

## APLICAÇÃO DA FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

*APLICACIÓN DE LA FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA*

*APPLICATION OF HETEROGENEOUS PHOTOCATALYSIS IN THE TREATMENT OF INDUSTRIAL EFFLUENTS: A SYSTEMATIC REVIEW*



Jefferson LIRA<sup>1</sup>

e-mail: lira.silva@ufpe.br



Rogério Ferreira da SILVA<sup>2</sup>

e-mail: rogerio1986@gmail.com



Gilson Lima da SILVA<sup>3</sup>

e-mail: gilson.lsilva@ufpe.br

### Como referenciar este artigo:

LIRA, J.; SILVA, R.; SILVA, L. Aplicação da fotocatálise heterogênea no tratamento de efluentes industriais: uma revisão sistemática. *Revista Geografia em Atos*, Presidente Prudente, v. 09, n. 00, e025008. e-ISSN: 1984-1647. DOI: 10.35416/2025.10601



| Submetido em: 13/08/2024

| Revisões requeridas em: 17/04/2025

| Aprovado em: 09/09/2025

| Publicado em: 10/10/2025

---

**Editores:** Prof. Dr. Nécio Turra Neto  
Profa. Me. Karina Malachias Domingos dos Santos

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife – Pernambuco (PE) – Brasil. Mestrado em Engenharia Ambiental pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE.

<sup>2</sup> Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), Recife – Pernambuco (PE) – Brasil. Doutorado em Química pela UFPE. Professor associado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco.

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife – Pernambuco (PE) – Brasil. Doutorado em Engenharia Química na área de Engenharia Ambiental, pela Universidade Estadual de Campinas. Professor Associado UFPE.

**RESUMO:** Um efluente carregado de produtos químicos, corantes e surfactantes tem sido um problema para as indústrias do ramo têxtil, necessitando de um tratamento eficaz na degradação desses compostos, para que seja possível o seu descarte conforme determina a legislação. A fotocatálise heterogênea se caracteriza como um dos tratamentos promissores para o tratamento desse efluente. Este trabalho se propôs a elaborar uma revisão sistemática, utilizando a metodologia PRISMA para seleção de artigos nas plataformas Scopus e Web of Science. Foram selecionados 26 artigos que se enquadram na pesquisa. Com o auxílio do software VOSviewer, elaboraram-se mapas nos quais foi possível identificar os principais coautores, os países desenvolvedores das pesquisas, bem como as principais palavras-chave utilizadas. Nesses artigos, observou-se as diversas aplicações da fotocatálise heterogênea no tratamento desses efluentes industriais. Concluiu-se que o descarte correto do efluente tem sido uma preocupação mundial; nessa perspectiva, novos estudos e testes vêm sendo desenvolvidos.

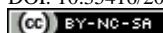
**PALAVRAS-CHAVE:** Processo oxidativo avançado. Dióxido de titânio. Efluente têxtil.

**RESUMEN:** Un efluente cargado de productos químicos, colorantes y tensioactivos ha supuesto un problema para las industrias textiles. Se necesita un tratamiento eficaz para degradar estos compuestos, de modo que puedan eliminarse según lo exige la ley. La fotocatálisis heterogénea se caracteriza como uno de los tratamientos prometedores para el tratamiento de este efluente. Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar una revisión sistemática, utilizando la metodología PRISMA para seleccionar artículos en las plataformas Scopus y Web of Science. Se seleccionaron 26 artículos que se ajustan a la investigación. Con la ayuda del software VOSviewer, se crearon mapas que muestran a los principales coautores, los países en desarrollo de la investigación, así como las principales palabras clave utilizadas. En estos artículos encontrados se observaron las diversas aplicaciones de la fotocatálisis heterogénea en el tratamiento de estos efluentes industriales. Se concluyó que la correcta disposición del efluente ha sido una preocupación mundial, desde esta perspectiva se han desarrollado nuevos estudios de prueba.

**PALABRAS CLAVE:** Proceso oxidativo avanzado. Dióxido de titanio. Efluente textil.

**ABSTRACT:** An effluent loaded with chemicals, dyes, and surfactants has been a problem for the textile industry. An effective treatment is needed to degrade these compounds so that they can be disposed of as required by law. Heterogeneous photocatalysis is one of the promising treatments for this effluent. This study aimed to develop a systematic review using the PRISMA methodology to select articles from the Scopus and Web of Science platforms. 26 articles were selected that fit the research. With the help of the VOSviewer software, maps were created where the main co-authors, countries developing research, and the main keywords used could be identified. In these articles that were found, the various applications of heterogeneous photocatalysis in the treatment of these industrial effluents were observed. It was concluded that the correct disposal of effluent has been a worldwide concern, and from this perspective, new test studies are being developed.

