



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

Lucas Ciucio Giovanazzi

Estudo da degradação fotocatalítica de diferentes corantes têxteis com TiO₂ P25

Blumenau
2023

Lucas Ciucio Giovanazzi

Estudo da degradação fotocatalítica de diferentes corantes têxteis com TiO₂ P25

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: Prof. Dr. Carlos Rafael Silva de Oliveira
Coorientador(a): Prof^a Dr^a Catia Rosana Lange de Aguiar

Blumenau

2023

Giovanazzi, Lucas Ciucio

Estudo da degradação fotocatalítica de diferentes corantes têxteis com TiO_2 P25 / Lucas Ciucio Giovanazzi ; orientador, Carlos Rafael Silva Oliveira, coorientador, Catia Rosana Lange Aguiar, 2023.

53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Fotocatálise. 3. Corantes. 4. Fotodegradação. 5. Dióxido de titânio. I. Oliveira, Carlos Rafael Silva. II. Aguiar, Catia Rosana Lange . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. IV. Título.

Lucas Ciucio Giovanazzi

Estudo da degradação fotocatalítica de diferentes corantes têxteis com TiO₂ P25

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, auditório, 7 de julho de 2023.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



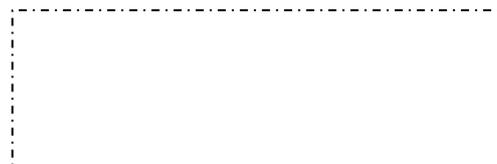
Prof. Carlos Rafael Silva de Oliveira, Dr.

Orientador



Prof. Maria Elisa Philippsen Missner, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina



Afonso Henrique da Silva Júnior, M.Sc.

Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau

2023

RESUMO

A degradação fotocatalítica de corantes têxteis utilizando óxidos metálicos tem sido amplamente estudada devido aos excelentes resultados observados. Essa abordagem é considerada bastante promissora por oferecer uma alternativa mais sustentável para o tratamento de efluentes têxteis contaminados por corantes e outros químicos, visando a redução do impacto ambiental causado pela indústria têxtil. Nesse contexto, a presente análise teve por objetivo realizar uma investigação sobre a degradação de diferentes classes de corantes têxteis sintéticos de uso industrial por meio do processo de fotocatalise heterogênea. Para isso, utilizou-se o TiO_2 P25 disperso em meio corante aquoso que foi exposto a uma fonte isolada de luz UV artificial. A relevância dessa pesquisa reside na compreensão dos fenômenos de fotodegradação e no estudo dos mecanismos de catálise heterogênea aplicada à degradação de corantes têxteis. Além disso, há o apelo pela sustentabilidade na indústria têxtil e a necessidade do conhecimento de meios para a redução da emissão de resíduos. Esta pesquisa contribui para o conhecimento sobre a degradação de corantes têxteis por meio da fotocatalise e fotodegradação, fornecendo informações acerca dos processos reacionais e dos principais fatores que influenciam a eficiência da degradação. Esses resultados podem ser úteis como suporte em estratégias sustentáveis para o tratamento de efluentes têxteis que visam reduzir o impacto ambiental causado pelos corantes.

Palavras-chave: Fotocatálise; Corantes; Fotodegradação; Dióxido de titânio.

ABSTRACT

The photocatalytic degradation of textile dyes using metallic oxides has been widely studied due to the excellent results observed. This approach is considered very promising as it offers a more sustainable alternative for the treatment of textile effluents contaminated with dyes and other chemicals, aiming to reduce the environmental impact caused by the textile industry. In this context, the present study aimed to investigate the degradation of different classes of synthetic textile dyes used in the industry through a heterogeneous photocatalysis process. For this purpose, TiO₂ P25 dispersed in an aqueous dye medium was used and exposed to an isolated source of artificial UV light. The relevance of this research lies in the understanding of photodegradation phenomena, and the study of heterogeneous catalysis mechanisms applied to the degradation of textile dyes. Additionally, there is a call for sustainability in the textile industry and the need to study ways to reduce waste emissions. This study contributes to the knowledge of textile dye degradation through photocatalysis and photodegradation, providing information about the reaction processes and the main factors that influence degradation efficiency. These results may be helpful as support in sustainable strategies for treating textile effluents aimed at reducing the environmental impact caused by dyes.

Keywords: Photocatalysis; Dyes; Photodegradation; Titanium dioxide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do processo fotocatalítico sobre a superfície do TiO ₂	23
Figura 2: Processo de montagem da câmara de fotocatalise.	26
Figura 3: Esquema de realização dos experimentos	27
Figura 4: Reta de calibração dos corantes estudados; (a) ácido, (b) reativo e (c) catiônico	31
Figura 5: Curva de degradação dos corantes no Processo A (fotocatálise); (a) ácido, (b) reativo e (c) catiônico.	33
Figura 6: Resultados de degradação do processo A (fotocatálise); (a) corante reativo, (b) corante reativo, (c) corante catiônico.	34
Figura 7: Curva de degradação dos corantes no Processo B (fotólise); (a) ácido, (b) reativo e (c) catiônico.	36
Figura 8: Resultados de degradação do processo B (fotólise); (a) corante reativo, (b) corante reativo, (c) corante catiônico.	37
Figura 9: Curva de degradação do corante ácido no processo C (dióxido de titânio no escuro); (a) ácido, (b) reativo e (c) catiônico.	38
Figura 10: Resultados de degradação do processo C (Dióxido de titânio no escuro); (a) corante reativo, (b) corante reativo, (c) corante catiônico.	40
Figura 11: Eficiência da remoção dos corantes (%) nos processos A, B e C.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação da concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo, para os corantes ácido, reativo e catiônico no processo fotocatalise.	32
Tabela 2: Concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo para os corantes ácido, reativo e catiônico no processo fotólise..	35
Tabela 3: Concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo para os corantes ácido, reativo e catiônico no processo dióxido de titânio no escuro..	38

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Color index e a estrutura atômica linear de cada um dos corantes	25
Quadro 2: Comprimento de onda máximo de absorção	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS.....	10
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
3.1 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO TÊXTIL	10
3.1.1 Beneficiamento secundário.....	13
3.1.2 Estamparia têxtil.....	13
3.2 CORANTES TÊXTEIS	14
3.3.1 Corantes reativos	15
3.3.2 Corantes ácidos	16
3.3.3 Corantes catiônicos	16
3.4 IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELOS CORANTES TÊXTEIS.....	17
3.5 PROCESSOS TRADICIONAIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	18
3.5.1 Degradação de poluentes via processos oxidativos avançados (POA)....	19
3.5.2 Processo de degradação fotocatalítica	20
3.5.2.1 Mecanismos de fotodegradação heterogênea.....	22
3.5.2.2 Fotodegradação de corantes têxteis	23
3.6 MATERIAIS COM PROPRIEDADES FOTOCATALÍTICAS	23
3.6.1 Dióxido de titânio	23
4 MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 MATERIAL.....	25
4.2 METODOLOGIA	27
4.2.1 Determinação dos picos de absorção dos corantes.....	27
4.2.2 Determinação das curvas de calibração dos corantes	27
4.2.3 Ensaios de degradação fotocatalítica dos corantes	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
5.1 PICOS DE ABSORÇÃO DOS CORANTES.....	30
5.2 ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DOS CORANTES EM ESTUDO	32
5.2.1 Degradação dos corantes após aplicação do processo A	32
5.1.2 Degradação dos corantes após aplicação do processo B	35
5.1.2 Degradação dos corantes após aplicação do processo C	37
6 CONCLUSÃO	41
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

A China é considerada a pioneira na indústria de corantes, sendo produtora desde o século VI a.C. A Índia também teve grande contribuição na criação e uso de técnicas milenares de tingimento com corantes naturais, sendo amplamente utilizados desde os tempos antigos. No entanto, a partir do século XIX, os corantes naturais foram substituídos por corantes sintéticos, como a anilina derivada do alcatrão de hulha, o que permitiu a produção em larga escala de tecidos coloridos a um custo mais baixo (HELLER, 2022).

Essa transição para os corantes sintéticos, segundo Araújo (2022), teve impactos negativos, principalmente relacionados à poluição ambiental, como a emissão de gases tóxicos durante a produção desses corantes e a contaminação da água por corantes contendo metais pesados e produtos químicos usados como auxiliares de tingimento. Quando os corantes sintéticos presentes nas águas residuais da fábrica são descartados na natureza sem tratamento adequado, eles podem se acumular nos ecossistemas aquáticos causando desequilíbrio dos biomas e conseqüentemente a contaminação e morte de organismos vivos.

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS) (2018), a indústria têxtil é responsável por cerca de 20% da poluição global da água devido a liberação de efluentes contendo corantes e químicos correlatos no meio ambiente. Diante disso, segundo o relatório *Forests for Fashion* (UNECE/FAO, 2019), a indústria têxtil e de confecções contribui atualmente com US\$ 2,4 trilhões para a manufatura global; emprega 75 milhões de pessoas em todo o mundo; é responsável por 8 a 10% das emissões globais de gases de efeito estufa; é responsável por cerca de 20% da poluição das águas residuais em todo o mundo e tem uma perda de US\$ 500 bilhões a cada ano devido à subutilização de roupas e à falta de reciclagem (OLIVEIRA, 2021).

A maioria dos corantes têxteis sintéticos, segundo Freitas (2017), são altamente solúveis em água e a biodegradação de suas moléculas no meio ambiente podem originar compostos tóxicos, como metais pesados e alguns compostos aromáticos, no meio ambiente durante sua produção, uso e descarte. Isso pode causar danos à saúde pública e ao meio ambiente. Além disso, a produção de corantes sintéticos gera poluição atmosférica devido a emissão de gases tóxicos. A fim de minimizar os impactos ambientais dos corantes na natureza, a necessidade de adoção de práticas mais sustentáveis em toda a cadeia produtiva têxtil é fundamental.

As águas residuais descarregadas do setor têxtil compreendem contaminantes nocivos, como corantes, metais pesados, NaOH, amido, ácido, etc. De acordo com (Kant,

2012) do Banco Mundial, as águas residuais geradas pelo setor de tingimento e acabamento representam cerca de 17% a 20% do total de efluentes industriais. Aproximadamente 300.000 toneladas de corantes sintéticos são descartadas anualmente em instalações de tratamento em todo o mundo (Saini, 2017). Além disso, a água poluída pode conter poluentes nocivos que impactam não apenas os fluidos limpos, mas o processo de fotossíntese em plantas aquáticas (Saravanan et al. 2021).

Segundo Geada et al. (2006), infelizmente, muitas indústrias têxteis ainda apresentam sistemas de tratamento de efluentes ineficazes. Isso ocorre porque muitas vezes esses sistemas são insuficientes para remover completamente os resíduos de corantes sintéticos e outros produtos químicos utilizados no processo produtivo. Portanto, pode acabar resultando em efluentes que ainda contêm altas concentrações de poluentes, que são descartados diretamente nos corpos d'água sem tratamento adequado.

Além disso, muitas vezes os sistemas de tratamento não são devidamente monitorados, o que pode resultar em uma piora na qualidade dos efluentes e, conseqüentemente, um maior impacto ambiental. De acordo com Oliveira (2023), de todas as águas residuárias geradas no planeta (domésticas e industriais), cerca de 63% são coletadas, 52% são tratadas e 48% são lançadas no meio ambiente sem qualquer tratamento.

Visando a superação das ineficiências dos processos, segundo Teran (2014), de tratamento existentes, muitas pesquisas foram realizadas e com isso muitas técnicas de tratamento alternativo ou complementar eficazes foram testadas e validadas. Dentre as técnicas mais utilizadas, destacam-se a adsorção, a eletrofloculação, e processos oxidativos avançados como, por exemplo, a fotocatalise. A fotocatalise tem se mostrado uma técnica promissora, uma vez que utiliza materiais semicondutores, denominados fotocatalisadores, para degradar compostos orgânicos poluentes presentes em sistemas aquosos.

A fotocatalise é um processo que envolve a geração de pares elétron-lacuna na superfície de um fotocatalisador, quando este é exposto à luz UV. O mecanismo mais clássico infere a geração de espécies reativas de oxigênio que são capazes de oxidar e degradar os compostos orgânicos presentes no meio, por exemplo, corantes, que perde a cor e são convertidos em moléculas simples e facilmente tratáveis de acordo com o estudo de GOMES et al. (2019).

A fotocatalise é um processo que utiliza materiais fotocatalisadores para acelerar as reações de degradação química quando expostos à luz. Na indústria têxtil, o emprego da fotocatalise para a remoção de corantes e poluentes orgânicos presentes em efluentes

líquidos tem sido crescente. Os fotocatalisadores mais citados na literatura e utilizados em pesquisas de remoção de cor estão os óxidos metálicos como, por exemplo, o dióxido de titânio (TiO_2).

2 OBJETIVOS

Objetivos geral

- Estudar a degradação fotocatalítica e fotolítica que corantes têxteis possuem quando TiO_2 é aplicado.

Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento de degradação de alguns corantes sintéticos por fotocátalise.
- Avaliar a eficiência de degradação de diferentes classes de corantes utilizando TiO_2 como fotocatalisador.
- Avaliar a eficiência da fotólise e da fotocátalise na degradação dos corantes.
- Compreender alguns fenômenos e mecanismos de degradação.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO TÊXTIL

O beneficiamento têxtil é uma etapa importante no processo de produção de tecidos e roupas. O principal objetivo do beneficiamento têxtil é de conferir ao tecido características como maior hidrofiliidade, cor, melhor toque, brilho, maciez, maior resistência a torção e encolhimento, entre outras. O surgimento do beneficiamento têxtil está diretamente relacionado ao desenvolvimento industrial. A partir da Revolução Industrial, no século XVIII, a produção de tecidos passou a ser realizada em larga escala, inicialmente com máquinas à vapor e atualmente com processos automatizados. Com isso, surgiram novas demandas de mercado e a necessidade de produzir tecidos com características específicas, que atendessem às diferentes necessidades dos consumidores (LIMA, 2019).

De acordo com Barros (2016), o beneficiamento têxtil era realizado por técnicas rudimentares que gastavam uma quantidade elevada de recursos para as empresas, além de ser altamente poluidora para o meio ambiente. A maioria dos processos antigos eram

feitos por mão de obra manual, como o tingimento e a estamparia. No entanto, com o desenvolvimento da indústria têxtil e a necessidade de maior produtividade e qualidade dos produtos, foram surgindo novas tecnologias e equipamentos que permitiram a automatização e a modernização dos processos.

A partir do século XX, a indústria têxtil passou a utilizar máquinas de tingimento em grande escala, que proporcionaram maior precisão e rapidez no processo de tingimento, um dos exemplos, eram as máquinas de estamparia rotativa que possibilitam até hoje a impressão em grandes escalas e com enorme rapidez de padrões e desenhos nos tecidos. Além disso, foram desenvolvidos equipamentos de acabamento que permitem dar características físico-químicas especiais aos tecidos, como as ramas têxteis que permitem que a superfície do tecido tenha as características desejadas pelo cliente. Atualmente, o beneficiamento têxtil é uma etapa fundamental da cadeia produtiva têxtil e envolve uma série de processos distintos, que podem ser classificados em três categorias principais: beneficiamento primário, beneficiamento secundário e beneficiamento terciário.

Segundo Santos et al. (2019), o beneficiamento primário é a etapa do processo de produção têxtil que engloba uma série de processos que visam preparar o tecido para receber os tratamentos posteriores. Essa etapa é crucial para garantir a qualidade final do produto têxtil, alguns dos processos que envolvem o beneficiamento primário, estão a lavagem, a chamuscagem e o alvejamento do tecido. A lavagem é responsável por remover as impurezas e resíduos presentes no tecido, preparando-o para processos seguintes de coloração, enquanto a desengomagem tem como objetivo retirar a goma que é aplicada aos fios de urdume durante a tecelagem plana e alvejamento é uma etapa importante para remover a pigmentação natural das fibras, clareando e removendo manchas do tecido.

O beneficiamento secundário é a etapa em que o tecido recebe coloração por meio de processos como tingimento, estamparia, entre outros. Segundo Barros (2021), o tingimento têxtil consiste na aplicação de corantes em produtos têxteis, a fim de conferir cor e tom. O processo de tingimento pode ser realizado de diversas formas, sendo as mais comuns o tingimento de tecidos contínuos, o tingimento em fio e o tingimento em fibra. Cada uma dessas técnicas apresenta particularidades que devem ser levadas em consideração na hora de escolher qual método será utilizado em cada tipo de produto têxtil.

Segundo Roy (2018), nas últimas décadas, a indústria têxtil tem enfrentado pressões para aumentar a sua preocupação ambiental e se tornar mais sustentável, especialmente em relação ao uso de água, energia e produtos químicos. Como resposta a essas pressões, muitas empresas vêm com o passar dos anos adaptando-se, trazendo tecnologias mais eficientes e sustentáveis de tingimento, como processos que permitem a reutilização de

água e a redução de resíduos tóxicos ou até mesmo a utilização de corantes naturais. Tornando-se possível graças a esforços na área de pesquisa para criação de práticas verdes, para garantir que a gestão ambiental continue crescendo, é fundamental que os consumidores exijam produtos têxteis com menor impacto ambiental, incentivando a adoção de processos mais sustentáveis pelas empresas.

A estamparia é uma técnica de tingimento localizado, que segundo Laschuk (2017), geralmente é realizada por meio da impressão de padrões artísticos em tecido. Essa técnica pode ser realizada por diversos processos, como a serigrafia que utiliza quadros planos, a impressão digital (direta e indireta), estamparia rotativa que utiliza quadros cilíndricos e as técnicas de estamparia por transferência, por exemplo, por sublimação. A estamparia é um processo importante na indústria têxtil, pois permite a criação de uma grande variedade de padrões e estilos de estampa, possibilitando que as peças de vestuário tenham um design exclusivo e diferenciado. A escolha do processo de estamparia adequado depende do tipo de tecido utilizado, do padrão a ser reproduzido e do volume de produção desejado.

O beneficiamento terciário é a etapa final do processo de beneficiamento têxtil, onde o produto recebe os acabamentos e tratamentos necessários para garantir sua qualidade e funcionalidade. Essa etapa inclui processos como simples amaciamento até acabamentos especiais como impermeabilização, repelência à água, antimicrobiano, proteção UV, resistência a manchas, retardância a chamas, entre outros. Esses acabamentos podem ser químicos, como os citados anteriormente, podem ser físicos ou combinados. Os acabamentos agregam valor ao produto, aumentam sua durabilidade e garantem a funcionalidade do produto (MUNHOZ, 2015).

3.1.1 Beneficiamento secundário

Segundo Vidal Salem (2010), o tingimento pode ser entendido como uma modificação físico-química do substrato que promove uma percepção de cor causado pela reflexão da luz. O produto que causa tal percepção de cor é chamado de corante.

Os processos de tingimento têxtil podem ser de dois tipos, isto é, processos contínuos e descontínuos. Nos processos contínuos ocorre a transferência do corante do banho para a fibra por impregnação. Nesse caso, o banho permanece estático e por ele o tecido é passado algumas vezes, seguido de espremedura mecânica usando um par de cilindros (*pad-foulard*) que fazem a hidroextração do excesso de banho e promovem uniformização da aplicação. Posteriormente o substrato é secado com calor seco ou vaporizado para que ocorra a fixação do corante na fibra. O processo por esgotamento

consiste em uma agitação prolongada em que durante todo o processo o tecido fica no banho de tingimento em contato com o banho de corante. Nesse caso, o deslocamento do corante para a fibra ocorre por esgotamento. Vale ressaltar que os parâmetros para um bom funcionamento do corante, envolve principalmente tempo, temperatura, presença de químicos auxiliares e agitação adequada para cada tipo de fibra e de corante.

3.1.2 Estamparia têxtil

Os processos tradicionais de estamparia utilizam enormes cargas de corantes têxteis (os mesmos usados no tingimento) e pigmentos. Muitos dos efeitos obtidos da estamparia rotativa e os produtos da estamparia digital precisam de uma etapa de lavagem dos tecidos estampados, para que ocorra a remoção dos corantes não fixados. Esses processos de lavagem contribuem para a geração de efluentes advindos do beneficiamento, e consequentemente podem gerar elevado impacto ambiental.

Dentre as técnicas mais comuns de estamparia estão as técnicas de serigrafia e estamparia rotativa. A serigrafia utiliza quadros (matrizes) contendo uma tela de tecido sintético que passou por um processo anterior de gravação. A gravação, nesse caso, é um desenho que será impresso no tecido por meio da aplicação de uma pasta colorida que é forçada a atravessar a tela nos locais de gravação. Na estamparia rotativa ocorre um processo semelhante a serigrafia, com a diferença que o quadro em que o desenho é gravado não é plano, mas cilíndrico. A técnica rotativa utiliza cilindros feitos de metais inoxidáveis como inox ou níquel. Uma das grandes vantagens da estamparia rotativa é a sua alta velocidade de produção.

A estamparia digital surgiu como uma das técnicas mais promissoras no que diz respeito a facilidade de processo, economia de químicos e recursos hídricos, além do menor consumo de energia e elevada qualidade de desenho e cores. Essa técnica utiliza grandes impressoras digitais que imprimem a arte desejada diretamente no tecido usando a tecnologia jato de tinta. A imagem desejada é antes criada em um *software* de *design* gráfico que depois envia os dados para a impressora e, em seguida, imprime um tecido previamente tratado. Esse processo é rápido, preciso e garante um *design* de impressão em alta qualidade e velocidade (DO CARMO, 2015).

3.2 CORANTES TÊXTEIS

Os corantes têxteis desempenham um papel importante na indústria de tecidos e vestuário. São compostos químicos capazes de se fixar às fibras do tecido por meio de ligações químicas e conferir-lhes a cor desejada. Compreender a categorização dos corantes têxteis e suas propriedades é essencial para o bom desempenho dos processos de beneficiamento e qualidade têxtil.

Os corantes podem ser classificados de acordo com duas abordagens distintas, conforme descrito por Clark (2010), essas classificações são baseadas na estrutura química dos corantes e no método de aplicação utilizado. Uma referência essencial para a compreensão de um determinado corante é o "*Color Index*", no qual é um código de cinco números que ajuda os coloristas a identificarem cada cor de forma universal. Os códigos de *color index* compõem um extenso banco de dados que lista corantes quimicamente identificados, cuja cor e classe são universalmente reconhecidos.

As moléculas corantes, de acordo com Rizzo (2014), são estruturadas de forma específica para garantir que possuam as propriedades adequadas às suas aplicações. Um requisito fundamental é que os corantes apresentem a coloração desejada em termos de matiz e brilho. Além disso, é importante considerar que os corantes são, em sua maioria, aplicados por meio de soluções aquosas. Embora existam algumas exceções, como os corantes dispersos usados para o poliéster, que possuem uma moderada solubilidade em água, mas suficiente para sua aplicação sob altas temperaturas de processo.

Outro aspecto crucial, segundo Alcântara (1996), é a necessidade de que os corantes estejam fortemente ligados às fibras têxteis às quais são aplicados, a fim de resistir bem às ações externas de remoção que estes sofrem durante os processos de lavagem e outros desgastes do uso.

3.3.1 Corantes reativos

Conforme discutido por Peixoto (2013), os primeiros estudos sobre corantes reativos foram concentrados principalmente no tingimento de fibras celulósicas, como o algodão e a viscose. Atualmente é sabido que essa classe de corantes também é adequada para o tingimento de fibras proteicas e poliamida.

A reação dos corantes reativos, segundo Matos (2013) com a celulose das fibras ocorria por ligações covalentes entre corante e fibra. Como as ligações covalentes são as ligações de maior energia e, portanto, as mais resistentes a quebra, o resultado desses tingimentos era um produto com alto rendimento e intensidade de cor, elevada solidez a luz, lavagem e abrasão, e que podiam ser aplicados em condições similares às dos corantes

diretos preexistentes. Até então, os corantes diretos eram a classe de corantes dominante para o tingimento de fibras celulósicas na época, no entanto, esses corantes não forneciam rendimento e solidez de cor satisfatórios.

O desenvolvimento dos corantes reativos, segundo Catanho (2006), permitiu superar as limitações dos corantes diretos, pois proporcionam uma maior durabilidade e resistência das cores à lavagem. A ligação covalente formada entre corantes reativos e fibras celulósicas/proteicas é estabelecida entre um átomo de carbono da molécula do corante e um átomo de oxigênio, nitrogênio ou enxofre, respectivamente de um grupo hidroxila, amino ou tiol presente na estrutura química da fibra.

3.3.2 Corantes ácidos

Os corantes ácidos, segundo Guaratini (2000), refere-se a um amplo grupo de corantes aniônicos que possuem um a três grupos sulfônicos em sua estrutura. Esses grupos sulfônicos são responsáveis por conferir solubilidade em água aos corantes e desempenham um papel crucial no método de aplicação desses corantes em fibras protéicas, como lã e seda, bem como em fibras de poliamida sintética. Durante o processo de tingimento, os corantes ácidos, previamente neutralizados em uma solução contendo cloreto, acetato, hidrogenossulfato, entre outros compostos, interagem com as fibras através de uma troca iônica. Essa interação envolve os grupos amino e carboxilato presentes nas fibras proteicas, na forma não-protonada, e os grupos sulfônicos do corante. Os corantes ácidos são caracterizados por sua ampla variedade de estruturas químicas, que incluem compostos como azo, antraquinona, triarilmetano, azina, xanteno, ketonimina, nitro e nitroso. Essas estruturas proporcionam uma ampla gama de cores e níveis de fixação, permitindo obter resultados diversos no tingimento.

3.3.3 Corantes catiônicos

De acordo com Guaratini (2000), os corantes catiônicos caracterizam-se por ser composto por substâncias solúveis em água, que possuem a capacidade de tingir fibras de celulose, como algodão e viscose. Esses corantes interagem com as fibras de celulose através de interações de Van der Waals. Para aumentar a afinidade do corante com as fibras, são utilizados eletrólitos, a configuração planar da molécula do corante ou a presença de duplas-ligações conjugadas, que favorecem a adsorção do corante sobre a fibra. Essa classe de corantes é principalmente composta por corantes que possuem mais de um grupo azo (como, diazo e triazo) ou corantes que foram pré-transformados em

complexos metálicos. Essas características estruturais conferem aos corantes uma maior capacidade de interação com as fibras de celulose, resultando em uma boa fixação do corante durante o processo de tingimento.

