onde pude me desenvolver e vivenciar momentos inesquecíveis da minha vida.

“Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com
você por onde você andar.” Josué 1:9

RESUMO

O estudo investiga a degradação fotocatalítica de corantes têxteis em solução utilizando óxido de zinco (ZnO) como fotocatalisador. A pesquisa destaca o impacto ambiental significativo dos corantes sintéticos utilizados na indústria têxtil, enfatizando a necessidade de métodos de tratamento eficazes para mitigar seus efeitos adversos. O foco principal é a capacidade do ZnO de atuar como fotocatalisador sob luz UV, gerando espécies reativas de oxigênio capazes de degradar moléculas de corantes orgânicos. Na metodologia, foram selecionados corantes catiônicos e reativos, especificamente Azul de Metileno e Tecofix Magic Orange KRF. Um espectrofotômetro UV-Vis foi utilizado para identificar os picos de absorção dos corantes, que foram encontrados em 667 nm para o Azul de Metileno e 541 nm para o Tecofix Magic Orange KRF. Curvas de calibração foram construídas para ambos os corantes a fim de quantificar suas concentrações durante o processo de degradação. Os experimentos fotocatalíticos foram conduzidos em uma câmara especialmente projetada e equipada com luz fluorescente UV-C de alta intensidade. O ZnO foi utilizado como fotocatalisador, e seu desempenho foi comparado à fotólise (degradação sob luz UV sem catalisador). Os experimentos demonstraram que o ZnO aumentou significativamente a taxa de degradação de ambos os corantes em comparação com a fotólise. Após 120 minutos de exposição à luz UV, observou-se uma redução substancial nas concentrações dos corantes, indicando a eficácia do ZnO no processo fotocatalítico. Os resultados mostraram que a presença do ZnO e sua exposição à luz UV criaram condições favoráveis para a fotocatalise heterogênea, resultando em uma degradação significativa de ambos os corantes catiônicos e reativos. Este estudo ressalta o potencial do ZnO como um fotocatalisador versátil e eficiente para o tratamento de águas residuais contaminadas com corantes, contribuindo para práticas mais sustentáveis na indústria têxtil.

Palavras-chave: fotocatalise, óxido de zinco, corantes têxteis, degradação UV, impacto ambiental.

ABSTRACT

The study investigates the photocatalytic degradation of textile dyes in solution using zinc oxide (ZnO) as a photocatalyst. The research highlights the significant environmental impact of synthetic dyes used in the textile industry, emphasizing the need for effective treatment methods to mitigate their adverse effects. The primary focus is on the ability of ZnO to act as a photocatalyst under UV light, generating reactive oxygen species capable of degrading organic dye molecules. In the methodology, cationic and reactive dyes were selected, specifically methylene blue and Tecofix Magic Orange KRF. A UV-Vis spectrophotometer was used to identify the absorption peaks of the dyes, which were found to be at 667 nm for methylene blue and 541 nm for Tecofix Magic Orange KRF. Calibration curves were constructed for both dyes to quantify their concentrations during the degradation process. Photocatalytic experiments were conducted in a specially designed chamber equipped with high-intensity UV-C fluorescent light. ZnO was used as the photocatalyst, and its performance was compared against photolysis (degradation under UV light without a catalyst). The experiments demonstrated that ZnO significantly enhanced the degradation rate of both dyes compared to photolysis alone. After 120 minutes of UV exposure, substantial reductions in dye concentrations were observed, indicating the effectiveness of ZnO in the photocatalytic process. The results showed that the presence of ZnO and its exposure to UV light created favorable conditions for heterogeneous photocatalysis, resulting in significant degradation of both cationic and reactive dyes. This study underscores the potential of ZnO as a versatile and efficient photocatalyst for treating dye-contaminated wastewater, contributing to more sustainable practices in the textile industry..

Keywords: photocatalysis, zinc oxide, textile dyes, UV degradation, environmental impact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo do mecanismo de fotoativação	24
Figura 2 – Fluxo dos ensaios de degradação fotocatalítica	26
Figura 3 – Estrutura molecular do corante catiônico Azul de Metileno	27
Figura 4 – Câmara de fotocatalise	28
Figura 5 – Curva de calibração dos corantes: a) catiônico; b) reativo	31
Figura 6 – Curva de degradação dos corantes no processo de fotólise: a) catiônico: Azul de Metileno; b) reativo: laranja	32
Figura 7 – Descoloração gradual: a) corante catiônico: Azul de Metileno (esquerda: antes; direita: depois); b) corante reativo: laranja (esquerda: antes; direita: depois)	33
Figura 8 – Curva de degradação dos corantes no processo de fotocatalise: a) catiônico Azul de Metileno; b) reativo laranja	34
Figura 9 – Resultado da fotocatalise: a) corante catiônico: Azul de Metileno (esquerda: antes; direita: depois); b) corante reativo: laranja (esquerda: antes; direita: depois)	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diluições Corante reativo Tecofix Magic Orange KRF e Corante Catiônico Azul de Metileno	29
Tabela 2 – Variação da concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo processo de fotólise	32
Tabela 3 – Variação da concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo no processo fotocatalítico	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO TÊXTIL	18
2.1.1 Tingimento têxtil	19
2.1.2 Estamparia têxtil	19
2.2 CORANTES TÊXTEIS	20
2.2.1 Corantes reativos	20
2.2.2 Corantes catiônicos	21
2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELOS CORANTES TÊXTEIS	21
2.4 PROCESSOS TRADICIONAIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS	22
2.5 DEGRADAÇÃO VIA PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA)	23
2.5.1 Mecanismos da fotodegradação	24
2.5.2 Fotodegradação de corantes têxteis	25
2.6 MATERIAIS COM PROPRIEDADES FOTOCATALÍTICAS	25
3 METODOLOGIA	26
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	27
3.2.1 Identificação dos picos de absorção	28
3.2.2 Construção da curva de calibração	28
3.2.3 Ensaios de degradação fotocatalítica	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 CURVA DE CALIBRAÇÃO DOS CORANTES	31
4.2 ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DOS CORANTES	32
4.2.1 Degradação dos corantes por fotólise	32
4.2.2 Degradação dos corantes por fotocatalise	33
5 CONCLUSÃO	37
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A importância da cor para a estética e comercialização de tecidos é inegável, independentemente de sua composição. Nesse contexto, a produção industrial e o uso de corantes sintéticos para o tingimento e estamparia têxtil têm ganhado enormes proporções atualmente. Os corantes sintéticos trouxeram estabilidade de cor e uma vasta gama de tons vibrantes, porém, sua natureza tóxica tem despertado sérias preocupações ambientais, pois os impactos adversos dos corantes sintéticos em todas as formas de vida e no meio-ambiente são evidentes (Khattab *et al.*, 2019).

O setor da moda, segundo o relatório *Forest for Fashion* (UNECE/FAO, 2019), não apenas contribui massivamente para a economia mundial, gerando cerca de 2,4 bilhões de dólares, mas também emprega mais de 75 milhões de pessoas globalmente. No entanto, sua responsabilidade por uma parcela significativa (2 a 8%) das emissões globais de carbono é alarmante. Essas emissões estão ligadas ao processo de produção, desde a irrigação do algodão e todo o seu processamento, até as emissões decorrentes do transporte logístico dos produtos obtidos (Oliveira *et al.*, 2021).

É fundamental salientar que a indústria têxtil consome uma proporção considerável de água, entre 10 e 645 litros por kg de produto dependendo dos processos de beneficiamento empregados, o que amplia a urgência da redução no consumo e reuso de águas industriais (Dilaver *et al.*, 2018). A água não apenas desempenha um papel vital nas funções metabólicas dos seres vivos, mas também é essencial para a qualidade de vida em várias esferas, desde o consumo doméstico até a atividade industrial (Vieira, 2023). A escassez de recursos hídricos tem instigado a necessidade crescente de reutilização das águas de rejeito industrial. No entanto, o tratamento dessas águas é complicado devido à diversidade de produtos químicos presentes, como sais, metais pesados provenientes dos corantes, tensoativos, dispersantes, corantes, entre outros, tornando o tratamento desses efluentes um desafio (Hassanzadeh *et al.*, 2017).