**KEYWORDS:** Advanced oxidation process. Titanium dioxide. Textile effluent.



## **Introdução**

Durante o processo de beneficiamento têxtil, é requerida uma grande quantidade de água para que as peças trabalhadas possam atingir o objetivo esperado, gerando, assim, efluente de composição extremamente diversificada, devido aos produtos químicos lançados para a alteração do jeans que está sendo trabalhado. Muitos dos componentes desse efluente são produtos químicos que, quando lançados em corpos hídricos, têm a capacidade de alterar as propriedades físico-químicas do meio (Ramos *et al.*, 2020).

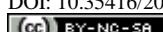
Devido à necessidade do uso de grande quantidade de água nos processos de beneficiamento têxtil, consequentemente gera-se uma grande quantidade de efluente. Esse efluente é carregado de componentes químicos e apresenta alta toxicidade. A toxicidade dos resíduos têxteis é uma das questões mais relevantes no âmbito dos impactos ambientais. Esses compostos podem permanecer por cerca de 50 anos em ambientes aquáticos, pondo em risco a estabilidade dos ecossistemas e a vida em seu entorno (Viana, 2019).

Por esse motivo, o resíduo precisa ser tratado de forma eficaz, tanto para ser reutilizado quanto para não gerar gastos excessivos à empresa e não causar danos de grande magnitude ao meio ambiente quando descartado. No entanto, os parâmetros de qualidade do efluente reciclado podem variar dependendo dos processos aplicados em uma fábrica têxtil (Macedo, 2022).

Entre as tecnologias alternativas já existentes relacionadas ao tratamento de efluentes industriais, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm se mostrado bastante promissores, pois são eficientes na mineralização de compostos orgânicos recalcitrantes, como os existentes no efluente têxtil (Wolff *et al.*, 2022).

Os POAs apresentam boa degradabilidade de compostos extremamente tóxicos e recalcitrantes, principalmente devido à geração de espécies altamente oxidantes, em geral os radicais hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ), sendo este um forte oxidante não seletivo, com elevado potencial de oxidação de 2,8 V, superior a outros agentes oxidantes presentes nesse processo (Dória *et al.*, 2018).

Teixeira e Jardim (2004) afirmam que os POAs são basicamente divididos em dois tipos: homogêneos e heterogêneos. Os heterogêneos são aqueles processos que contam com a presença de catalisadores, enquanto os demais são chamados de homogêneos. Eles ainda mencionam que os sistemas heterogêneos de POAs podem ser divididos em processos com irradiação e processos sem irradiação. Os processos com irradiação necessitam de uma fonte de luz para promovê-la, podendo ser a luz solar UV ou uma fonte de luz artificial.



Este trabalho propôs elaborar uma revisão sistemática, utilizando a metodologia PRISMA para seleção de artigos nas plataformas Scopus e Web of Science, sobre as aplicações da fotocatálise heterogênea com dióxido de titânio no tratamento de efluentes.

## Materiais e métodos

Para uma melhor análise dos artigos encontrados, a revisão sistemática foi dividida em três etapas: a pesquisa nas bases de dados, a análise bibliométrica e a análise sistemática.

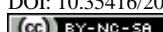
### Pesquisa na base de dados

A busca por artigos foi realizada em duas bases de dados distintas: Scopus e Web of Science. Ambas as plataformas foram selecionadas pelo reconhecimento da comunidade científica como de grande abrangência e credibilidade, além de serem indexadoras de periódicos relevantes.

Foram analisados artigos científicos nacionais e internacionais encontrados nas plataformas citadas, utilizando-se como palavras-chave as expressões “dióxido de titânio” e “corantes têxteis”, traduzidas para o inglês, restringindo a busca a artigos publicados entre 2019 e 2023.

Para a seleção dos trabalhos, seguiu-se o passo a passo descrito pela metodologia PRISMA:

- Identificação: nesta etapa, pesquisaram-se na Scopus e Web of Science as palavras-chave citadas anteriormente. Foram identificados mais de 200 artigos no total das duas plataformas;
- Seleção: nesta etapa, aplicaram-se filtros de refinamento da pesquisa, priorizando-se os anos de publicação de 2019 a 2023. Com esse filtro, o número de artigos foi reduzido para 139;
- Elegibilidade: foram lidos os títulos e resumos para excluir documentos sem relação com o estudo. Nessa etapa, 66 artigos foram excluídos, restando 73;
- Inclusão: após as etapas anteriores, realizou-se a leitura integral do material restante. Dos 73 artigos, apenas 26 se enquadram no objetivo traçado para a pesquisa.