3.4 IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELOS CORANTES TÊXTEIS

De acordo com Wang et al. (2022), pesquisas revelam que aproximadamente 2.000 tipos diferentes de produtos químicos (corantes e produtos auxiliares.) encontram aplicação na indústria têxtil (Khan & Malik 2014), sendo os corantes um dos principais contaminantes presentes em águas residuais geradas pela indústria têxtil (Nor et al. 2021). A porcentagem de corantes reconhecidamente tóxicos e perigosos presentes no sistema de águas residuais varia de 5% a 10% do total de corantes usados (Prasad e Aikat 2014).

Estima-se que 280.000 toneladas de corantes têxteis são descartadas (anualmente) em todo o mundo através de águas residuais industriais (Zainith et al. 2016). Estima-se que aproximadamente 10%-15% dos corantes usados nos tingimentos são perdidos em águas de rejeito. Parte dos danos causados ao meio ambiente ocorre pela absorção da luz solar pelas moléculas corantes presentes em corpos d'água, como rios, lagos e lagoas, o que prejudica a passagem da luz através da água até as plantas aquáticas e algas, que precisam do acesso a luz para realizarem a fotossíntese e assim liberar oxigênio dissolvido que é essencial para a respiração de animais aquáticos, como peixes e outros (Mani et al. 2019). A descarga dessas substâncias no solo e em ecossistemas aquáticos resulta em baixa transmissão de luz e baixa disponibilidade de oxigênio. Tais condições podem gerar alterações de biomas, mortes de animais e contaminação humana por meio da cadeia alimentar (Holkar et al. 2016).

Os corantes têxteis podem prejudicar organismos vivos, pois exercem efeitos cancerígenos e mutagênicos em animais silvestres e seres humanos (Das & Mishra 2017). O contato com corantes azóicos pode resultar em problemas de pele, pulmões e danos gastrointestinais (Islam et al. 2019). Resultados de estudos experimentais conduzidos em animais por Raj et al. (2012), indicam que os corantes azo (principal categoria de uso industrial), está diretamente associada ao câncer de bexiga, sarcomas esplênicos e hepatocarcinoma (a principal causa de aberração cromossômica em células de mamíferos).

3.5 PROCESSOS TRADICIONAIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Segundo Nemerow et al. (2015), o tratamento de efluentes é considerado um processo relativamente novo na história da humanidade, sendo a mais provável causa pelo descarte inadequado e pelo aumento constante de indústrias no período industrializado. Os primeiros tratamentos de água datam do império Romano, que usavam sistemas de drenagem para enchentes. A sofisticação desse processo só se deu a partir do século XIX, com a revolução industrial devido ao considerável aumento de efluentes gerados pelas indústrias.

Com o tempo, novas tecnologias para tratamento de água foram surgindo, como os sistemas de tratamento físico-químico e a utilização de membranas filtrantes, permitindo tratamentos mais efetivos dos efluentes. Hoje em dia existem diversas tecnologias de tratamento de efluentes, a escolha da melhor varia de acordo com os efluentes gerados e dos objetivos do tratamento.

De acordo com a ANA (Agência Nacional de Águas), o tratamento clássico de efluentes pode ser dividido em três principais categorias, entre elas estão os processos físicos, que envolvem, o gradeamento, peneiramento, flotação, decantação, filtração e membranas. Os processos químicos incluem os sistemas de coagulação e flotação, precipitação química, oxidação química, redução química, adsorção e troca iônica. Além desses, existem os processos biológicos, que utilizam lodos ativados, lagoas aeradas, sistemas microbiológicos em reatores anaeróbios.

O processo de lodos ativados, de acordo com Tassi (2022), é uma tecnologia amplamente utilizada no tratamento de efluentes têxteis, que são caracterizados pela presença de corantes, produtos químicos, óleos e materiais orgânicos. Esse sistema consiste em microrganismos aeróbicos suspensos no efluente, os quais consomem a matéria orgânica por meio de uma etapa aeróbia que reduz a carga poluente. A aeração promove a degradação e metabolização dos poluentes, enquanto a etapa de sedimentação permite a separação do lodo ativado e dos poluentes remanescentes. O lodo acumulado pode ser recirculado ou submetido a processos complementares. O tratamento de efluentes têxteis com lodos ativados oferece vantagens na remoção eficiente dos poluentes, embora considere-se a necessidade de pré-tratamento para corantes e produtos químicos específicos.

3.5.1 Degradação de poluentes via processos oxidativos avançados (POA)

No estudo de Andreozzi et al. (2007), é apresentada uma visão abrangente dos processos oxidativos avançados (POAs) para purificação e recuperação de água. O estudo

destaca a alta reatividade dos radicais hidroxila e sua capacidade em conduzir processos de oxidação para alcançar a completa redução e mineralização de poluentes presentes no meio. Os diferentes processos de oxidação são abordados de forma crítica, com ênfase em suas aplicações reais na redução da poluição das águas. A remoção de poluentes tóxicos, bem como de compostos biologicamente resistentes, requer o uso de tecnologias não biológicas.

Essas tecnologias consistem, segundo Fioreze (2014), principalmente em técnicas convencionais de separação de fases, como processos de adsorção e técnicas de separação, e métodos que visam a destruição dos contaminantes por meio de oxidação química ou redução. A oxidação química tem como objetivo a mineralização dos contaminantes, convertendo-os em dióxido de carbono, água e produtos inorgânicos, ou, no mínimo, transformando-os em substâncias mais simples e/ou não tóxicas.

Segundo Araújo et al. (2016), os processos oxidativos avançados (POAs) possuem uma característica única e vantajosa no tratamento de águas residuais e na resolução de problemas de poluição: eles não são seletivos em relação aos poluentes que oxidam. Isso significa que os POAs têm a capacidade de atacar uma ampla variedade de contaminantes, independentemente de sua estrutura química.

Diferentemente de outros métodos de oxidação que são específicos para certos compostos, os POAs podem lidar com poluentes orgânicos persistentes, compostos tóxicos, corantes e muitos outros contaminantes presentes em águas residuais. Essa ampla gama de ação torna os POAs altamente eficazes na degradação de diversos tipos de poluentes, o que é uma grande vantagem no tratamento de águas residuais industriais complexas.

Os mecanismos de reação observados nos POAs, segundo Amorim (2009), conferem grande eficácia no combate a uma ampla gama de poluentes, tornando-os uma opção viável e flexível para a remoção de substâncias indesejadas, especialmente em meio aquoso. A capacidade de gerar radicais HO•, de forma seletiva e controlada confere aos POAs um potencial significativo na degradação de compostos orgânicos e inorgânicos presentes em águas residuais.

Na prática é possível explorar as potencialidades dos POAs, segundo Almeida (2004), integrando-os aos processos de tratamento biológico, em substituição dos tratamentos físico-químicos existentes que utilizam sais metálicos para realizar os processos de floculação. Esse sistema permite a degradação oxidativa de substâncias tóxicas ou refratárias que saem da fase biológica.

Ao combinar a capacidade de degradação dos POAs, de acordo com Souza (2019), com os processos biológicos, é possível obter resultados sinérgicos que aumentam a eficiência global do tratamento, dessa forma, as substâncias indesejadas que não são facilmente degradadas pelos microorganismos podem ser eficientemente removidas por meio da ação das espécies químicas radicalares geradas nos processos oxidativos.

Essa integração estratégica entre processos oxidativos avançados e tratamentos biológicos, segundo Antônio (2011), representa uma abordagem promissora para a melhoria da qualidade das águas residuais. Ao aproveitar as vantagens de ambos os métodos, é possível alcançar níveis mais elevados de remoção de poluentes e garantir a segurança e a sustentabilidade do tratamento de águas residuais.

Os POAs são reconhecidamente uma abordagem promissora para o tratamento de águas contaminadas, devido à sua capacidade de oferecer soluções adaptáveis e eficientes, para a degradação acelerada de poluentes.

3.5.2 Processo de degradação fotocatalítica

A degradação fotocatalítica, segundo Brito (2012), é um processo oxidativo avançado de tratamento de águas residuais e remediação ambiental que utiliza a ação de catalisadores fotocatalíticos e luz UV para degradar compostos orgânicos presentes em meio aquoso.

O princípio fundamental da degradação fotocatalítica, segundo Oliveira (2023), baseia-se no uso de luz rica em radiação ultravioleta (UV) para a degradação acelerada de poluentes presentes em um meio fluídico. O sistema mais tradicional é baseado no uso de certos materiais, por exemplo, o dióxido de titânio (TiO_2), que possuem a capacidade de atuarem como catalisadores de reação quando são expostos à luz UV. Em meio aquoso ou presença de umidade, as partículas de TiO_2 absorvem a energia luminosa, gerando a partir das moléculas de água mais próximas a sua superfície, espécies radicalares de oxigênio de alta reatividade, tais como radicais hidroxila ($\text{HO}\cdot$), hidroperoxil ($\text{HOO}\cdot$) e superóxido ($\text{OO}\cdot$). As reações de fotocatalise, nesse caso, também podem gerar espécies reativas de oxigênio não radicalares, como oxigênio gasoso O_2 e peróxido de hidrogênio H_2O_2 . A partir da degradação dos poluentes orgânicos, outras espécies radicais podem ser formadas com o passar do tempo de reação, tais como radicais peroxila ($\text{ROO}\cdot$) e alcoxila ($\text{RO}\cdot$), que podem contribuir com o avanço da reação de degradação ou dificultá-la.

Para realizar um processo de degradação por fotocatalise heterogênea, segundo Buth (2009), é necessário um sistema composto por três elementos principais: a fonte de

luz UV, um catalisador fotocatalítico (sólido) e a solução contendo os compostos a serem degradados. A fonte de luz pode ser a luz solar natural ou lâmpadas UV artificiais (mais potentes), dependendo da disponibilidade e das condições de operação.

O catalisador fotocatalítico, como o TiO_2 , é geralmente aplicado como um revestimento nas superfícies de reatores ou de suportes, de acordo com Colpani (2017), o que maximiza a área de contato entre o catalisador e a solução e facilita a recuperação do catalisador. No método clássico o catalisador (imobilizado ou não) é inserido em uma solução contendo os compostos a serem degradados, e então o sistema é exposto à luz UV adequada, o que possibilita a ativação do processo de degradação.

A importância da degradação fotocatalítica reside na sua capacidade de remover compostos orgânicos persistentes e tóxicos presentes em águas residuais, segundo Rodrigues (2016), como os corantes têxteis, pesticidas, produtos farmacêuticos e outros poluentes. Esses compostos muitas vezes apresentam baixa biodegradabilidade e são resistentes aos métodos convencionais de tratamento de água. A degradação fotocatalítica oferece uma alternativa promissora, sendo capaz de degradar completamente esses compostos dependendo de sua natureza química, reduzindo-os muitas vezes a substâncias inofensivas, como açúcares, sais, álcool, dióxido de carbono e água.

Além disso, a técnica de degradação fotocatalítica heterogênea, de acordo com Cheguezac (2018), apresenta vantagens adicionais, como a possibilidade de operação em temperatura ambiente, pressão atmosférica, ausência de adição de produtos químicos externos e a capacidade de tratar grandes volumes de água de forma contínua. Isso a torna uma opção atrativa para o tratamento de águas residuais industriais, onde a presença de compostos tóxicos e persistentes é bastante comum hoje em dia.

Os corantes têxteis, em particular, de acordo com Bonancéa (2010), representam um desafio significativo devido à sua alta estabilidade química e resistência à degradação. No entanto, pesquisas mostram que a técnica de fotodegradação de corantes pode ser altamente eficiente, e produzir resultados de descoloração e degradação completa desses compostos.

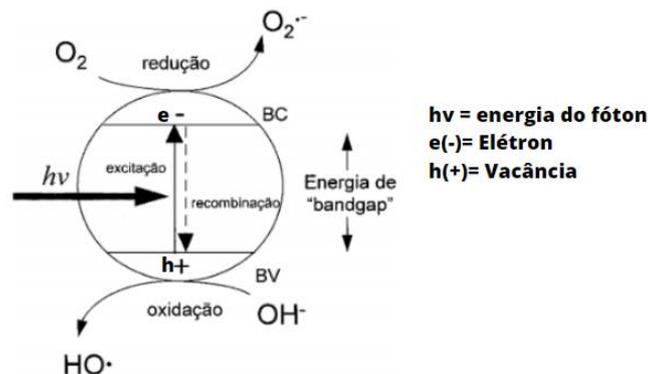
Diversos estudos têm sido realizados para otimizar as condições de degradação fotocatalítica de corantes, como a concentração de catalisador, pH do meio, intensidade de luz e tempo de exposição. Além disso, a combinação da degradação fotocatalítica com outras técnicas, como adsorção e processos de separação, tem sido amplamente explorada para melhorar a eficiência global do tratamento.

3.5.2.1 Mecanismos de fotodegradação heterogênea

O processo de fotodegradação ocorre por meio de um sistema de fotocatalise heterogênea, em que um catalisador em estado sólido é empregado. Apesar dos mecanismos envolvidos nas reações de fotocatalise heterogênea ainda não estarem completamente elucidados, tradicionalmente, alguns materiais semicondutores inorgânicos são os catalisadores preferidos nessas reações, em razão de suas características eletrônicas e energia de *bandgap* é a distância entre a camada de valência e a camada de condução do átomo. Além disso, esses materiais geralmente possuem elevada estabilidade térmica, química e físico-química.