Para mitigar o impacto negativo dos efluentes têxteis, é crucial adotar métodos de produção aprimorados, bem como a substituição ou redução de matérias-primas tóxicas e a redução do consumo hídrico ou seu reuso. Além disso, é de suma importância que os métodos de tratamento de efluentes cumpram as restrições legislativas, e que técnicas mais eficientes e mais sustentáveis de tratamento sejam adotadas (Fukuro *et al.*, 2018). Nos últimos anos, alguns métodos bastante eficientes na degradação de poluentes têm sido testados para o

tratamento de efluentes têxteis. Entre esses métodos, os Processos Oxidativos Avançados (POA's) se destacam pela capacidade de converter contaminantes perigosos em compostos mais simples e menos nocivos, baseando-se na geração de espécies radicais de oxigênio capazes de degradar poluentes (Fukuro *et al.*, 2018).

Diversos métodos têm sido explorados para a remoção de corantes da água, sendo o tratamento fotocatalítico uma das abordagens mais eficazes. Óxidos metálicos como ZnO (óxido de zinco) e TiO₂ (dióxido de titânio) têm sido usados para essa degradação, sendo o ZnO um dos óxidos preferidos devido à sua disponibilidade. O ZnO é um material semicondutor que, quando exposto à luz UV, pode gerar espécies reativas de oxigênio, que são capazes de degradar moléculas orgânicas, incluindo corantes. Portanto, o ZnO possui potencial de fotodegradação, podendo atuar como um catalisador no processo de remoção da cor em solução (Oliveira, 2014). Nesse contexto, este estudo visa analisar o potencial de fotodegradação de corantes têxteis em solução utilizando o ZnO.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o potencial fotocatalítico de ZnO (óxido de zinco) para a degradação de corantes têxteis catiônicos e reativos em solução.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar a eficiência do ZnO na fotodegradação dos corantes têxteis: Catiônico Azul de Metileno e Reativo Tecofix Magic Orange KRF em solução;
- Comparar a taxa de degradação dos corantes têxteis: Catiônico Azul de Metileno e Reativo Tecofix Magic Orange KRF sob condições controladas;
- Compreender o mecanismo de ação do ZnO na fotodegradação dos corantes, incluindo a geração de espécies reativas de oxigênio;
- Comparar a eficácia da fotólise e da fotocatalise no processo de degradação dos corantes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será explorado o processo de beneficiamento têxtil, que transforma materiais têxteis crus em artigos acabados, passando pelas etapas de beneficiamento primário, secundário e terciário. O beneficiamento primário prepara o substrato removendo impurezas, enquanto o secundário aplica cor aos têxteis através de tingimento ou estamparia, utilizando diversas técnicas como serigrafia e estamparia digital. A fase terciária aprimora as propriedades físico-químicas e estéticas dos materiais. Serão discutidos também os diferentes tipos de corantes têxteis, incluindo os corantes reativos, que formam ligações covalentes com fibras de celulose, e os corantes catiônicos, conhecidos por sua intensidade e brilho, destacando-se pela resistência à lavagem em fibras acrílicas. O capítulo abordará a importância desses processos e materiais na qualidade final dos produtos têxteis, bem como os impactos ambientais associados ao uso de corantes e produtos químicos.

2.1 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO TÊXTIL

O beneficiamento têxtil engloba uma série de processos aplicados aos materiais têxteis com o intuito de transformá-los, partindo de seu estado cru (estado bruto, contendo impurezas naturais ou adicionadas às fibras) até a obtenção de artigos acabados, sejam eles brancos, tingidos, estampados ou com acabamentos específicos (Freitas, 2002). Esse processo pode ser dividido em três etapas distintas: beneficiamento primário, beneficiamento secundário e beneficiamento terciário.

O beneficiamento primário constitui a fase de preparação do substrato para receber tratamentos de coloração, isto é, visa a remoção de sujidades como óleos, pigmentação natural, poeira, resquícios de matérias vegetais, entre outros presentes no substrato cru (Aguiar, 2022).

O beneficiamento secundário refere-se à aplicação de cor, podendo ser total, no caso do tingimento, ou localizado, como ocorre na estamparia. O objetivo nessa fase é adicionar cor aos substratos têxteis utilizando corantes ou pigmentos (Aguiar, 2022). Os materiais têxteis podem ser tingidos na forma de fios, tecidos ou até mesmo peças prontas.

O beneficiamento terciário consiste na fase que altera as características físico-químicas do substrato após seu beneficiamento secundário, visando aprimorar as propriedades funcionais e estéticas do material (Aguiar, 2022). Essa etapa do processo busca

melhorar as propriedades e características do substrato têxtil visando atender requisitos específicos de desempenho ou aparência.

2.1.1 Tingimento têxtil

O estágio conhecido como beneficiamento secundário engloba os processos de tingimento, nos quais corantes são aplicados nos materiais têxteis. Essa etapa tem como propósito conferir cores aos materiais, empregando corantes e outros químicos auxiliares que promovem a coloração das fibras (Bastian, 2009). Nesse contexto, alterações físico-químicas na fibra ocorrem devido à interação fibra-corante e demais químicos usados no meio colorante (Salem, 2010).

O processo de tingimento é dividido em duas fases distintas: cinética e termodinâmica. A fase cinética diz respeito ao comportamento e velocidade de transferência dos corantes da solução para a superfície da fibra, podendo ser realizada por esgotamento ou impregnação. Enquanto isso, a fase termodinâmica do tingimento consiste na fase de fixação dos corantes às fibras por meio de reações químicas. Na etapa final do tratamento, o tecido passa por processos de lavagem com detergente e enxágue para remover todo o corante que não se fixou às fibras do substrato, evitando assim que o substrato libere corante quando submetido a lavagens domésticas, ou seja, garanta que o produto possua solidez de cor à lavagem (Maia, 2013).

2.1.2 Estamparia têxtil

A aplicação de padrões, desenhos e cores nos tecidos, conhecida como estamparia têxtil, desempenha um papel crucial na indústria. Apesar de ser um estágio criativo essencial para ampliar a variedade de produtos têxteis, a estamparia pode resultar em impactos ambientais substanciais devido à geração de efluentes têxteis concentrados de corantes e pigmentos, assim como o tingimento. Durante esse processo, uma gama de produtos químicos, corantes, espessantes e agentes de fixação são empregados para assegurar a qualidade e a resistência das estampas nos tecidos. Contudo, o descarte inadequado desses materiais pode transformá-los em efluentes com alto potencial poluente.

Diversos métodos são empregados na estamparia têxtil, incluindo *batik*, carimbo de madeira, *tie dye*, stencil, serigrafia, estamparia rotativa e estamparia digital, porém, independente da técnica usada, elevadas concentrações de corantes e pigmentos são

empregadas na impressão do substrato. Entre essas técnicas, as mais comuns e amplamente utilizadas na indústria são a serigrafia (estamparia localizada e estamparia rotativa) e a estamparia digital. A técnica de estamparia serigrafia implica na transferência de corantes por meio de uma tela esticada sobre um suporte (quadro ou cilindro). Essa tela é preparada com áreas permeáveis e impermeáveis (conforme a gravação da arte), permitindo a aplicação do corante apenas nas áreas desejadas do tecido (Kadolph, 2010). A estamparia rotativa é uma técnica voltada para produções serigráfica em larga escala, fazendo uso de cilindros que contêm gravado a arte desejada para aplicar a pasta colorante em tecidos em rolo, em alta velocidade, garantindo eficiência e uniformidade no processo. Já a estamparia digital utiliza impressoras especializadas que aplicam diretamente um jato de tinta no tecido, oferecendo precisão e adequação para reproduções complexas e detalhadas, atendendo às demandas por padrões sofisticados e variados e sem limitação de *rapport* no sentido do comprimento do tecido (Kadolph, 2010).

2.2 CORANTES TÊXTEIS

O termo "colorante" refere-se a um composto químico capaz de ser aplicado a uma diversidade de materiais, resultando, de modo mais ou menos permanente, na percepção visual de cor na mente humana. Esses materiais são categorizados em duas classes principais: corantes, que se dissolvem/dispersam em solução aquosa homogênea, e pigmentos, que são colorantes particulados que não possuem capacidade de se ligar diretamente às fibras por interações químicas precisando de um agente ligante para fixação, e que permanecem insolúveis em solução aquosa (Maia, 2013). A classificação dos corantes pode ser realizada com base na estrutura química do composto ou no método utilizado para fixá-lo à fibra têxtil (Guaratini, 2000).