## Análise bibliométrica

A análise bibliométrica foi realizada utilizando o *software* VOSviewer para a criação de redes bibliométricas. As cores dos conjuntos representam os clusters (agrupamentos construídos pelo *software*), constituídos por círculos interligados por arcos. O tamanho dos círculos indica o impacto na análise, enquanto a espessura dos arcos representa a força de ligação entre os círculos. As redes foram geradas com o intuito de avaliar as relações de coautoria, os países desenvolvedores das pesquisas e as palavras-chave utilizadas nos trabalhos.

## Análise sistemática

Aqui foram analisados os artigos que foram encontrados nas bases de dados já informadas. A partir dessa análise, foram elaboradas duas tabelas com os artigos selecionados.

Para a seleção dos artigos que foram utilizados, foi utilizada a metodologia PRISMA (Moher *et al.*, 2009), que se divide em quatro fases: identificação; seleção; elegibilidade e inclusão.

## Resultados e discussão

A partir das análises que foram realizadas, foi possível alcançar os objetivos que foram traçados, que foram: selecionar artigos nas bases de dados já informadas que estejam relacionados com o tema; elaborar mapas com o auxílio do *software* VOSviewer, mostrando as redes de pesquisas acerca do tema proposto, seus autores, palavras-chave, países, dentre outras informações; e elaborar tabelas com uma breve descrição dos trabalhos, sua metodologia e seus principais resultados.

## Pesquisa na base de dados

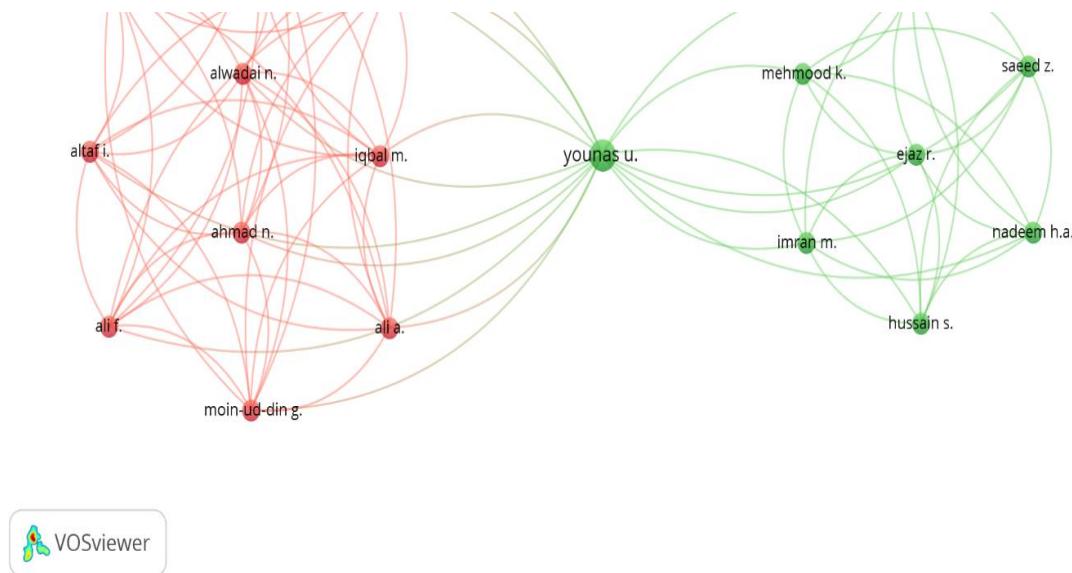
### Análise bibliométrica

Na primeira análise realizada com o VOSviewer, foram analisados os coautores relacionados nos trabalhos que foram selecionados. Identifica-se uma grande paridade entre os pesquisadores citados, destacando-se apenas Younas U., um pesquisador de grande relevância no tema, com seus trabalhos desenvolvidos acerca do tema estudado nos últimos anos. É visto que Younas U. tem ligações de pesquisa nos dois *clusters* que são vistos na figura, sendo então



um pesquisador de destaque no tema estudado. Na Figura 1, é possível observar a correlação entre os pesquisadores que mais vezes foram citados pelos autores na plataforma Scopus.