Durante a reação, o princípio de ativação do material catalisador consiste na irradiação (energia do fóton) de sua superfície com energia igual ou superior ao valor de sua energia de *bandgap* (energia de deslocamento do elétron no átomo entre as bandas de condução e valência). Um dos mecanismos mais aceitos explica que a energia incidida na superfície do catalisador é absorvida, essa energia excita os elétrons nos átomos, que saltam da banda de valência (BV) para a banda de condução (BC). Conforme figura 1, apresentada a seguir, essa transição eletrônica gera o par “elétron (e^-) / buraco (h^+)”. Esse fenômeno leva a formação de sítios oxidantes e redutores na superfície do material catalisador.

Figura 1: Esquema do processo fotocatalítico sobre a superfície do TiO_2



Fonte: Adaptado de Germiniano (2017)

3.5.2.2 Fotodegradação de corantes têxteis

A fotodegradação de corantes têxteis é um processo de decomposição que ocorre quando os corantes são expostos à luz, especialmente à radiação ultravioleta (UV), que segundo Silva et al. (2017), é um fenômeno que envolve a absorção de fótons pelos

corantes, resultando em alterações nas ligações químicas e na quebra das estruturas cromóforas responsáveis pela cor.

No contexto têxtil, segundo Alves et al. (2010), a fotodegradação pode ocorrer tanto em soluções aquosas contendo corantes quanto nas próprias fibras têxteis quando expostas à luz. Isso pode resultar na perda de intensidade de cor, alterações na tonalidade e, em alguns casos, até mesmo na remoção completa do corante. A fotodegradação de corantes têxteis apenas com luz UV (fotólise) envolve diversos mecanismos, como a formação de radicais livres, reações de oxidação e quebra de ligações químicas, porém, dependendo da estabilidade química do corante a fotólise pode não ser suficiente para causar uma degradação expressiva, ou mesmo ineficiente. No entanto, a presença de catalisadores fotoativos como, por exemplo, alguns óxidos metálicos, pode aumentar significativamente a eficiência dos processos de fotodegradação.

3.6 MATERIAIS COM PROPRIEDADES FOTOCATALÍTICAS

3.6.1 Dióxido de titânio

Segundo Fernandes (2022), o dióxido de titânio (TiO_2) tem sido objeto de extenso estudo pela comunidade científica ao longo das últimas décadas, devido às suas propriedades fotoativas, grande versatilidade, e facilidade de uso como catalisador. O TiO_2 despertou interesse devido sua capacidade de reutilização, operação em uma ampla faixa de pH, ser atóxico, quimicamente estável, biocompatível, amplamente disponível, e de baixo custo.

O TiO_2 tem demonstrado uma notável capacidade de degradação para uma ampla variedade de contaminantes, o que o torna um fotocatalisador muito eficiente. As formas cristalinas mais comuns do dióxido de titânio apresentam três polimorfos principais: anatase, rutilo e broquita. Estes polimorfos diferem em sua estrutura cristalina e propriedades fotocatalíticas. A anatase é conhecida por sua alta atividade fotocatalítica, especialmente na presença de luz UV. Analiticamente, o TiO_2 P25 é formado por 80% anatase, o que o torna um catalisador cujas partículas possuem baixa granulometria e elevada área superficial ($\sim 50 \text{ m}^2/\text{g}$), sendo considerado umas das melhores formas microestrutural para uso em fotocatalise devido sua alta fotoatividade (NOGUEIRA, 1998).

O rutilo, segundo Boano (2020), também exhibe atividade fotocatalítica, embora seja geralmente menos ativo do que a anatase. A broquita, por sua vez, é menos usada como fotocatalisador, mas também pode exibir propriedades fotocatalíticas. A ampla gama de

aplicações do TiO_2 como fotocatalisador tem despertado interesse em várias áreas, como tratamento de águas residuais, purificação do ar, produção de energia verde, remediação de solos contaminados e até mesmo aplicações biomédicas.

No tratamento de águas residuais, o TiO_2 tem sido amplamente utilizado para degradar eficientemente contaminantes orgânicos, como compostos orgânicos persistentes, corantes e produtos farmacêuticos. Além disso, o dióxido de titânio tem sido explorado para a produção de energia sustentável, como células solares de TiO_2 sensibilizadas por corante (DSSCs), que são dispositivos fotovoltaicos eficientes e de baixo custo. No contexto biomédico, o dióxido de titânio também tem sido investigado para aplicações como revestimentos antibacterianos, terapia fotodinâmica de células cancerígenas e purificação de água em áreas de recursos limitados. Na indústria têxtil pode ser utilizado no efeito bactericida e proteção UV.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

No presente trabalho, foram utilizados os corantes: ácido Teconyl red F-2B e reativo Tecofix Brill rot VS-3B 140%, obtidos da empresa Color Química, e o corante catiônico azul de metileno. Cada um dos corantes possui um *color index* (CI) e uma estrutura molecular diferentes que foram disponibilizadas de acordo com o fornecedor de cada um destes corantes. O Quadro 1 mostra o CI de cada um desses corantes e as respectivas fórmulas moleculares.

Quadro 1: Color index e a estrutura atômica linear de cada um dos corantes

Corante/ (CI)	Estrutura atômica linear	Nome comercial
Ácido / Red 249	$\text{C}_{29}\text{H}_{20}\text{ClN}_3\text{Na}_2\text{O}_{10}\text{S}_3$	Teconyl red F-2B
Catiônico / Azul de metileno	$\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$	Azul de metileno
Reativo / Red 239	$\text{C}_{31}\text{H}_{19}\text{ClN}_7\text{Na}_5\text{O}_{19}\text{S}_6$	Tecofix Brill-Rot VS-3B 140%

Obs.: Corantes fornecidos por empresa Color Química

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de informações dos fornecedores

O fotocatalisador utilizado foi o AEROXIDE® TiO_2 P25 (ultrapuro) adquirido da empresa Evonik. Para a preparação das soluções corantes utilizou-se água destilada. Para

a condução do trabalho alguns materiais auxiliares foram necessários, como béqueres de 50 mL e 100 mL, pisete com água destilada, vidros relógio para pesagem de sólidos, balões volumétricos de 1 L e 25 mL, pipeta graduada de 10 ml, proveta de 50 mL, pêra de sucção, agitadores magnéticos, cubetas de vidro para leitura de espectroscopia UV-vis e papel alumínio.

Para a realização dos experimentos de degradação, foi construída uma câmara fotocatalítica, utilizando uma caixa de MDF tratada com verniz e revestida internamente com papel alumínio para aumentar a reflexão da luz no interior da câmara. No topo interno da caixa uma lâmpada de radiação UV-C (220-290 nm) de alta intensidade, fluorescente 26 x 436 mm (Osram Puritec HNS G13; P = 15 W; $\lambda = 254$ nm; $\phi = 7800$ cd) foi instalada juntamente com um reator 1x15 W bivolt. A figura 2 demonstra o processo de produção da câmara fotocatalítica realizada pelo autor.

Figura 2: Processo de montagem da câmara de fotocatalise.

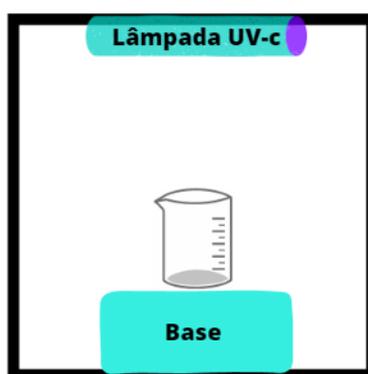


Legenda: (a) Aplicação do verniz; (b) Instalação da lâmpada; (c) Caixa semiacabada com a lâmpada acesa para testar a instalação; (d) Interior da caixa acabada sem a tampa.

Conectado à lâmpada um fio contendo interruptor meio cordão e uma tomada na extremidade, foi passado de dentro para fora da caixa, permitindo a ativação manual da lâmpada. A tampa da caixa também foi envernizada e revestida internamente com papel alumínio. Dois conjuntos de ímãs foram colocados colados nas laterais da caixa e tampa da caixa para que a tampa permaneça fechada por indução magnética e não caia durante a reação. Além disso, foram colocados 4 suportes nas quinas inferiores da caixa como se fossem pés, dessa forma é possível preservar a câmara do contato direto com a bancada.

A figura 3 a seguir demonstra um esquema de como foram realizados os experimentos. A distância entre a solução e a lâmpada foi de 15 cm.

Figura 3: Esquema de realização dos experimentos



Fonte: Autor 2023

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Determinação dos picos de absorção dos corantes

Para a determinação do comprimento de onda dos picos de absorção de cada um dos corantes estudados, foram preparadas soluções com concentrações não conhecidas, apenas com o propósito de determinar o pico de absorção da cor. Para essa análise, utilizou-se um espectrofotômetro de UV-Vis (BEL PHOTONICS, modelo UV M-51). A análise foi conduzida com um passo de 1 nm, no intervalo de 350-750 nm. Para calibrar (zerar) o equipamento, utilizou-se água destilada pura (mesmo solvente usado para fazer as soluções corantes).

4.2.2 Determinação das curvas de calibração dos corantes

Para que seja possível o cálculo da concentração final após cada ponto da cinética, é preciso antes determinar a equação linear que modela a concentração do corante a partir de dados de concentração conhecida e valor de absorção lida. Para isso, preparou-se 1 L de solução estoque de 100 mg/L de cada um dos corantes, e posteriormente ser realizada uma diluição dessas soluções em balões de 50 mL, nas concentrações de 10 ppm, 8 ppm, 6 ppm, 4 ppm e 2 ppm. Após o preparo das soluções diluídas, fez-se a leitura de absorção para cada concentração. A concentração de 0 ppm foi dada pela água destilada pura (isenta de corante), também usada como branco para zerar o equipamento e indicar a ausência completa de cor durante as leituras. Por fim, os valores pontuais de absorção nos picos de cada corante foram anotados para assim serem plotados utilizando o programa Microsoft Excel. A correlação de cada valor de absorção observado para cada uma das concentrações originou uma reta definida por uma função matemática, que nada mais é que o modelo matemático que permite determinar a concentração desconhecida daquela solução de corante a partir da leitura de absorção de uma amostra.

As diluições foram preparadas utilizando a equação geral de diluição, que é uma relação matemática usada para determinar a concentração resultante de uma solução após ser diluída com um solvente. A equação é baseada no princípio de que a quantidade total de soluto (substância dissolvida) permanece constante antes e depois da diluição. As diluições foram feitas em 50 mL máximo de solução. A equação 1 apresenta a equação geral de diluição dos líquidos.

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad \text{Equação 1}$$

onde:

C_1 é a concentração inicial da solução (antes da diluição); mg/L

V_1 é o volume inicial da solução (antes da diluição); mL

C_2 é a concentração final da solução (após a diluição); mg/L

V_2 é o volume final da solução (após a diluição); mL

4.2.3 Ensaios de degradação fotocatalítica dos corantes

Após realizada a obtenção das curvas de calibração de cada corante, foram iniciados os ensaios de fotodegradação na câmara de fotocatalise.

No presente trabalho, foram realizados experimentos para avaliar a eficiência de remoção de cada corante, por meio de diferentes processos, denominados aqui como processos A; B e C. A seguir são descritos cada processo e corante em estudo. Os ensaios foram conduzidos em duplicata, a fim de observar se havia reprodutibilidade.

- **Processo A (fotocatálise):** Avaliação do comportamento de degradação do corante em solução contendo TiO_2 e na presença de luz UV;
- **Processo B (fotólise):** Avaliação do comportamento de degradação do corante em solução exposto à luz UV; e
- **Processo C (adsorção):** Avaliação do comportamento de remoção do corante em solução contendo TiO_2 sem a presença de luz UV (no escuro).

Cada um dos processos teve duração de 120 min, que foi testado previamente, com amostra acerca do tempo ideal de processo, sendo o intervalo entre a retirada dos pontos de 15 min para a obtenção da curva cinética. Os processos A, B e C foram determinados com a finalidade de comparar a influência de cada parâmetro (presença/ausência de luz, presença/ausência de TiO_2) e suas interações.

Para cada processo foi empregada uma solução corante com concentração de 10 ppm, retirada das soluções-estoque preparadas anteriormente. De acordo com a equação geral de diluição, apresentada na equação (1), essa concentração resultou em um volume de 10 mg/L de corante, para uma solução teste total de 100 mL.

Para os testes que envolveram a presença do catalisador, foi adicionado 1 mg de TiO_2 , previamente pesado em vidro relógio. Para cada intervalo de 15 min, a lâmpada da câmara foi desligada e o processo interrompido. Na sequência, uma alíquota foi retirada em quantidade suficiente para preencher a cubeta de análise. Cada alíquota coletada era centrifugada a 2000 rpm, durante 5 min, para sedimentar as partículas de catalisador suspensas na amostra. Para a leitura no espectrofotômetro, coletou-se o sobrenadante da centrifugação com o auxílio de uma seringa. Um microfiltro de seringa (marca Filtrilo) foi utilizado para garantir que nenhuma partícula eventualmente fosse transferida para a cubeta de leitura da absorção. Após cada leitura, toda a alíquota centrifugada era agitada para misturar novamente as particular de catalisador sedimentado e então era devolvida para a solução inicial e reiniciada a reação de degradação.