Alguns corantes estabelecem ligações químicas primárias com a fibra, enquanto outros se prendem por ligações químicas secundárias, tais como as interações de Van der Waals, eletrostáticas, e pontes de hidrogênio. As formas predominantes de categorização desses compostos estão associadas à sua origem, estrutura e aplicação na indústria (Aguiar, 2022).

2.2.1 Corantes reativos

Corantes reativos são corantes que contêm grupos funcionais reativos, com a capacidade de criar ligações covalentes com grupos hidroxila presentes nas fibras de celulose,

por exemplo. Existem diversos tipos de corantes reativos, mas os principais incluem a função azo e antraquinona como grupos cromóforos (responsáveis pela cor), e os grupos clorotriazinila e sulfatoetilsulfonila como grupos reativos (responsáveis pela ligação). Nesse tipo específico de corante, a reação química ocorre através da substituição do grupo nucleofílico pelo grupo hidroxila encontrado na celulose. Esse grupo de corante se caracteriza por sua alta solubilidade em água e pela formação de uma ligação covalente entre o corante e a fibra, resultando em uma estabilidade maior na cor do tecido tingido quando comparado a outros tipos de corantes, nos quais o processo de coloração é baseado em ligações de maior intensidade (Guaratini, 2000).

2.2.2 Corantes catiônicos

De acordo com Aguiar (2022), os corantes catiônicos, também denominados básicos, são considerados os mais antigos dentre os corantes sintéticos. Eles são compostos por corantes azo e antraquinona, que contém sais quaternários de amônio ou fosfônico, juntamente com estruturas de triarilmetano e xantenos. Esses corantes se distinguem por suas características notáveis de brilho e intensidade de cor (Aguiar, 2022).

Esses corantes, derivados de compostos orgânicos, ionizam-se em meio aquoso, gerando cátions coloridos, o que os classifica como corantes básicos ou catiônicos. Eles recebem esse nome porque suas moléculas se dissociam em água, com o cátion sendo a porção colorida do corante. Quando há sítios aniônicos presentes na fibra, o corante se liga a eles, formando uma ligação covalente (Gurses *et al.*, 2016). Esses cátions são atraídos eletrostaticamente para substratos com carga negativa. A carga positiva desses corantes pode estar localizada em um grupo amônio ou distribuída de forma deslocalizada no cátion do corante. Geralmente, os corantes básicos têm baixa resistência à lavagem em várias fibras, exceto em fibras acrílicas, onde demonstram uma resistência relativamente boa devido a algumas ligações covalentes (Benkhaya *et al.*, 2017).

2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELOS CORANTES TÊXTEIS

Anualmente, esta indústria consome 93 trilhões de litros de água, correspondendo a 4% do total mundial de água doce captada (Lixo, 2019). Os processos de beneficiamento têxtil, que incluem purga, mercerização, desengomagem, alvejamento e tingimento, geram o maior volume de efluentes líquidos com alta carga contaminante. A tinturaria, responsável por

metade do uso de toda água usada na indústria têxtil, e o pré-tratamento, que consome 41% do total, são as etapas de maior consumo hídrico (Ramos, 2024).

Esta indústria também é uma das principais fontes de águas residuais coloridas, contribuindo significativamente para uma ampla poluição ambiental. A fabricação mundial de corantes tem alcançado a ordem de 800.000 toneladas por ano, com uma taxa de perda de 10 a 15% durante os procedimentos industriais têxteis (Manzoor *et al.*, 2019). Durante o tingimento têxtil, parte dos corantes aplicados nos tecidos não se fixa, resultando em altas concentrações desses nos efluentes. Apesar dos métodos de tratamento utilizados serem eficientes, como floculação e eletrodialise, nem todos os contaminantes presentes nos efluentes são removidos eficazmente (Hassaan, *et al.*, 2017).

Essa preocupação é evidenciada por pesquisas, como a conduzida pela ONG SOS Mata Atlântica, que revelou a má qualidade de muitos rios brasileiros. Apenas 11% foram avaliados como tendo boa qualidade, enquanto 35% foram classificados como “ruins” e 5% em estado crítico (Freitas *et al.*, 2017). Diariamente, as indústrias têxteis em todo o mundo despejam grandes volumes de efluentes líquidos contendo uma grande variedade de compostos químicos nocivos e metais, como cobre, chumbo, cobalto e cromo, provenientes dos processos de síntese de corantes e seu uso em tinturarias, o que contribui para a contaminação ambiental (Khattab *et al.*, 2019). Esses efluentes apresentam um potencial prejudicial tanto para a saúde pública quanto para a biodiversidade. A presença desses contaminantes nas águas podem causar uma série de problemas de saúde por contaminação direta (pela ingestão) e indireta (pela alimentação) (Islam *et al.*, 2019).

2.4 PROCESSOS TRADICIONAIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

Os efluentes industriais são descargas líquidas originadas nas instalações industriais, abrangendo tanto aqueles gerados durante a produção, quanto os provenientes das atividades de limpeza e outras fontes, que apresentam contaminação por substâncias utilizadas ou produzidas no estabelecimento industrial (Aguiar, 2022). O tratamento de efluentes visa não apenas a limpeza da água de rejeito, mas também pode possibilitar sua reutilização. Os métodos tradicionais de tratamento podem ser categorizados como físicos, químicos, biológicos e a combinação desses.

O tratamento físico envolve a remoção de materiais que possam prejudicar a eficácia das etapas subsequentes, como a separação de sólidos suspensos através de processos como gradeamento, peneiramento, separação de óleos e gorduras, sedimentação, flotação ou

destilação por membranas (Aguiar, 2022). No tratamento químico, são utilizadas substâncias químicas como agentes de coagulação, floculação, ajuste de pH, oxidação, redução e desinfecção, em diversas fases dos sistemas de tratamento. Por meio de reações químicas, esses processos visam remover poluentes ou preparar a mistura de efluentes para tratamentos subsequentes (Giordano, 2004). O tratamento biológico visa usar a matéria orgânica dissolvida ou suspensa como substrato para microrganismos como bactérias, fungos e protozoários, que a convertem em gases, água e novos microrganismos. Esses processos são classificados em lodo ativado, tratamentos aeróbicos, tratamentos anaeróbios e processos biotecnológicos (Aguiar, 2022). Entre os métodos disponíveis, os tratamentos biológicos são considerados opções superiores para a remoção de corantes sintéticos dos efluentes devido ao seu menor custo, alta eficiência e menor geração de poluição secundária (Nunes, 2019).

2.5 DEGRADAÇÃO VIA PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS (POA)

O aumento contínuo de águas residuais contendo poluentes não biodegradáveis liberadas no ambiente aquático têm impulsionado a necessidade de desenvolver tecnologias de descontaminação mais eficientes e seguras. Dentro desse contexto, os processos avançados surgem como uma abordagem inovadora no tratamento de águas e efluentes, visando mitigar os impactos ambientais ao converter os contaminantes em compostos mais simples, como dióxido de carbono (CO_2), ânions inorgânicos e água (Batista, 2022).

Esses processos compartilham uma característica importante: a geração do radical hidroxila ($\text{HO}\cdot$) em suas reações, entre outras espécies reativas de oxigênio. Esse radical é muito reativo e não é seletivo, o que significa que pode oxidar e decompor várias substâncias orgânicas presentes no meio, incluindo os poluentes tóxicos ou difíceis de remover (Araújo *et al.*, 2016). Os processos oxidativos avançados (POAs) destacam-se por sua eficácia na decomposição de compostos orgânicos, independentemente de seu estado. Eles são especialmente promissores no tratamento de águas contaminadas com corantes, pois podem degradar parcial ou completamente essas moléculas, que muitas vezes resistem aos métodos tradicionais de tratamento (Nunes, 2019).