**Figura 1** – Correlação dos coautores na plataforma Scopus

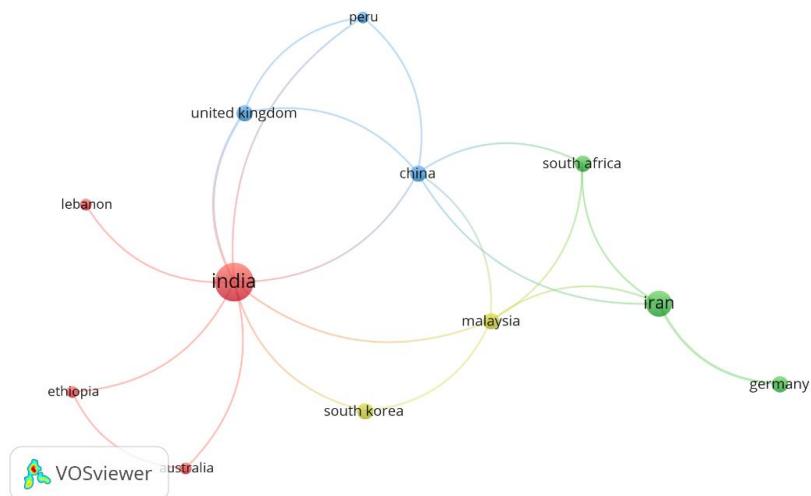


Fonte: Autores (2024).

Essa grande relevância do Dr. Umer Younas – Younas U. se dá devido aos trabalhos que o mesmo vem desempenhando na química relacionada ao meio ambiente, no que concerne ao tratamento e investigação de efluentes, como, por exemplo, os seus trabalhos intitulados *Efluentes industriais de fertilizantes: Caracterização físico-química e avaliação de parâmetros de qualidade da água (2017)* e *Atividade fotocatalítica de luz visível aprimorada de TiO<sub>2</sub> co-dope com Fe, Co e S para degradação de Cango vermelho (2021)*, dentre tantos outros que poderiam aqui serem citados.

Os países dos autores que têm desenvolvido pesquisas acerca do assunto podem ser vistos na Figura 2. Identifica-se um destaque em especial para a Índia em comparação a países europeus e sua hegemonia no continente asiático, fazendo frente a inúmeros países desenvolvidos, com a China aparecendo em um dos clusters. Esse grande número de trabalhos desenvolvidos na Índia em pesquisas relacionadas à área também foi apontado por Marques e Conceição (2022) e Silva e Longo (2022), que acrescentaram ainda que essa grande participação se dá devido à sua elevada produção de resíduos advindos da indústria têxtil, assim como à sua grande demanda.

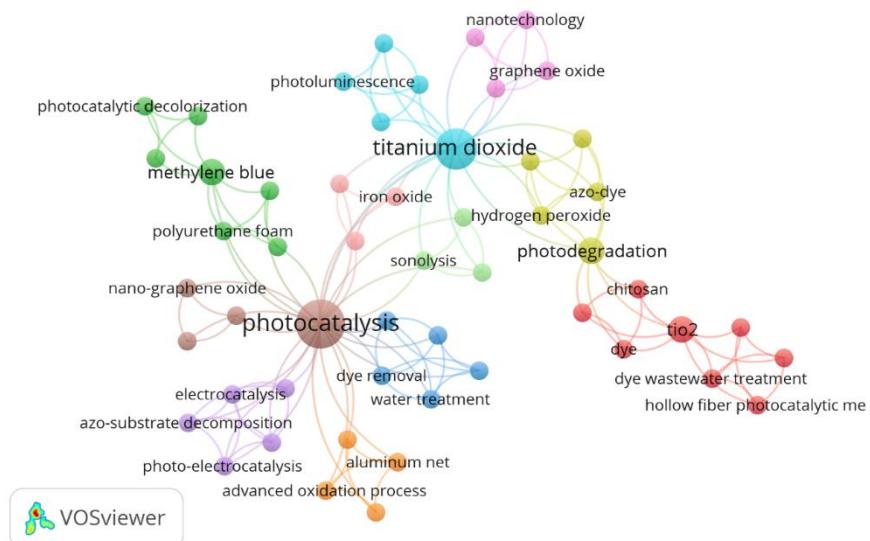
**Figura 2** – Correlação de países desenvolvedores de pesquisas publicadas na Scopus



Fonte: Autores (2024).