Para realizar a análise, foi utilizado o *software* Excel para plotar os gráficos de dispersão dos pontos de cinética, a fim de melhor visualizar as relações entre as variáveis estudadas. Os resultados da curva cinética de cada corante foram combinados em um único gráfico feito a partir da média dos valores de concentração e inserido uma barra de erro (desvio padrão) ponto a ponto. O desvio padrão foi calculado para avaliar a dispersão

dos dados em torno da média. Essas medidas estatísticas são importantes para compreender a consistência e a variabilidade dos resultados experimentais.

Todos os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Beneficiamento (LABENE) do curso de Engenharia Têxtil, da Universidade Federal de Santa Catarina, campus de Blumenau. Todos os experimentos foram realizados com a luz do laboratório apagada. Os testes de degradação foram conduzidos em uma ordem específica, começando com o corante ácido, seguido pelo corante reativo e por fim, o corante catiônico. Essa sequência foi adotada para garantir uma abordagem sistemática e comparativa na análise dos resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos experimentos realizados, os resultados obtidos apresentaram informações interessantes sobre os processos de degradação dos corantes estudados. Nesta seção, serão apresentados e discutidos os principais resultados, incluindo as variações na absorvância, os tempos de degradação e as eficiências dos processos de fotocatalise. A análise dos resultados proporcionou uma compreensão mais aprofundada sobre a influência do catalisador, da luz e da interação entre eles no contexto da degradação dos corantes selecionados.

5.1 PICOS DE ABSORÇÃO DOS CORANTES

O espectro de absorção obtido para cada um dos corantes é apresentado no Quadro 1, onde é possível observar o pico de absorvância.

Quadro 2: Comprimento de onda máximo de absorção

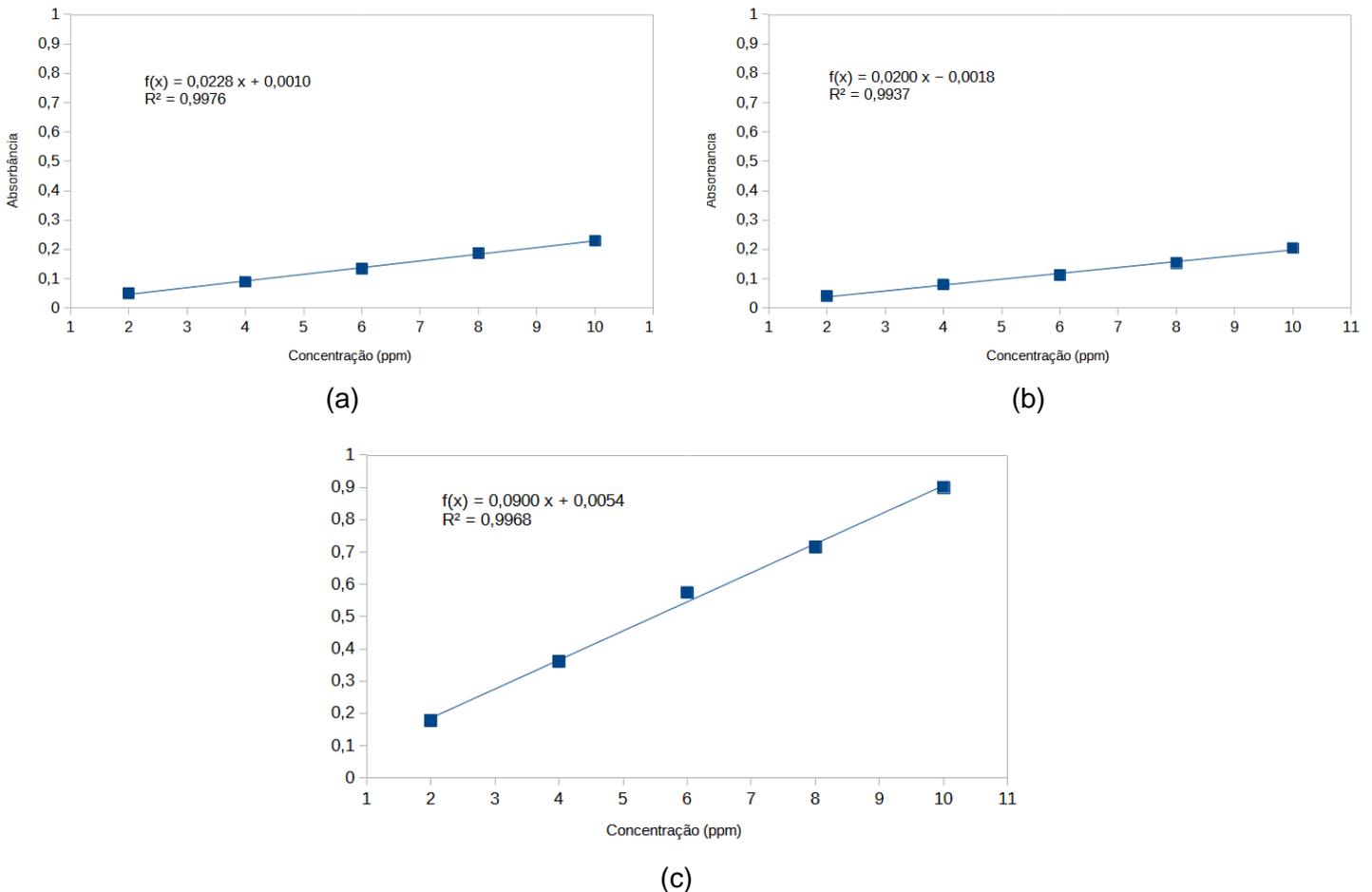
Corante	Pico de absorção (nm)
Corante ácido: Teconyl red F-2B	529
Corante catiônico: Azul de metileno	667
Corante reativo: Tecofix Brill-Rot VS-3B 140%	541

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a determinação dos picos de absorção de cada corante, é possível plotar a curva de calibração para cada corante, por meio de soluções com concentrações de corante

conhecidas. Os valores de absorvância obtidos foram posteriormente exportados para a realização de uma regressão linear, conforme apresentado na figura 3 a seguir.

Figura 4: Retas de calibração dos corantes estudados; (a) ácido, (b) reativo e (c) catiônico



Fonte: Autor 2023

O coeficiente de determinação, ou R^2 , é uma medida importante na avaliação do ajuste de um modelo, que segundo Gazola (2002), ele quantifica a qualidade com que os valores estimados pela linha de regressão se aproximam dos dados reais. Um valor de R^2 mais próximo de 1 (um), indica que a linha de regressão é capaz de explicar uma porção significativa da variabilidade dos dados dependentes, o que sugere que o modelo é adequado para representar o comportamento dos dados. Por outro lado, um valor de R^2 mais distante de 1 (um), indica que a linha de regressão não consegue explicar satisfatoriamente a variabilidade presente nos dados. O ideal é que o R^2 esteja o mais próximo possível de 1 (um), para garantir maior precisão de resultados que dependam do uso das equações de regressão.

Com base nos gráficos de dispersão de ponto gerados, foi possível analisar visualmente as tendências e os padrões nos dados, bem como a extração das equações de reta de cada um dos corantes, de modo a obter-se então a variação da concentração dos corantes ao longo do tempo. Com a obtenção das equações de reta pôde-se então realizar os experimentos de degradação

5.2 ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DOS CORANTES EM ESTUDO

5.2.1 Degradação dos corantes após aplicação do processo A

A tabela 1 apresenta os resultados obtidos após aplicação do processo A, que empregou a presença de luz UV e dióxido de titânio. Os valores da concentração de cada corante em solução, para cada alíquota coletada, foram obtidos a partir da leitura de absorbância e da equação da reta apresentada na Figura 3.

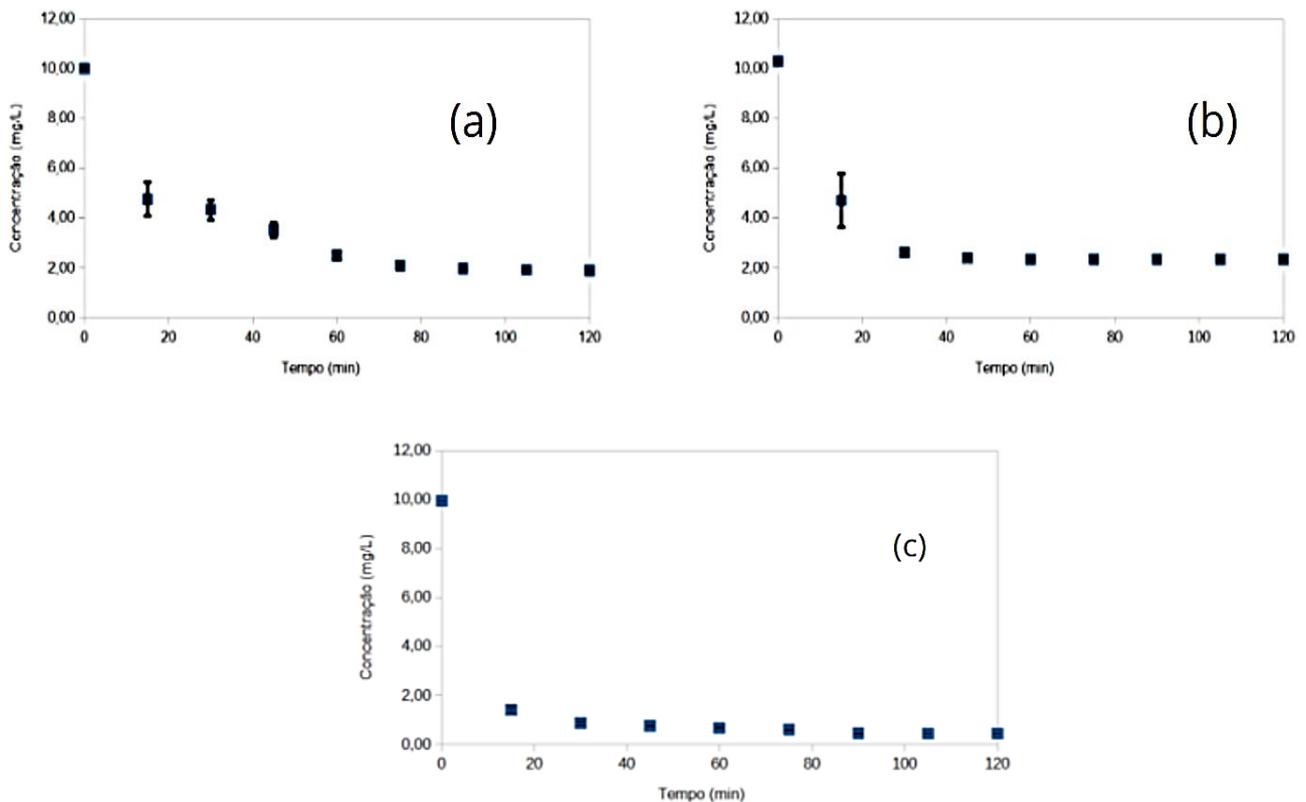
Tabela 1: Variação da concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo, para os corantes ácido, reativo e catiônico no processo fotocatalise.

Tempo (min)	Corante Ácido (mg/L)	Corante Reativo (mg/L)	Corante Catiônico (mg/L)
0	10,00 +/- 0,00	10,29 +/- 0,00	9,94 +/- 0,00
15	4,74 +/- 0,06	4,69 +/- 0,25	1,41 +/- 0,00
30	4,32 +/- 0,03	2,62 +/- 0,35	0,87 +/- 0,01
45	3,51 +/- 0,25	2,39 +/- 0,24	0,74 +/- 0,04
60	2,48 +/- 0,22	2,34 +/- 0,53	0,67 +/- 0,05
75	2,08 +/- 0,34	2,34 +/- 0,39	0,60 +/- 0,02
90	1,95 +/- 0,25	2,34 +/- 0,39	0,45 +/- 0,10
105	1,91 +/- 0,28	2,34 +/- 0,32	0,44 +/- 0,12
120	1,89 +/- 0,25	2,34 +/- 0,28	0,44 +/- 0,01

Fonte: Autor 2023.

Por meio da Tabela 1, que apresenta os resultados de degradação do corante no Processo A (fotocatálise), é possível observar um padrão que sugere uma redução significativa na concentração de corante após 15 minutos e a obtenção de equilíbrio logo após 30 minutos de degradação. Essas observações são evidentes em todos os gráficos (a), (b) e (c) que estão de acordo com o processo gradual e de espécies reativas durante o processo de fotodegradação, bem como com a possível influência de outros fatores, como a disponibilidade de TiO_2 , a concentração inicial do corante e as condições experimentais.

Figura 5: Curva de degradação dos corantes no Processo A (fotocatálise); (a) ácido, (b) reativo e (c) catiônico.



Fonte : Autor 2023

De acordo com Peng (2014), o corante ácido apresenta relativamente o corante com mais grupos funcionais, capazes de interagir com o TiO_2 P25, porque contém grupos funcionais como ácido carboxílico ($-\text{COOH}$) e sulfonato ($-\text{SO}_3\text{Na}$), que reagem com a superfície do TiO_2 por meio de ligações químicas, favorecendo a adsorção e a interação com as espécies reativas geradas durante a fotocatalização.