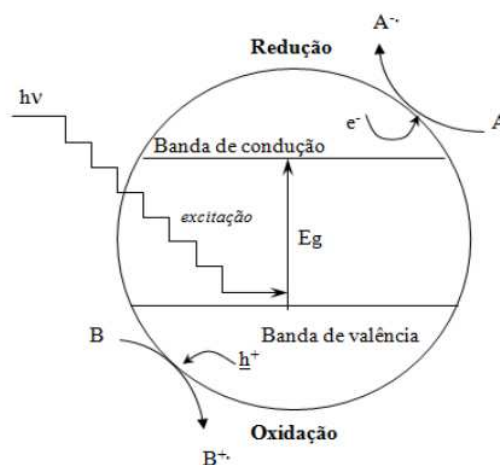
A fotocatalise heterogênea é um método alternativo promissor para eliminar compostos orgânicos da água. Diferentemente dos métodos tradicionais, os processos fotocatalíticos muitas vezes permitem a mineralização completa dos poluentes orgânicos com ausência de compostos intermediários residuais perigosos. A fotocatalise semicondutora é um POA recentemente desenvolvido, que pode ser convenientemente aplicado na degradação de

corantes poluentes. Essa técnica baseia-se na capacidade de certos materiais semicondutores de gerar espécies reativas quando expostos à luz (Hoffmann *et al.*, 1995).

2.5.1 Mecanismos da fotodegradação

A degradação fotocatalítica é um processo fotoquímico no qual a luz, geralmente ultravioleta (UV), e um fotocatalisador, combinados, promovem a geração de espécies reativas de oxigênio que atacam quimicamente moléculas orgânicas poluentes, promovendo sua degradação e formando compostos mais simples. A luz UV incide sobre a superfície do fotocatalisador, promovendo elétrons da banda de valência para a banda de condução, deixando lacunas na banda de valência. Os elétrons e lacunas gerados reagem com moléculas de água e oxigênio presentes no meio, formando radicais livres altamente instáveis, como radicais hidroxil ($\bullet\text{OH}$), hidroperoxil ($\bullet\text{OOH}$) e superóxido ($\bullet\text{OO}$). Esses radicais atacam e quebram as moléculas dos poluentes orgânicos, transformando-os em compostos menos nocivos, como CO_2 e H_2O . Na Figura 1 é possível visualizar o esquema do mecanismo de fotoativação.

Figura 1: Esquema representativo do mecanismo de fotoativação



Fonte: PEREIRA, 2012.

As principais propriedades de um semicondutor fotocatalítico incluem a geração de radicais hidroxila associada à energia do "band-gap" e sua durabilidade ao longo do tempo. Semicondutores que funcionam como fotocatalisadores possuem uma banda de valência (BV) de baixa energia, onde os elétrons têm mobilidade limitada, e uma banda de condução (BC) de alta energia, proporcionando condutividade elétrica semelhante à dos metais. Entre essas

bandas está o "band-gap", que é a energia mínima necessária para promover um elétron da banda de valência para a banda de condução (Rodrigues, 2014).

2.5.2 Fotodegradação de corantes têxteis

A fotodegradação de corantes têxteis refere-se ao processo de decomposição de corantes presentes em águas residuais ou superfícies têxteis através da ação da luz, geralmente luz solar ou UV artificial. A utilização exclusiva de luz rica em radiação UV, envolve mecanismos como a geração de radicais livres, reações oxidativas e a quebra de ligações químicas. Contudo, devido à estabilidade química de alguns corantes, a fotólise pode não ser suficiente para provocar uma degradação substancial ou pode ser completamente ineficaz. A adição de catalisadores fotoativos, como óxidos metálicos, pode aumentar consideravelmente a eficiência dos processos de fotodegradação (Giovanazzi, 2023).

2.6 MATERIAIS COM PROPRIEDADES FOTOCATALÍTICAS

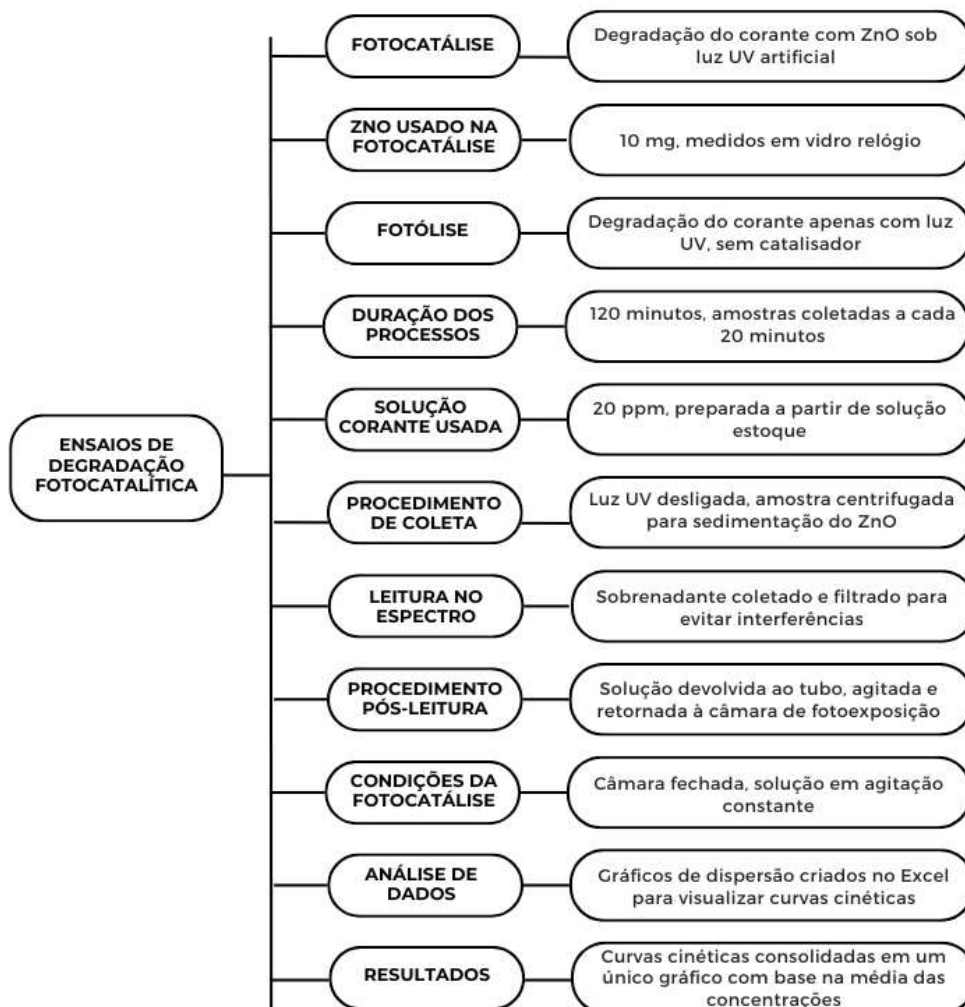
Um dos aspectos mais importantes da fotocatalise é a escolha de materiais semicondutores, como o óxido de zinco (ZnO). Este material é um fotocatalisador ideal, pois apresenta características principais como grande disponibilidade, baixo custo, não ser tóxico, ter amplo intervalo de banda (~3,37 eV), baixa energia de excitação (60 meV), alta mobilidade de elétrons, ampla faixa de absorção, alta estabilidade térmica e química, grande energia de ligação, excelente transparência na faixa visível, fotoestabilidade, resistência à oxidação, altas características piezoelétricas, biocompatibilidade e biodegradabilidade (Prerna et al., 2022).

O ZnO é tão eficaz quanto o TiO₂ em processos de degradação fotocatalítica sob radiação UV. Alguns estudos indicam que o ZnO demonstra uma eficiência superior ao TiO₂ na degradação fotocatalítica de certos corantes, mesmo em soluções aquosas. Outras vantagens do ZnO incluem uma maior capacidade de absorção de uma fração mais ampla do espectro solar em comparação ao TiO₂. No entanto, alguns estudos mencionam que o ZnO pode perder eficiência devido à sua tendência à fotocorrosão quando exposto repetidamente à luz UV. Por outro lado, essa tendência à corrosão pode ser mitigada mantendo o catalisador em soluções aquosas no escuro entre os testes, o que aumenta a eficiência do fotocatalisador semicondutor (Yassitepe et al., 2008).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, um estudo sobre potencial fotocatalítico de ZnO (óxido de zinco) para a degradação de corantes têxteis catiônicos e reativos em solução. São descritas as atividades realizadas na pesquisa, como os materiais e equipamentos utilizados e a coleta de dados. Na Figura 2, está apresentado o fluxograma com as etapas dos ensaios de degradação fotocatalítica para avaliar a eficiência da remoção de corantes por fotocátalise e fotólise.