O corante reativo red 239, segundo Liu (2005), não apresenta grupos funcionais específicos que promovam uma interação direta com o TiO_2 , porém, possui uma facilidade na formação de espécies reativas. Os buracos na banda de valência do TiO_2 também

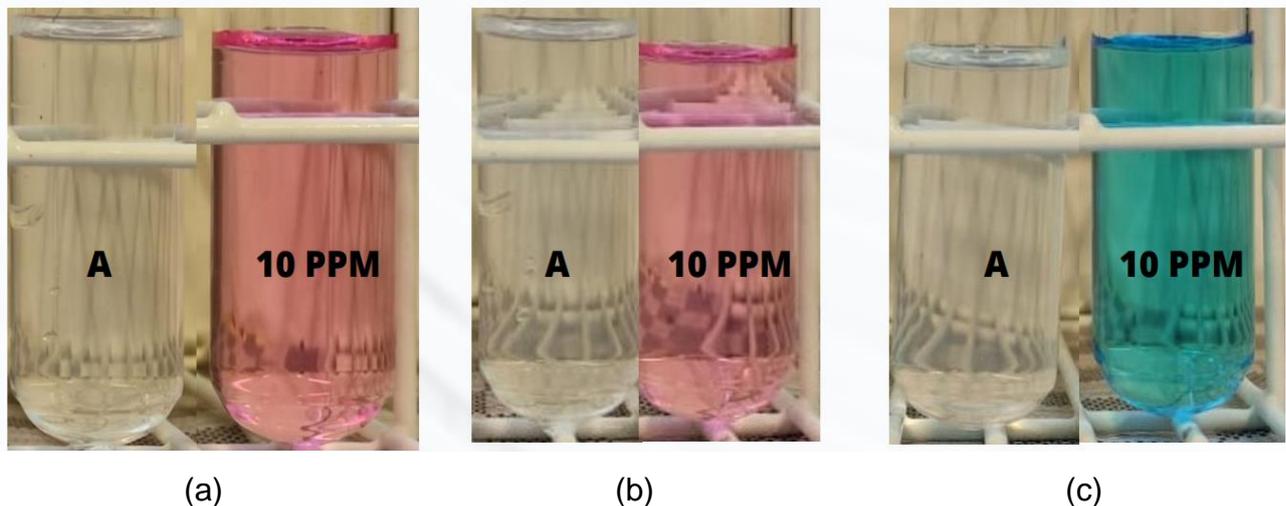
podem reagir com moléculas de água (H_2O) e oxigênio dissolvido (O_2) na solução, gerando espécies reativas, como radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$), superóxido ($\cdot\text{O}_2^-$) ou peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Essas espécies reativas são altamente oxidantes.

A alta eficiência de remoção do corante Azul de metileno, que é um corante catiônico, muito provavelmente foi devido a adsorção deste sobre a superfície do TiO_2 . O corante Azul de metileno, segundo Fernandes (2021), que contém um grupo amino ($-\text{NH}_2$), é adsorvido na superfície do TiO_2 devido a interações eletrostáticas. A carga positiva do corante permite uma forte adesão à superfície carregada negativamente do TiO_2 , garantindo uma proximidade adequada para a reação.

Como analisado na tabela 1, em conjunto com o gráfico da figura 5, item (a), (b), (c) a eficiência de degradação dos corantes ácido, reativo e catiônico no processo A foi de 81,14%; 77,26% e 95,57%, respectivamente.

A figura 6 a seguir demonstra os resultados para a degradação do processo A (fotocatálise).

Figura 6: Resultados de degradação do processo A (fotocatálise); (a) corante reativo, (b) corante reativo, (c) corante catiônico.



Fonte: Autor 2023

5.1.2 Degradação dos corantes após aplicação do processo B

O processo B foi realizado por meio de fotólise, ou seja, sem a presença do catalisador. Os resultados da degradação dos corantes podem ser observados na Tabela 2.

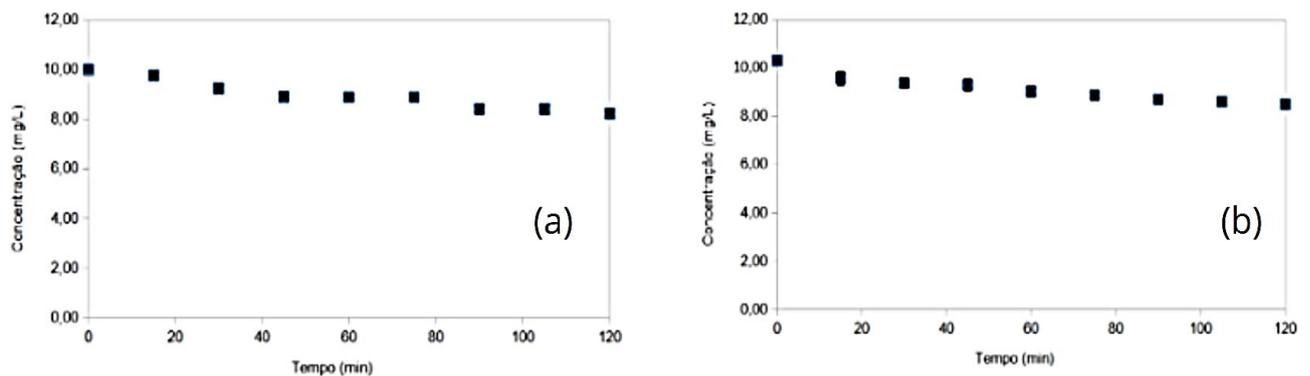
Tabela 2: Concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo para os corantes ácido, reativo e catiônico no processo fotólise..

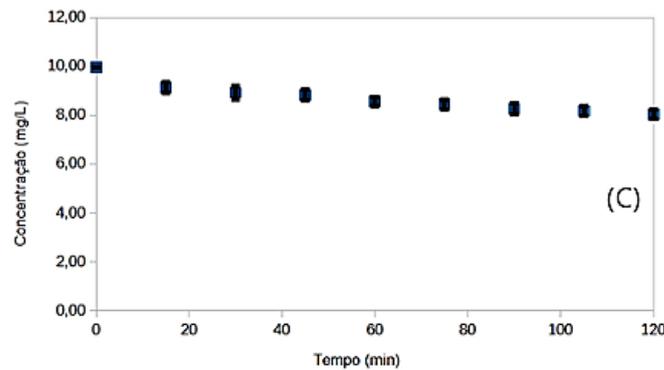
Tempo (min)	Corante Ácido (mg/L)	Corante Reativo (mg/L)	Corante Catiônico (mg/L)
0	10,00+/- 0,00	10,29+/- 0,00	9,94+/- 0,00
15	9,75+/- 0,06	9,57+/- 0,25	9,12+/-0,24
30	9,23+/-0,12	9,37+/- 0,18	8,91+/- 0,27
45	8,92+/- 0,09	9,29+/- 0,21	8,81+/- 0,23
60	8,88+/- 0,06	9,01+/- 0,18	8,56+/- 0,19
75	8,88+/- 0,06	8,86+/- 0,11	8,43+/- 0,21
90	8,39+/- 0,12	8,69+/- 0,07	8,25+/- 0,22
105	8,39+/- 0,12	8,59+/- 0,07	8,16+/- 0,20
120	8,22+/- 0,12	8,49+/- 0,07	8,02+/- 0,19

Fonte: Autor 2023

Para facilitar a compreensão dos resultados apresentados na Tabela 2, são apresentados os gráficos de degradação dos corantes em estudo, que são visualizados nas Figuras 5, itens (a), (b), (c).

Figura 7: Curva de degradação dos corantes no Processo B (fotólise); (a) ácido, (b) reativo e (c) catiônico.





Fonte: Autor 2023.

Os gráficos apresentados na figura 6, cujo processo foi realizado utilizando apenas luz UV, sem a presença do TiO_2 , mostraram uma diminuição na concentração dos corantes em comparação aos resultados do processo A. Isso ressalta a importância do catalisador para acelerar a reação de degradação.

A luz UV possui, nesse caso, o papel de fornecedora de energia, que segundo Faria (2016) ocorre por irradiação. A energia da radiação UV é capaz de excitar os elétrons, promovendo o seu deslocamento da banda de valência para a banda mais energética de condução.

A fotodegradação foi mais eficiente para o corante ácido, conforme apresentado no item (a) da figura 7. Isso ocorre devido o corante possuir um grupo ácido carboxílico ($-\text{COOH}$), que segundo Peng (2014), é conhecido por ser um grupo mais reativo em diversas condições químicas. Esse grupo ácido presente na molécula corante facilita a interação deste com as espécies reativas geradas durante a fotodegradação, aumentando assim a eficiência do processo.

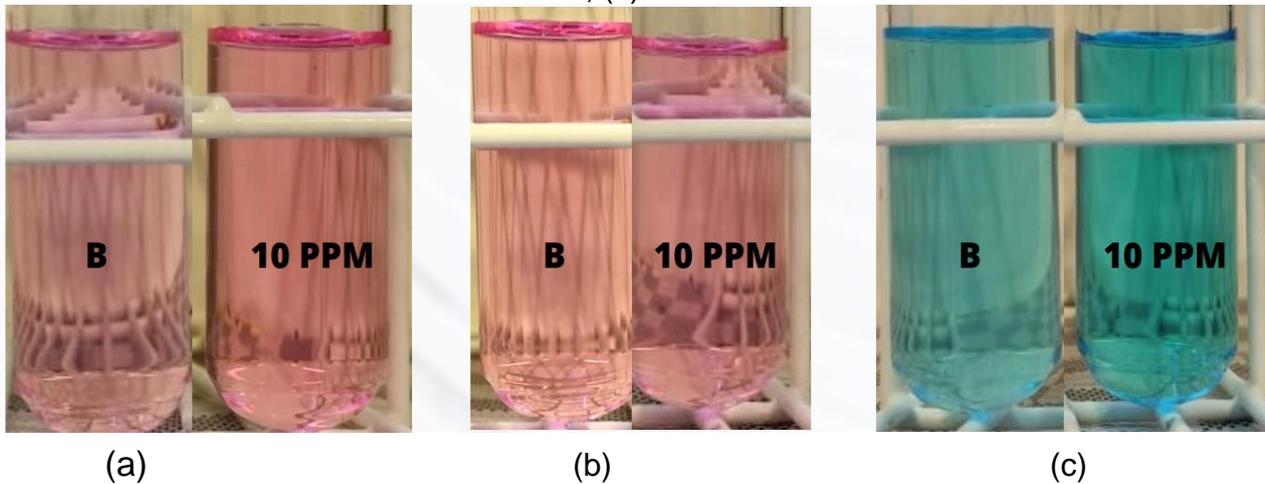
O corante reativo, cuja degradação é representada no item (b) da figura 7, possui múltiplos grupos azo ($-\text{N}=\text{N}-$) em sua estrutura. De acordo com Liu (2014), esses grupos são altamente reativos e podem ser facilmente quebrados pela ação da luz. Essa quebra dos grupos azo pode levar à formação de radicais livres e espécies reativas, que podem desempenhar um papel importante na fotodegradação do corante.

O azul de metileno, apresentado no item (c) da figura 7, possui a presença de ligações pi conjugadas em sua molécula. De acordo com Fernandes (2021), as ligações pi conjugadas contribuem para uma absorção mais eficiente da luz UV e, portanto, para uma fotólise mais eficaz. Essa característica é especialmente relevante em corantes têxteis, para os quais a fotodegradação seja uma alternativa viável de remoção da cor de efluentes têxteis durante o tratamento de águas residuais.

Como analisado na tabela 2, em conjunto com o gráfico da figura 5, itens (a), (b), (c), a eficiência de degradação dos corantes ácido, reativo e catiônico no processo B foi de 17,9%; 17,49% e 19,31%, respectivamente.

A figura 8 a seguir demonstra os resultados para a degradação do processo B (fotólise).

Figura 8: Resultados de degradação do processo B (fotólise); (a) corante reativo, (b) corante reativo, (c) corante catiônico.



Fonte: Autor 2023

5.1.2 Degradação dos corantes após aplicação do processo C

Conforme já descrito na metodologia, o processo C foi realizado contendo TiO_2 sem a presença de luz UV (no escuro), e os resultados de sua degradação são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Concentração de corante (mg/L) ao longo do tempo para os corantes ácido, reativo e catiônico no processo dióxido de titânio no escuro.