Figura 2: Fluxo dos ensaios de degradação fotocatalítica.

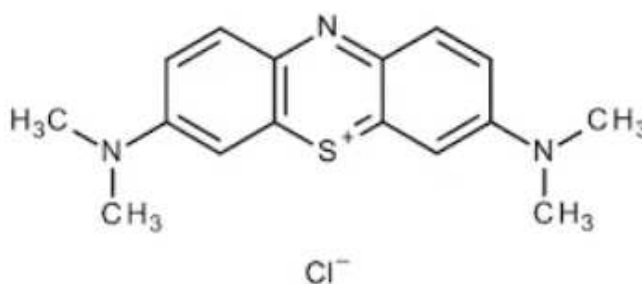


Fonte: Autor, 2024.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os ensaios realizados neste estudo contaram com a utilização do corante catiônico Azul de Metileno $C_{16}H_{18}ClN_3S$ e o corante reativo Tecofix Magic Orange KRF, obtidos da empresa Têxtil Color e como fotocatalisador foi utilizado o óxido de zinco (ZnO). A Figura 3 apresenta a estrutura molecular do corante catiônico Azul de Metileno. Por outro lado, a estrutura molecular do corante reativo Tecofix Magic Orange KRF não pôde ser identificada, pois trata-se de uma mistura de vários outros corantes, tornando difícil a determinação de sua composição exata.

Figura 3: Estrutura molecular do corante catiônico Azul de Metileno.



Fonte: Giovanazzi *et al.*, 2024.

Os equipamentos utilizados nas análises e experimentos foram: Câmara de fotocatalise com luz fluorescente de radiação UV-C de alta intensidade (220 - 290 nm), conforme Figura 4, Espectrofotômetro modelo UV M-51 (Bel Photonics), Agitador magnético modelo 100M028 (Matoli), e Centrífuga modelo DM 0412 (Lab 1000).

Os materiais utilizados para preparação da solução foram: béquer de 150 mL, pipeta graduada de 10 mL, proveta de 50 mL, pêra de sucção, vidro relógio e pissete com água destilada.

Figura 4: Câmara de fotocatalise.



Fonte: Giovanazzi, 2023.

3.2.1 Identificação dos picos de absorção

Para identificar o comprimento de onda associado aos picos de absorção dos corantes em estudo, soluções de concentrações desconhecidas foram preparadas para determinar o pico de absorção de cada corante utilizado. A análise foi realizada utilizando um espectrofotômetro UV-Vis (BEL PHOTONICS, modelo UV M-51).

3.2.2 Construção da curva de calibração

Para construção da curva de calibração, foram realizadas medições das intensidades dos picos de absorbância dos corantes Tecofix Magic Orange KRF e Azul de Metileno em diferentes concentrações, com uso do espectrofotômetro.

Foram preparadas duas soluções estoque de concentração 100 mg/L, uma do corante reativo e outra do corante catiônico. Em seguida, foram criadas faixas intermediárias de concentração, de 0 a 10 ppm, para medir a absorbância, pois quanto mais faixas, mais precisa seria a curva de calibração. As faixas foram de 2, 4, 6, 8 e 10 ppm, para que fosse construída uma curva de calibração confiável. Assim, foram calculados os volumes da solução estoque, para pipetar e transferir para os balões de 50 mL, a fim de realizar as respectivas diluições.

Para calcular o volume da solução estoque, utilizou-se a equação geral de diluição para determinar a concentração de uma solução após ser diluída em um solvente.

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (1)$$

Onde:

C_1 = Concentração inicial da solução (*mg/L*);

V_1 = Volume inicial da solução (*mg/L*);

C_2 = Concentração final da solução (*mg/L*);

V_2 = Volume final da solução (*mg/L*).

Posteriormente, o espectrofotômetro foi zerado com água destilada, usada como padrão, para indicar ausência de cor durante as leituras no equipamento. Em seguida, anotou-se os valores medidos de absorvância para cada diluição no espectrofotômetro, para realizar a regressão linear com os resultados obtidos e obter a função da reta, através do software Microsoft Excel. A Tabelas 1 apresenta as diluições dos corantes Tecofix Magic Orange KRF e Azul de Metileno.

Tabela 1: Diluições Corante reativo Tecofix Magic Orange KRF e Corante Catiônico Azul de Metileno

Faixas (ppm)	Absorção medida corante reativo	Absorção medida corante catiônico
2	0,008	0,132
4	0,016	0,258
6	0,027	0,375
8	0,038	0,536
10	0,049	0,687

Fonte: Autor, 2024.

3.2.3 Ensaios de degradação fotocatalítica

Os ensaios ocorreram no Laboratório de Beneficiamento (LABENE) do curso de Engenharia Têxtil, situado no campus de Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina. Foram realizados ensaios em duplicata para avaliar a eficiência da remoção dos corantes através dos processos de fotocatalise e fotólise. A fotocatalise investiga o desempenho da degradação do corante juntamente com catalisador ZnO sob luz artificial UV. A fotólise investiga o desempenho do corante exposto apenas à luz UV, sem a presença de um catalisador. Os dois processos tiveram duração de 120 minutos cada, e a cada 20 minutos foi realizada a retirada de um ponto da solução, para obter o número da concentração para realizar a curva cinética.

Para cada processo foi utilizado uma solução corante com concentração de 20 mg/L, feita a partir da solução estoque, com uso da equação geral de diluição, apresentada na equação (1). Com a equação geral de diluição, apresentada na equação (1), essa concentração resultou em um volume de 20 mg/L de corante, para uma solução de 100 mL.

Foram acrescentados 10 mg de ZnO em X mL de solução 20 ppm de cada corante. A cada intervalo de 20 minutos, a lâmpada na câmara foi desligada para interromper o processo. Em seguida, uma quantidade de amostra suficiente para preencher a cubeta foi retirada do meio reacional e submetida a uma centrifugação por 5 minutos a 3000 rpm. A centrifugação permitiu a sedimentação das partículas de ZnO presentes na amostra, que se acumulavam no fundo do tubo falcon. Para a leitura no espectrofotômetro, o sobrenadante da centrifugação foi coletado com o auxílio de uma seringa, e depois da coleta um micro filtro de seringa (filtrilo) foi usado para garantir que nenhuma partícula suspensa no sobrenadante fosse transferida para a cubeta de leitura e interferisse no resultado de absorção. Após cada leitura, a solução da cubeta era devolvida para o tubo falcon contendo as partículas sedimentadas e o tubo era agitado para dispersão das partículas sedimentadas e então a solução era retornada à solução inicial para iniciação de um novo ciclo de 20 minutos de fotoexposição. Durante a fotocatalise, a câmara se mantém fechada e a solução é mantida em agitação constante.

Para conduzir a análise, utilizou-se o *software Excel* para criar gráficos de dispersão dos pontos de cinética, visando a uma melhor visualização das relações entre as variáveis analisadas. Os resultados das curvas cinéticas de cada corante foram consolidados em um único gráfico, baseado na média das concentrações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos experimentos realizados, os principais resultados foram apresentados e discutidos, abordando as variações na absorbância, no tempo de degradação e na eficiência dos processos de fotocatalise. A análise dos dados obtidos ajudou a compreender a influência do catalisador, da luz e a interação entre ambos através da degradação dos corantes selecionados.

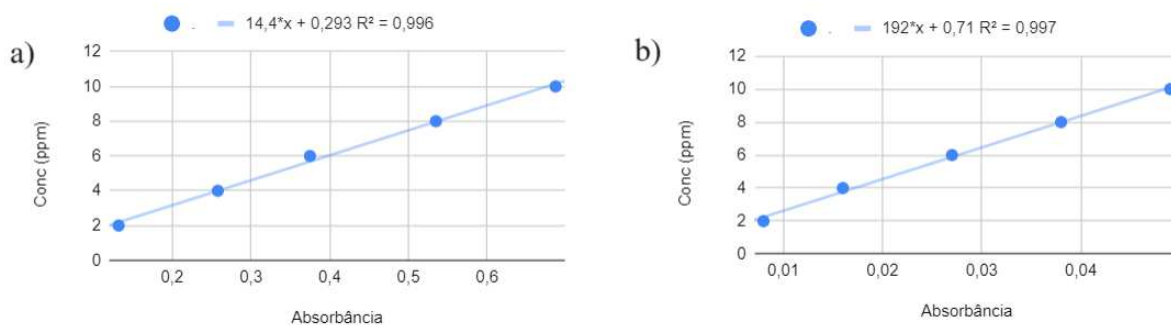
4.1 CURVA DE CALIBRAÇÃO DOS CORANTES

Foram preparadas soluções com concentrações conhecidas para determinar o comprimento de onda dos picos de absorção de cada corante estudado. Para esta análise, utilizou-se o espectrofotômetro Photonics UV-Vis. Os picos de absorção máxima obtidos para cada corante foram: Azul de Metileno a 667 nm e Tecofix Magic Orange KRF a 541 nm.

Para gerar os dados apresentados na Tabela 1, foram preparadas soluções estoque de 100 mg/L dos corantes Tecofix Magic Orange KRF e Azul de Metileno. A partir dessas soluções, foram realizadas diluições intermediárias de 2 a 10 ppm usando a equação de diluição $C_1V_1 = C_2V_2$. A absorbância dessas diluições foi então medida com o espectrofotômetro, que foi previamente calibrado com água destilada, e os valores obtidos foram registrados e organizados na Tabela 1.

Após determinar os picos de absorção, foram construídas as curvas de calibração para cada corante, utilizando os dados da Tabela 1. O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida crucial na avaliação do ajuste de um modelo, pois indica o quanto os valores previstos pela linha de regressão correspondem aos dados reais. Um valor de R^2 próximo de 1,0 indica que o modelo representa de maneira adequada o comportamento dos dados. A Figura 5 exibe as curvas de calibração para cada um dos corantes analisados. Por meio dos dados obtidos foi possível obter a equação da reta que descreve a relação entre concentração e absorbância para cada corante. Assim, será possível identificar uma concentração desconhecida de corante, por meio de leituras de absorbância.

Figura 5: Curva de calibração dos corantes: a) catiônico; b) reativo.



Fonte: Autor, 2024.

4.2 ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DOS CORANTES

Neste capítulo, será analisada a degradação dos corantes catiônico Azul de Metileno e reativo Tecofix Magic Orange KRF por fotólise utilizando apenas luz UV e fotocatalise com ZnO sob radiação UV-VIS.

4.2.1 Degradação dos corantes por fotólise

Foram realizados experimentos de fotólise para verificar a influência individual da irradiação UV-VIS no descoloramento das soluções de corantes. Os resultados obtidos no processo de fotólise (luz sem a presença de ZnO), estão apresentados na Tabela 2.

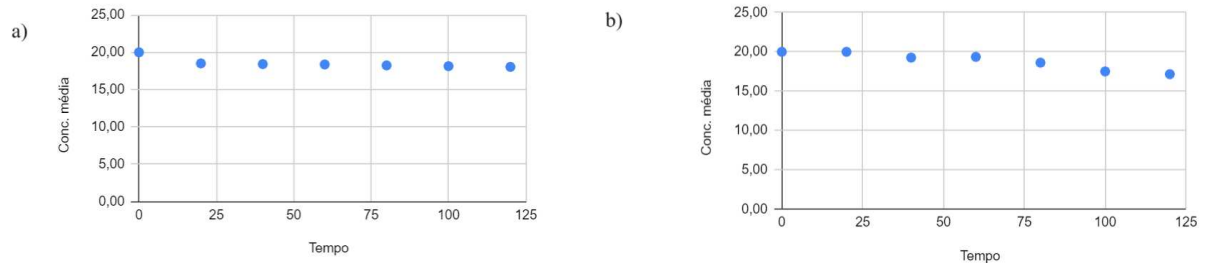
Tabela 2: Variação da concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo no processo de fotólise.

Tempo (min)	Corante catiônico (mg/L)	Eficiência Percentual Corante catiônico	Corante reativo (mg/L)	Eficiência Percentual Corante reativo
0	20,00 +/- 0,00	0,00%	20,00 +/- 0,00	0,00%
20	18,52 +/- 0,01	7,40%	20,00 +/- 0,00	0,00%
40	18,42 +/- 0,10	7,90%	19,27 +/- 0,05	3,65%
60	18,37 +/- 0,11	8,15%	19,36 +/- 0,08	3,20%
80	18,25 +/- 0,14	8,75%	18,63 +/- 0,04	6,85%
100	18,15 +/- 0,04	9,25%	17,51 +/- 0,55	12,45%
120	18,05 +/- 0,06	9,75%	17,16 +/- 0,06	14,20%

Fonte: Autor, 2024.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, a Figura 6 exibe os gráficos das curvas de degradação dos corantes.

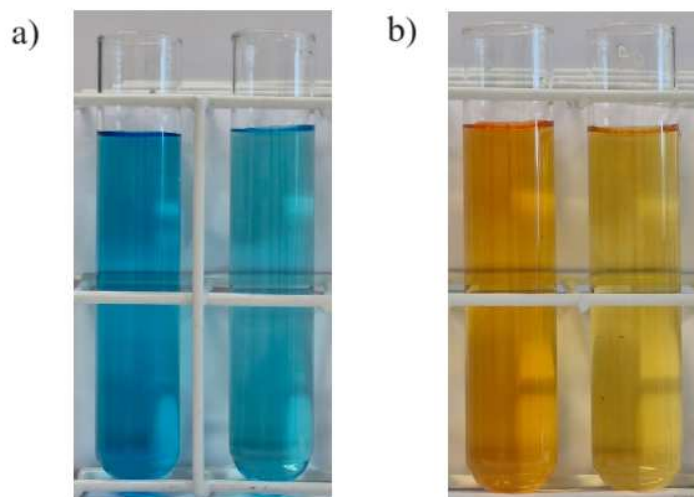
Figura 6: Curva de degradação dos corantes no processo de fotólise: a) catiônico: Azul de Metileno; b) reativo: laranja



Fonte: Autor, 2024.

O processo de fotólise foi realizado sem o uso do catalisador ZnO, utilizando apenas a luz UV. Os gráficos mostram que, embora ocorra uma pequena degradação dos corantes, esta é significativamente menor em comparação aos resultados do processo de fotocatalise. Isso ocorre porque a luz UV possui uma capacidade limitada para quebrar as moléculas de corante, destacando a importância do catalisador na aceleração do processo de degradação. Na Figura a seguir é possível visualizar a descoloração gradual do corante catiônico Figura 7a e do corante reativo Figura 7b.

Figura 7: Descoloração gradual: a) corante catiônico: Azul de Metileno (esquerda: antes; direita: depois); b) corante reativo: laranja (esquerda: antes; direita: depois).



Fonte: Autor, 2024.

Na Figura 7, observamos uma mudança visual na cor dos corantes. A primeira imagem apresenta os corantes antes do processo, com o corante catiônico de cor azul e o corante reativo de cor amarela. A segunda imagem mostra as amostras após o tratamento, indicando uma alteração na intensidade da cor.

Analisando a Figura 7 e comparando com os gráficos da Figura 6, é possível observar a variação da concentração média dos corantes ao longo do tempo. Ambos os corantes mostram uma tendência de redução na concentração, mas o corante reativo apresenta uma inclinação mais acentuada, indicando uma maior eficiência na degradação.

Comparando com os valores da Tabela 2, que apresenta valores numéricos para a concentração dos corantes e suas respectivas eficiências percentuais ao longo do tempo, observamos que o corante catiônico começa com uma concentração de 20,00 mg/L e reduz para 18,05 mg/L após 120 minutos, resultando em uma eficiência percentual de 9,75%. Já o corante reativo também inicia com 20,00 mg/L, mas reduz para 17,16 mg/L no mesmo período, alcançando uma eficiência percentual de 14,20%.

Portanto, a partir das evidências visuais, gráficas e tabulares, concluímos que o corante reativo apresenta uma maior eficiência de degradação ao longo do tempo no processo de fotólise, com uma redução de concentração mais significativa e uma maior eficiência percentual em comparação com o corante catiônico.

4.2.2 Degradação dos corantes por fotocatalise

Para avaliar a eficiência do processo de degradação de corantes por fotocatalise, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3, utilizando radiação UV-VIS e ZnO como catalisador.