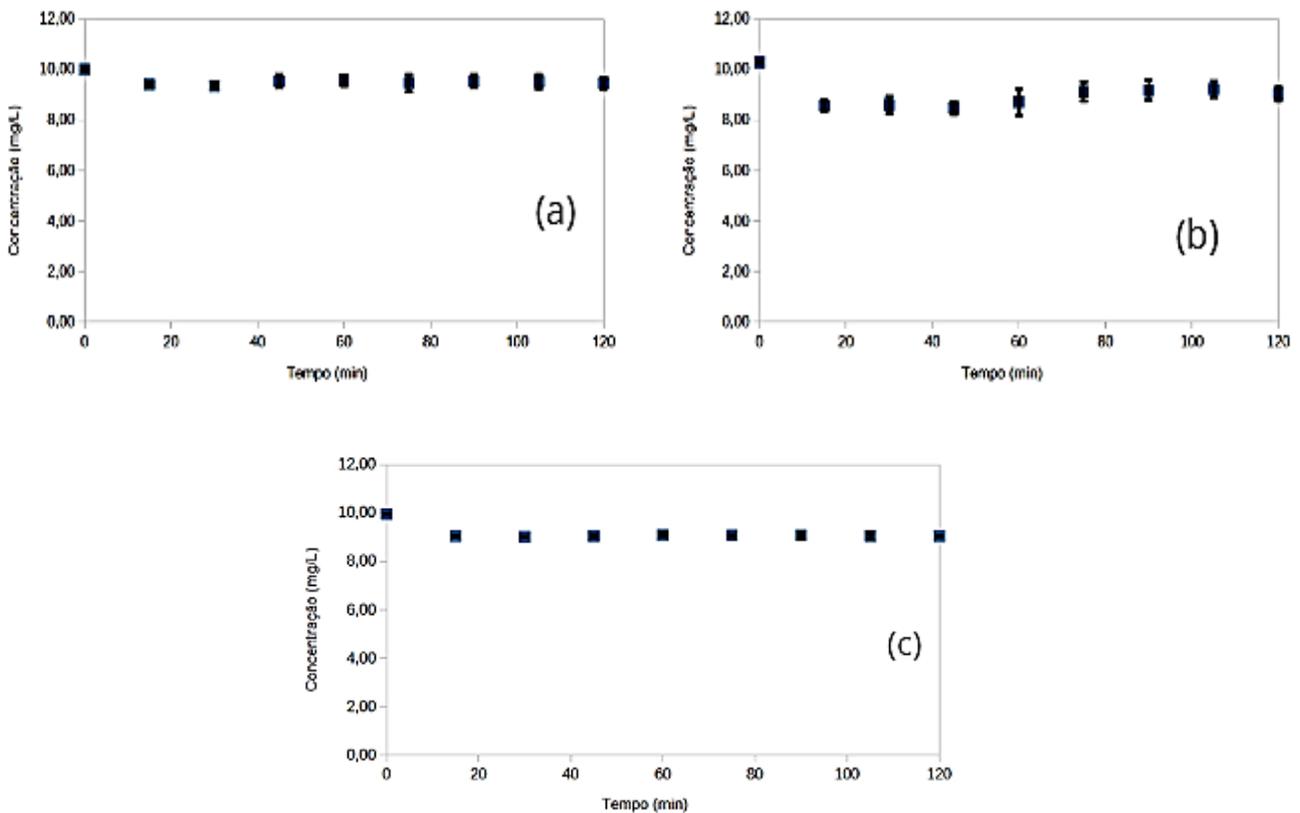
Tempo (min)	Corante Ácido (mg/L)	Corante Reativo (mg/L)	Corante Catiônico (mg/L)
0	10,00+/- 0,00	10,29+/- 0,00	9,94+/- 0,00
15	9,40+/- 0,06	9,56+/- 0,25	9,05+/- 0,00
30	9,34+/- 0,03	9,59+/- 0,35	9,00+/- 0,01
45	9,54+/- 0,25	9,47+/- 0,25	9,03+/- 0,04
60	9,56+/- 0,22	9,71+/- 0,53	9,09+/- 0,05

75	9,47+/- 0,34	9,11+/- 0,39	9,07+/- 0,02
90	9,53+/- 0,25	9,16+/- 0,39	9,07+/- 0,10
105	9,51+/- 0,28	9,21+/- 0,32	9,04+/- 0,12
120	9,45+/- 0,25	9,04+/- 0,28	9,04+/- 0,08

Fonte: Autor 2023.

A partir dos dados apresentados na Tabela 3 foram plotados gráficos que podem ser observados na figura 6, itens (a), (b), (c).

Figura 9: Curva de degradação do corante ácido no processo C (dióxido de titânio no escuro); (a) ácido, (b) reativo e (c) catiônico.



Fonte: Autor 2023

De acordo com os gráficos apresentados nas Figuras 9, itens (a), (b) e (c), os corantes foram submetidos ao contato com o TiO_2 pelo processo C, isto é, quando estão somente sob a presença do catalisador, mas na ausência de luz UV. Nesse caso, todos os corantes apresentaram um comportamento estável, os valores de diminuição da concentração não foram relevantes, e o comportamento oscilatório da curva indica que não houve degradação, e que o ligeiro decaimento dos valores se dão por processos de

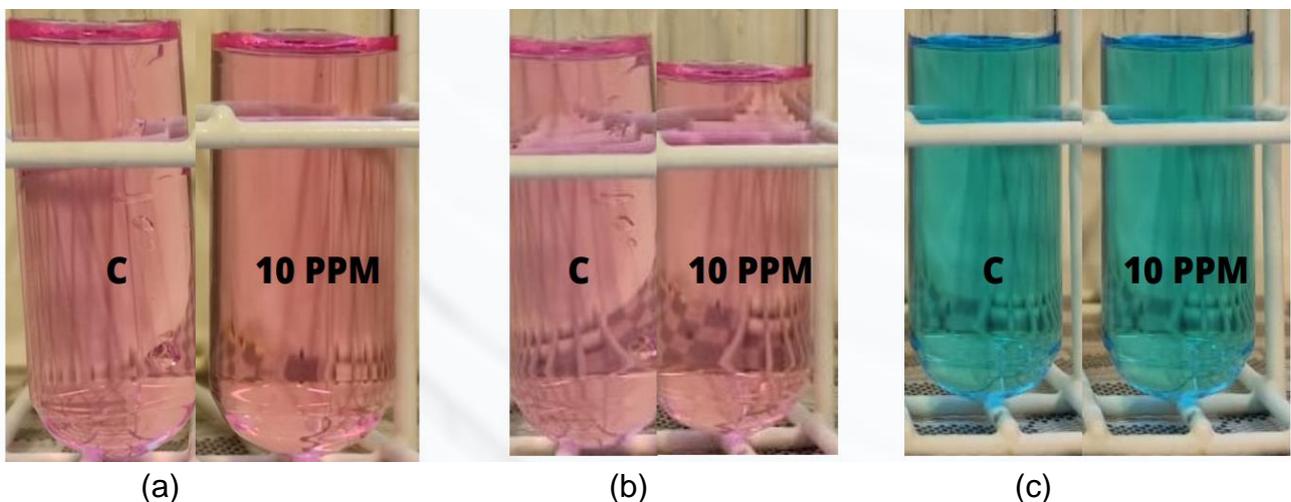
adsorção e dessorção, que são processo onde o corante liga a superfície do catalisador e posteriormente desliga, de uma fração de corantes na superfície das partículas de TiO_2 . Como esperado, a degradação apenas com o TiO_2 não ocorre sem a presença de luz, nesse caso o que ocorre é uma débil adsorção física.

A fotocatalização com TiO_2 é um processo que depende da absorção de luz UV, segundo Toral (2013), para gerar pares de elétron-buraco e iniciar as reações de oxidação dos corantes. Na ausência de luz, não há excitação energética do TiO_2 , o que resulta na falta de geração de espécies reativas necessárias para a degradação dos corantes. Segundo Toral (2013), durante a fotocatalise os elétrons na banda de condução do TiO_2 são transferidos para os corantes adsorvidos, reduzindo-os. Na ausência de luz, a transferência de elétrons do TiO_2 para os corantes não ocorre de forma eficiente, resultando em um baixo decaimento da concentração dos corantes. Na ausência de luz, a produção de espécies reativas não ocorre, dessa forma, os processos de oxidação dos corantes não ocorrem.

Como analisado nos tabela 3 em conjunto com o gráfico da figura 9, item (a), (b), (c) a redução da concentração dos corantes ácido, reativo e catiônico no processo C foi de 5,5%; 12,14% e 9,05%, respectivamente.

A figura 10 a seguir demonstra os resultados para a degradação do processo B (fotólise).

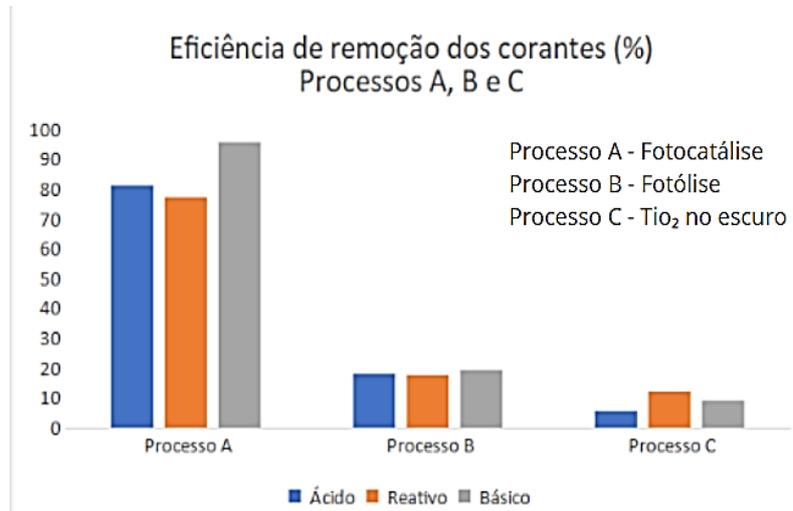
Figura 10: Resultados de degradação do processo C (Dióxido de titânio no escuro); (a) corante reativo, (b) corante reativo, (c) corante catiônico.



Fonte: Autor 2023

A imagem 11 a seguir demonstra uma comparação entre as eficiências dos três processos A, B e C.

Figura 11: Eficiência da remoção dos corantes (%) nos processos A; B e C.



Fonte: Autor 2023

Analisando a eficiência dos três processos apresentados A, B, C, presentes na figura 11, observou-se que a degradação dos corantes por fotocatalise foi mais eficiente do que a fotólise. Para a duração do processo de 120 min, o corante ácido no processo A em relação ao processo B teve uma eficiência de 77,67%, o corante reativo se comparado os processos A e B possuiu 59,77% e o corante catiônico se comparado aos dois primeiros processos possuiu 76,26%. Isso mostra que apesar da luz sozinha ser capaz de degradar o corante, essa degradação é muito lenta, em contrapartida, na presença de um fotocatalisador, a velocidade da reação de degradação é muito maior. O processo C por sua vez é ineficiente, pois sem a presença de luz UV não existe excitação energética do TiO₂ e, portanto, não ocorre a geração de espécies reativas responsáveis pela degradação dos corantes. Os resultados mostram uma ligeira queda da concentração ao final no processo C, mas é possível supor que a pequena redução se dá por processos de adsorção e dessorção de corantes na superfície do TiO₂, e não sua degradação.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que a fotocatalise utilizando dióxido de titânio (TiO₂) é um processo eficiente para a degradação de corantes têxteis. Foi possível aprender que a presença de um fotocatalisador e sua exposição à uma fonte de luz UV adequada são capazes de estabelecer condições de fotocatalise heterogênea que resultam em uma significativa redução de poluentes, como corantes, devido sua degradação acelerada ao longo do tempo.

Os corantes ácido e reativo mostraram uma maior eficiência de degradação nos processos de fotocatalise e fotodegradação, respectivamente. Esses corantes possuem grupos funcionais em suas estruturas que são altamente reativos e podem interagir com as espécies reativas geradas durante os processos de degradação.

O corante catiônico azul de metileno apresentou melhor eficiência de degradação no processo A, muito provavelmente foi devido a adsorção do corante: O corante Azul de metileno, que contém um grupo amino ($-NH_2$) e é catiônico, é adsorvido fisicamente na superfície do TiO_2 devido a interações eletrostáticas. A carga positiva do corante permite uma forte adesão à superfície carregada negativamente do TiO_2 , garantindo uma proximidade adequada para a reação.

É importante ressaltar que a eficiência da fotocatalise pode ser influenciada por diversos fatores, como a concentração inicial dos corantes, a disponibilidade do fotocatalisador (nesse caso, o TiO_2), a intensidade da luz UV, e as condições experimentais específicas. Portanto, são necessárias investigações adicionais para otimizar os parâmetros de processo e maximizar a eficiência de degradação dos corantes.

Este estudo contribui para o conhecimento sobre a degradação de corantes têxteis por meio da fotocatalise e fotodegradação, fornecendo informações importantes sobre os processos de reação e os principais fatores que influenciam a eficiência da degradação. Esses resultados podem ser úteis no desenvolvimento de estratégias sustentáveis para o tratamento de efluentes têxteis, visando reduzir o impacto ambiental causado pelos corantes. Salienta-se que, apesar dos resultados promissores, este estudo foi realizado em escala de laboratório e, portanto, são necessárias investigações adicionais em escala piloto e industrial para avaliar a viabilidade e a eficácia desses processos em condições presentes no ambiente fabril de trabalho.

Em suma, os resultados deste estudo demonstraram que a fotocatalise utilizando TiO_2 é uma abordagem promissora para a degradação de corantes têxteis. A compreensão dos mecanismos de reação e dos fatores que influenciam a eficiência da degradação é fundamental para o desenvolvimento de soluções eficazes e sustentáveis no tratamento de efluentes têxteis, contribuindo para a preservação do meio ambiente e a promoção da sustentabilidade na indústria têxtil.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e conclusões deste estudo, existem diversas oportunidades de pesquisa para investigar e aprimorar ainda mais os processos de

degradação de corantes têxteis. Abaixo estão algumas sugestões de temas que podem ser abordados em trabalhos futuros:

Aplicação de outros catalisadores: Além do dióxido de titânio (TiO₂), existem diversos outros materiais que podem atuar como catalisadores na fotocatalise. Estudos futuros podem investigar a eficácia de diferentes catalisadores, como outros óxidos metálicos, partícula de compostos semicondutores modificados, carbono ativado, zeólitas, entre outros. Comparar o desempenho desses catalisadores em termos de eficiência de degradação dos corantes pode fornecer *insights* valiosos para o desenvolvimento de processos mais eficientes e sustentáveis.