Tabela 3: Variação da concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo processo fotocatalítico.

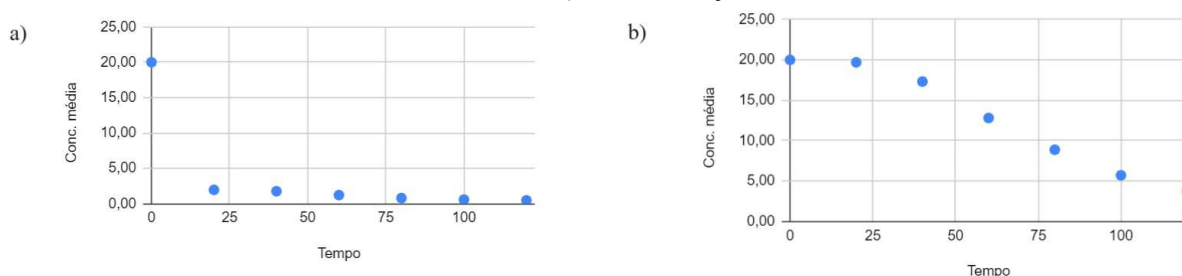
Tempo (min)	Corante catiônico (mg/L)	Eficiência Percentual Corante catiônico	Corante reativo (mg/L)	Eficiência Percentual Corante reativo
0	20,00 +/- 0,00	0,00%	20,00 +/- 0,00	0,00%
20	1,96 +/- 0,26	90,20%	19,70 +/- 0,30	1,50%
40	1,77 +/- 0,11	91,15%	17,32 +/- 0,14	13,40%
60	1,22 +/- 0,19	93,90%	12,81 +/- 0,54	35,95%
80	0,80 +/- 0,11	96,00%	8,87 +/- 0,68	55,65%
100	0,58 +/- 0,06	97,10%	5,70 +/- 0,54	71,50%
120	0,48 +/- 0,04	97,60%	3,69 +/- 0,14	81,55%

Fonte: Autor, 2024.

Através dos resultados obtidos na Tabela 3, é possível observar que houve uma redução significativa na concentração do corante catiônico após 20 minutos, em torno de 90 %, isso se deve ao fato de ter a influência do catalisador ZnO, estando de acordo com o processo gradual e de espécies reativas durante o processo de fotodegradação. Já para o corante reativo nos mesmos 20 minutos a redução foi mínima, somente após 120 minutos que foi possível obter valores próximos aos do catiônico.

Ao analisar a Figura 8, observa-se que o processo fotocatalítico com ZnO e o corante catiônico foi altamente eficaz e rápido, em torno de 97% de eficiência. Em contraste, o processo fotocatalítico com ZnO e o corante reativo foi mais lento. Além disso, nota-se que a concentração do corante diminui consistentemente com o aumento do tempo de irradiação.

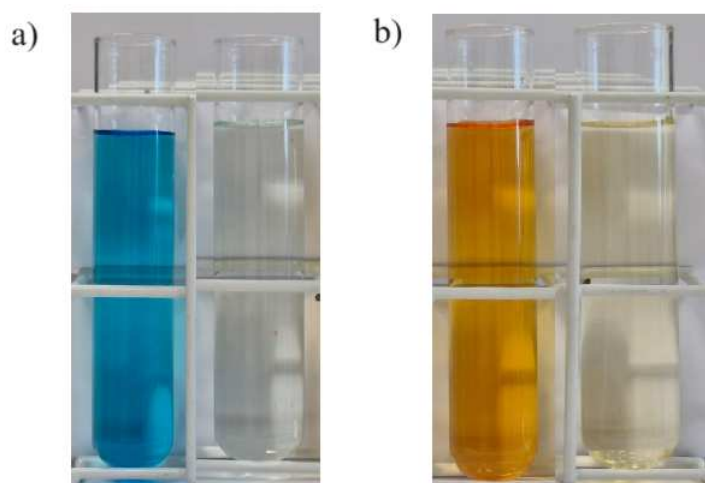
Figura 8: Curva de degradação dos corantes no processo de fotocatalise: a) catiônico Azul de Metileno; b) reativo laranja



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 9 evidencia a descoloração gradual da solução, comprovando o descoloramento da solução após 120 minutos de tratamento fotocatalítico.

Figura 9: Resultado da fotocatalise: a) corante catiônico: Azul de Metileno (esquerda: antes; direita: depois); b) corante reativo: laranja (esquerda: antes; direita: depois).



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 9 indica uma diminuição visível na intensidade das cores dos corantes, sugerindo uma degradação ao longo do tempo. Os gráficos da Figura 8 apresentam a concentração média dos corantes em função do tempo, com o corante reativo exibindo uma queda mais pronunciada, o que é corroborado pelos valores de R^2 (0,97 para o corante reativo comparado a 0,451 para o corante catiônico), indicando uma maior correlação e eficiência de degradação para o corante reativo. A Tabela 3 detalha essa eficiência percentual, mostrando que, após 120 minutos, o corante catiônico teve uma eficiência de 97,60%, enquanto o corante reativo alcançou 81,55%. Portanto, o corante catiônico apresentou uma maior eficiência percentual ao longo do processo fotocatalítico.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a fotocatalise com óxido de zinco (ZnO) é um método eficaz para a remoção de duas classes de corantes: catiônicos e reativos. A análise individual dos corantes revelou que o sistema fotocatalítico foi eficiente na degradação de ambos, destacando sua versatilidade para diferentes tipos de poluentes orgânicos.

A maior eficiência de degradação do corante reativo em comparação ao corante catiônico pode ser atribuída a várias diferenças: estrutura química, interação com o fotocatalisador ZnO, mecanismos de degradação, condições experimentais e eficiência de adsorção. Essas variáveis combinadas influenciam a taxa e a eficiência da degradação fotocatalítica, resultando nas diferenças observadas nos dados experimentais.

A presença de um fotocatalisador e sua exposição a uma fonte de luz UV apropriada criam condições favoráveis para a fotocatalise heterogênea, resultando em uma expressiva diminuição dos poluentes, como os corantes, devido à sua rápida degradação ao longo do tempo. Portanto, entender e otimizar essas variáveis é crucial para melhorar a eficiência da fotocatalise em diferentes tipos de corantes.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar os mesmos estudos porém variando pH, usando tricromia de corantes no meio, realizar a degradação de um efluente real, testar o ZnO fixado em um suporte, testar a degradação em pigmentos, testar a degradação com temperatura, testar combinando TiO₂ e ZnO, testar outros óxidos, entre outros.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Catia Rosana Lange de. **Engenharia Têxtil: Uma abordagem simplificada**. Florianópolis - SC: Ufsc, 2022. 311 p.

ARAÚJO, Karla Santos de *et al.* Advanced oxidation processes: a review regarding the fundamentals and applications in wastewater treatment and industrial wastewater. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 387, 15 abr. 2016. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1862>.

BASTIAN, Elza Yuriko Onishi. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil - Série P + L**. 2009. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/guia_textil.pdf. Acesso em: 25 nov. 2023.

BATISTA, Isabela dos Reis. **Processos Oxidativos Avançados (POAs): Uma revisão da importância da fotocatalise na descoloração de corantes têxteis como o verde malaquita**. 2022. 39 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Instituto Federal Goiano, Ceres – Go, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/2591/1/TCC%20-%20Isabela%20Reis.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2023.

BERGAMINI, Raphael Borges Magalhães. **Degradação de corantes têxteis ácidos e reativos por fotocatalise heterogênea, usando TiO₂, como fotocatalisador**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

BENKHAYA, Said *et al.* Classifications, properties and applications of textile dyes: A review. **Applied Journal Of Environmental Engineering Science**. Kénitra - Morocco, p. 1-10. set. 2017. Disponível em: <https://revues.imist.ma/index.php/AJEES/article/view/9681/5678>. Acesso em: 04 jun. 2024.

CHAKRABARTI, Sampa et al. Photocatalytic degradation of model textile dyes in wastewater using ZnO as semiconductor catalyst. *Journal of Hazardous Materials*. Índia, p. 1-10. Maio de 2004.

FASHION, Un Alliance For Sustainable. **UN Alliance For Sustainable Fashion addresses damage of 'fast fashion'**. 2019. Disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-alliance-sustainable-fashion-addresses-damage-fast-fashion>. Acesso em: 15 nov. 2023.

FUKURO, Izabelli Yumi; OKUSE, Jaime Willian. **Degradação do azul de metileno por fotocatalise heterogênea utilizando ZnO como catalisador**. 2018. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa - PR, 2018. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16599/1/PG_COENQ_2018_1_12.pdf. Acesso em: 23 nov. 2023.

FREITAS, Kátya Regina de. **Caracterização e reuso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil**. 2002. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - Sc, 2002. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84344/181231.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 nov. 2023.

FREITAS, Leandro Souza de *et al.* A FALTA DE SANEAMENTO E O IMPACTO AMBIENTAL EM RIOS URBANOS. **Revista Univap**, [S.L.], v. 22, n. 40, p. 433, 27 jan. 2017. Universidade de Vale do Paraíba. <http://dx.doi.org/10.18066/revistaunivap.v22i40.993>. Disponível em: <https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/993>. Acesso em: 16 maio 2024.

GIORDANO, Gandhi. **Tratamento e Controle de Efluentes Industriais**. 2004. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/citations?user=LkQvJcwAAAAJ&hl=pt-BR>. Acesso em: 16 maio 2024.

GIOVANAZZI, Lucas Ciucio. **Estudo da degradação fotocatalítica de diferentes corantes têxteis com TiO₂ P25**. 2023. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Têxtil, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/249585/TCC-LucasCiucio-assinado%20%28mandar%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 8 nov. 2023.

GIOVANAZZI, Lucas Ciucio *et al.* Photocatalytic Degradation Using TiO₂ P25: a comparative study for different textile dyes. **Brazilian Journal Of Animal And Environmental Research**, Blumenau, v. 7, n. 1, p. 125-144, 31 jan. 2024. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.34188/bjaerv7n1-011>.

GUARATINI, Cláudia C. I. ZANONI, Maria Valnice B.. Corantes têxteis. **Química Nova**, Araraquara - Sp, v. 23, n. 1, p. 71-78, fev. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/Hn6J5zNqDxVJwX495d4fnLL/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

GÜRSES, Ahmet *et al.* Classification of Dye and Pigments. In: GÜRSES, Ahmet *et al.* **Dyes and Pigments**. [S. L.]: Springer, 2016. p. 31-45.

HARIHARAN, C.. Photocatalytic degradation of organic contaminants in water by ZnO nanoparticles. **Applied Catalysis A: General**. Índia, p. 1-7. fev. 2006.

HASSAAN, Mohamed A.; NEMR, Ahmed El. Health and Environmental Impacts of Dyes: Mini Review. **American Journal of Environmental Science And Engineering**. Alexandria, Egypt, p. 1-4. maio 2017. Disponível em: <https://www.sciencepublishinggroup.com/journal/ajese>. Acesso em: 15 maio 2024.

HOFFMANN, Michael R. *et al.* Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. **Chemical Reviews**, [S.L.], v. 95, n. 1, p. 69-96, jan. 1995. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/cr00033a004>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/230718218_Elemental_Applications_of_Semiconductor_Photocatalysis. Acesso em: 05 jun. 2024.

ISLAM, M. R.; MOSTAFA, M. G.. Textile Dyeing Effluents and Environment Concerns - A Review. **Journal of Environmental Science And Natural Resources**. Bangladesh, p. 1-15. out. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336191877_Textile_Dyeing_Effluents_and_Environment_Concerns_-_A_Review. Acesso em: 01 maio 2024.

KADOLPH, Sara J. **Textiles**. New Jersey - EUA: Pearson, 2010. 581 p.

KHATTAB, Tawfik A. *et al.* Textile dyeing industry: environmental impacts and remediation. **Environmental Science And Pollution Research**. Cairo - Egypt, p. 1-16. 20 nov. 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-07137-z>. Acesso em: 28 nov. 2023.

LIXO, Menos 1. **O consumo de água pela indústria têxtil**. 2019. Disponível em: <https://www.menoslixo.com.br/posts/o-consumo-de-agua-pela-industria-textil#:~:text=Todos%20os%20anos%2C%20a%20ind%C3%BAstria,pela%20capta%C3%A7%C3%A3o%20de%2070%25>. Acesso em: 16 maio 2024.

MAIA, Elaine Regina Brito. **Avaliação do ciclo de vida no beneficiamento de malha: Estudo de caso em uma tinturaria no estado do Paraná**. 2013. 92 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá - Pr, 2013. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/3708/1/000222959.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023.

MACHADO, Tieli Caprioli. **Degradação fotocatalítica de rosuvastatina em solução aquosa empregando ZnO em suspensão: Cinética, subprodutos e toxicidade**. 2011. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MANZOOR, Javid *et al.* Impact of Textile Dyes on Human Health and Environment. In: WANI, Khursheed Ahmad *et al.* **Impact of Textile Dyes on Public Health and the Environment**. India: Igi Global, 2019. Cap. 8. p. 1-335. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338311453_Impact_of_Textile_Dyes_on_Human_Health_and_Environment. Acesso em: 01 maio 2024.

NUNES, Giovanna Ribeiro. **Geração e tratamento de efluentes da indústria têxtil**. 2019. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - Mg, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30898/1/GeracaoTratamentoEfluentes.pdf>. Acesso em: 16 maio 2024.

OLIVEIRA, Carlos Rafael Silva de *et al.* Textile Re-Engineering: eco-responsible solutions for a more sustainable industry. **Sustainable Production And Consumption**, [S.L.], v. 28, p. 1232-1248, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2021.08.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352550921002359?via%3Dihub>. Acesso em: 15 nov. 2023.

OLIVEIRA, Luana Silveira de. **Síntese de óxido de zinco nanoestruturado e sua caracterização microestrutural e de propriedades fotocatalíticas aplicadas à degradação**

de corantes. 2014. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/109678/000950956.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 22 nov. 2023.

PEREIRA, Marta Alexandra Cunha Duarte. **Degradação fotocatalítica do corante têxtil laranja II usando TiO₂ e ZnO imobilizados em peças cerâmicas**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2012. Disponível em: <https://repositorio.utad.pt/server/api/core/bitstreams/db8554c5-93da-4a7d-ae90-1fd11593f759/content>. Acesso em: 24 maio 2024.

PRERNA *et al.* Photocatalytic degradation of textile dyes using phyco synthesised ZnO nanoparticles. **Inorganic Chemistry Communications**, [S.L.], v. 142, n. 1, p. 109676, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109676>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1387700322004841#preview-section-references>. Acesso em: 04 jun. 2024.

RAMOS, Gabriela Marques dos. **Consumo de Água e Geração de Efluentes na Indústria Têxtil**. Disponível em: <https://www.flushengenharia.com.br/consumo-de-agua-e-geracao-de-efluentes-na-industria-tetil>. Acesso em: 16 maio 2024.

SALEM, Vidal. **Tingimento Têxtil: Fibras, Conceitos e Tecnologias**. São Paulo: Blucher, 2010. 299 p.

RODRIGUES, Flávia C. Souto M.. **Degradação fotocatalítica do antraceno empregando Ag-TiO₂ suportado em fibras de coco e sisal**. 2014. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/18618/3/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Flavia%20%2805-01%29.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2024.

VIEIRA, Leonardo de Andrade. **Ensaio em colunas empregando adsorventes naturais para tratamento de água contaminada com índigo blue**. 2023. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Industrial, Instituto Federal do Espírito Santo, Vila Velha - ES, 2023. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/3686/TCC_Ensaio_em_colunas_e_mpregando.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 23 nov. 2023.

YADAV, Renu *et al.* Photocatalytic degradation of textile dyes using β -CD-CuO/ZnO nanocomposite. **Journal Of Physics And Chemistry Of Solids**, [S.L.], v. 165, p. 110691, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110691>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022369722001196>. Acesso em: 15 nov. 2023.

YASSdTEPE, E. *et al.* Photocatalytic efficiency of ZnO plates in degradation of azo dye solutions. **Journal Of Photochemistry And Photobiology A: Chemistry**, [S.L.], v. 198, n. 1, p. 1-6, jul. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2008.02.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1010603008000658>. Acesso em: 04 jun. 2024.