Otimização dos parâmetros de processo: É importante explorar e otimizar os parâmetros de processo, como concentração de corantes, quantidade de catalisador, pH da solução, intensidade e tempo de irradiação UV, temperatura, entre outros. Investigar o efeito desses parâmetros na eficiência de degradação dos corantes pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias mais eficazes para o tratamento de efluentes têxteis.

Estudos cinéticos e mecanísticos: A compreensão dos mecanismos de degradação dos corantes durante os processos de fotocatalise e fotodegradação é fundamental. Realizar estudos cinéticos para determinar as taxas de degradação e investigar os possíveis intermediários e produtos de degradação gerados ao longo do tempo podem fornecer informações valiosas sobre as reações envolvidas. Além disso, explorar técnicas analíticas avançadas, como espectroscopia de massas e ressonância magnética nuclear, pode ajudar a elucidar os mecanismos de degradação dos corantes.

Avaliação da viabilidade em escala piloto e industrial: Este estudo foi realizado em escala de laboratório, portanto, é necessário realizar estudos em escala piloto e industrial para avaliar a viabilidade e a eficácia dos processos de degradação de corantes têxteis. Investigar a aplicação desses processos em condições reais de tratamento de efluentes têxteis, considerando fatores como a concentração e composição dos efluentes, pode fornecer *insights* valiosos sobre a implementação prática dessas tecnologias.

Avaliação da toxicidade dos produtos de degradação: Além da eficiência de degradação dos corantes, é essencial avaliar a toxicidade dos produtos de degradação gerados durante os processos. Estudos futuros podem envolver a análise da toxicidade aguda e crônica dos produtos de degradação para determinar o impacto ambiental e a segurança desses processos. Essa análise contribuirá para garantir que a degradação dos corantes seja feita de maneira ambientalmente amigável e sustentável.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Tecnologias de tratamento de esgotos sanitários. Brasília: ANA, 2007.

ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. A química do processamento têxtil. *Química nova*, v. 19, n. 3, p. 320-330, 1996.

ALMEIDA, Edna et al. Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. *Química Nova*, v. 27, p. 818-824, 2004.

ALVES, Patricia Aparecida. Tratamento eletroquímico e eletroquímico foto-assistido na degradação de efluentes da indústria têxtil. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

AMORIM, Camila Costa de; LEÃO, Mônica Maria Diniz; MOREIRA, Regina de Fátima Peralta Muniz. Comparação entre diferentes processos oxidativos avançados para degradação de corante azo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, p. 543-550, 2009.

ANDREOZZI, R., Caprio, V., Insola, A., & Marotta, R. (2007). *Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Water Purification and Recovery*. Elsevier.

ARAÚJO, Ana Julia Correia De et al. Impactos ambientais do beneficiamento têxtil e alternativas sustentáveis através do conceito de Química Verde. 2022.

ARAÚJO, K. S., Antonelli, R., Gaydeczka, B., Granato, A. C., & Malpass, G. R. P. (2016). Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 11(3), 495-508.

BARROS, M. P. L. et al. Tratamento de efluente de lavanderia industrial utilizando reator anaeróbio de manta de lodo e filtro percolador. *Revista DAE*, v. 64, n. 194, p. 118-129, 2016.

BARROS, Safira Moura. Otimização do processo de tingimento de fibras naturais e sintéticas utilizando líquidos iônicos próticos. 2021.

BOANO, Paulo Tchimbumbuanjila. Desenvolvimento e otimização de nanopartículas fotocatalíticas. 2020. Tese de Doutorado.

BONANCÊA, Carlos Eduardo. Estudo espectroscópico de processos de degradação fotoquímica e fotoeletroquímica de corantes. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BUTH, Daniel Frederico. Degradação fotocatalítica da tetraciclina em solução aquosa empregando TiO₂ suportado. 2009.

BRITO, Núbia Natália de; SILVA, Victor Borges Marinho. Processo oxidativo avançado e sua aplicação ambiental. 2012.

CATANHO, Marciana; MALPASS, Geoffroy Roger Pointer; MOTHEO, Artur de Jesus. Avaliação dos tratamentos eletroquímico e fotoeletroquímico na degradação de corantes têxteis. *Química Nova*, v. 29, p. 983-989, 2006.

CLARK, M. (2010). *The Science of Color: Textiles and Their Dyes*. Color Research & Application.

COLPANI, Gustavo Lopes et al. Dopagem de nanopartículas de TiO₂ com terras raras via ultrassom e funcionalização com carboximetil-β-ciclodextrina para fotocatalise heterogênea. 2017.

DAS A. & Mishra S. (2017). Removal of textile dye reactive green-19 using bacterial consortium: process optimization using response surface methodology and kinetics study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

DUARTE, Ana Raquel da Silva. Design têxtil e moda. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de Lisboa, Faculdade de Arquitetura.

FARIA, Ana Claudia Rangel. Preparação e caracterização de filmes finos automontados de polieletrólitos/TiO₂/CdSe para aplicação na geração de hidrogênio a partir da fotocatalise da água. 2016.

FERNANDES, Ítalo Lacerda. Síntese e caracterização de nanopartículas magnéticas com revestimento duplo de sílica e dióxido de titânio com elevada atividade fotocatalítica para degradação do corante azul de metileno. 2022.

FIOREZE, Mariele; DOS SANTOS, Eliane Pereira; SCHMACHTENBERG, Natana. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, p. 79-91, 2014.

FREITAS, A. S.; DORNELAS, C. B. Impactos ambientais dos corantes sintéticos utilizados na indústria têxtil. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 2, p. 49-60, 2017.

GAZOLA, Sebastião et al. Construção de um modelo de regressão para avaliação de imóveis. 2002.

GEADA, Oriana Maria Ribeiro Neves Duarte et al. Remoção de corantes têxteis utilizando resíduos agrícolas da produção de milho. 2006.

GUARATINI, Cláudia CI; ZANONI, Maria Valnice B. Corantes têxteis. *Química nova*, v. 23, p. 71-78, 2000.

HELLER, Eva. *A psicologia das cores: como as cores afetam a emoção e a razão*. Editora Olhares, 2022.

HOLKAR C. R., Jadhav A. J., Pinjari D. V., Mahamuni N. M. & Pandit A. B. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches. *Journal of Environmental Management*.

ISLAM M. A., Ali I., Karim S. M. A., Hossain Firoz M. S., Chowdhury A.-N., Morton D. W. & Angove M. J. (2019). Removal of dye from polluted water using novel nano manganese oxide-based materials. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100911.

KANT, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. Nat. Sci. (Irvine).

SAINI, R. D. (2017). Textile organic dyes: Polluting effects and elimination methods from textile waste water. Int. J. Chem. Eng. Res.

KHAN S., Malik A. (2014). Environmental and health effects of textile industry wastewater. In: Environmental Deterioration and Human Health: Natural and Anthropogenic Determinants (Malik A., Grohmann E. & Akhtar R., eds). Springer Netherlands, Dordrecht.

LASCHUK, Tatiana. Workflow para o desenvolvimento de projetos de design de superfície com foco em estamparia têxtil para a área da moda. 2017.

LIU, Hsuan-Liang; CHIOU, Yun-Ru. Optimal decolorization efficiency of Reactive Red 239 by UV/TiO₂ photocatalytic process coupled with response surface methodology. Chemical Engineering Journal, v. 112, n. 1-3, p. 173-179, 2005.

LIMA, E. V. O beneficiamento têxtil como estratégia de competitividade na indústria da moda. 2019. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Moda) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.

MANI S., Chowdhary P. & Bharagava R. N. (2019). Textile wastewater dyes: toxicity profile and treatment approaches. In: Emerging and Eco-Friendly Approaches for Waste Management (Bharagava, R. N. & Chowdhary, P., eds). Springer, Singapore.

MATOS, Tassya Thaiza S. et al. Aplicação de subprodutos industriais na remoção de corantes reativos têxteis. Revista Virtual de Química, v. 5, n. 5, p. 840-852, 2013.

MUNHOZ, M. C. B. (2015). Têxteis: Ciência e Tecnologia. São Paulo: SENAI-SP.

NEMEROW, Nelson L.; AGARDY, Franklin J. (2015). Environmental Engineering: Water, Wastewater, Soil and Groundwater Treatment and Remediation. 6th ed. Waltham, MA: Academic Press.

NOGUEIRA, R. F. P., Jardim, W. F., & Pádua, V. L. (2002). Photocatalysis in water and wastewater treatment. In Chemistry for the Protection of the Environment (pp. 173-203). Springer, Dordrecht.

NOR F. H. M., Abdullah S., Yuniarto A., Ibrahim Z., Nor M. H. M. & Hadibarata T. (2021). Production of lipopeptide biosurfactant by *Kurthia gibsonii* KH2 and their synergistic action in biodecolourisation of textile wastewater. Environmental Technology & Innovation.

OLIVEIRA, Carlos Rafael Silva de et al. Tecnologia de fluido supercrítico como método alternativo sustentável para tingimento têxtil: uma abordagem sobre redução de resíduos, energia e emissão de CO₂. Jornal de Ciências Ambientais, 13 jun. 2023.

OLIVEIRA, Carlos Rafael Silva de et al. Efeito antimicrobiano de tecido de algodão funcionalizado com um compósito nanohíbrido de caulinita-titânia. Química e Física dos Materiais, v. 295, p. 127078, 1 fev. 2023.

OLIVEIRA, Carlos Rafael Silva de et al. Reengenharia Têxtil: Soluções eco-responsáveis para uma indústria mais sustentável. *Produção e Consumo Sustentáveis*, v. 28, p. 1232-1248, out. 2021.

PEIXOTO, F.; Marinho, G. Rodrigues, K. (2013). Corantes têxteis: uma revisão. *HOLOS*, 5, 98-106.

PENG, Yong-Gang et al. Preparation of poly (m-phenylenediamine)/ZnO composites and their photocatalytic activities for degradation of CI acid red 249 under UV and visible light irradiations. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 33, n. 1, p. 123-130, 2014.

PRASAD S. S. & Aikat K. (2014). Optimization of medium for decolorization of Congo red by *Enterobacter* sp. SXCR using response surface methodology. *Desalination and Water Treatment*.

RAJ D. S., Prabha R. J. & Leena R. (2012). Analysis of bacterial degradation of azo dye Congo red using HPLC. *Journal of Industrial Pollution Control*.

RIZZO, Roberta Ferreira. Produção de ficobiliproteínas por *Arthrospira platensis* sob diferentes condições de iluminação e avaliação de sua estabilidade, visando aplicação em alimentos. 2014.

ROY, S., & Das, A. (2018). Sustainable textile dyeing and printing. Springer. ONU Meio Ambiente. (2018). Manual de Produção mais Limpa para a Indústria Têxtil.

SALEM, Vidal. (2005). Tingimento Têxtil. 2. ed. Rio de Janeiro: Senai/Cetiq.

SANTOS, F. F. dos; Carvalho, R. G.; Gomes, D. A.; Oliveira, D. S. de. (2018). Avaliação dos resíduos gerados no processo de beneficiamento têxtil: estudo de caso em uma empresa de Minas Gerais. *Revista Virtual de Química*.

SANTOS, M. R.; SOUZA, T. C.; MACHADO, C. A. (2019). Beneficiamento primário de tecidos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2019, Salvador. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, p. 1-10.

SANTOS, S. A. et al. (2018). Removal of dyes from textile effluent: a review of recent approaches. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*.

SARAVANAN, A., Kumar, P. S., Vo, D.-V. N., Jeevanantham, S., Karishma, S., and Yaashikaa, P. (2021). A review on catalytic-enzyme degradation of toxic environmental pollutants: Microbial enzymes. *J. Hazard. Mater.*

SOUZA, Bruno Leandro Cortez de. (2014). Estudo da fotocatalise heterogênea utilizando luz solar e ZnO como pré-tratamento de percolado de aterro sanitário. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, Renata Cristina et al. Tratamento de efluentes de lavanderia hospitalar por processo oxidativo avançado: UV/H₂O₂. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, p. 601-611, 2019.

TASSI, Felipe Gomes. Metodologias para tratamento de efluentes têxteis: uma revisão. 2022.

TERAN, Francisco. Aplicação de fotocatalise heterogênea e homogênea para a remoção de cor em efluentes provenientes de indústria de processamento de couro. Revista Monografias Ambientais, p. 3316-3325, 2014.

TORAL, José Augusto de Oliveira. Otimização de parâmetros no tratamento de efluentes têxteis através de processos oxidativos avançados. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ZAINITH S., Sandhya S., Saxena G. & Bharagava R. (2016). Microbes: an eco-friendly tools for the treatment of industrial wastewaters. Microbes and Environmental Management.

ZANONI, MARIA V. BOLDRIN; YAMANAKA, HIDEKO. Caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento. 2016.