Percebe-se uma ausência de países americanos nos trabalhos encontrados. Apenas o Peru, país da América do Sul, aparece fazendo ligações com o Reino Unido, a China e a Índia, ficando evidente, então, a necessidade de desenvolvimento de novas pesquisas e novas parcerias entre os desenvolvedores, mediante a relevância do tema aqui estudado ou a busca pela publicação em periódicos de maior peso para a comunidade científica. Na Figura 3, são vistas as palavras-chave mais utilizadas no desenvolvimento dos trabalhos encontrados na plataforma Web of Science.

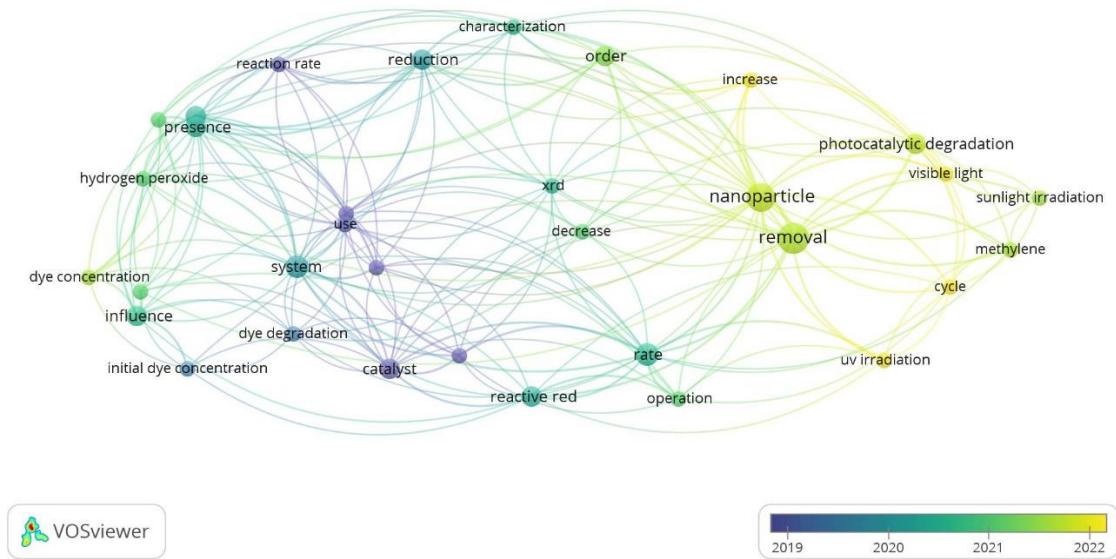
**Figura 3** – Palavras-chave mais utilizadas nas publicações analisadas na Web of Science



Fonte: Autores (2024).

Assim como também mostram Marques e Conceição (2022), observa-se um equilíbrio com relação às pesquisas que estão sendo desenvolvidas. O trabalho desenvolvido por Marques e Conceição (2022) mostra a expressão “*photocatalysis*” como sendo a quarta palavra mais pesquisada quando o assunto é tratamento de efluentes, registrando 20 aparições naquela pesquisa. Além dessa expressão, ainda são vistos outros termos relevantes, como “*oxidative process*”, entre outros.

Ainda com a ajuda do software VOSviewer, foi possível analisar a linha do tempo no desenvolvimento das pesquisas com relação às palavras-chave, como é visto na Figura 4.

**Figura 4 – Linha do Tempo palavras chaves**

Fonte: Autores (2024).

Nessa verificação, foi possível observar o aumento no número de pesquisas a partir de meados do ano de 2022, principalmente sobre a expressão “*photocatalytic degradation*” correlacionada com as expressões “*removal*”, “*reduction*” e “*nanoparticle*”. Tal aumento do interesse sobre o tema possivelmente se deve a demandas da indústria têxtil e à crescente preocupação com as questões ambientais.

### Análise Sistemática

Após a leitura dos artigos selecionados, foi possível elaborar dois quadros, um para cada base de dados pesquisada. Os quadros 1 e 2 contêm as informações resumidas de cada artigo, suas principais conclusões e a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa.

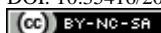
**Quadro 1 – Artigos pesquisados na plataforma Scopus**

REFERÉNCIAS	METODOLOGIA	RESULTADOS
Lima <i>et al.</i> , 2023	Neste trabalho, foi utilizado um fotorreator estruturado do tipo monolítico com latão calcinado de alta área superficial como substrato para TiO <sub>2</sub> -P25. A imobilização do TiO <sub>2</sub> sobre os monólitos foi realizada pelo processo <i>washcoating</i> . Os filmes foram caracterizados por DRX e refletância difusa.	Os testes preliminares de temperatura de calcinação do latão mostraram a formação de semicondutores ZnO e CuO na superfície do latão, sugerindo que os monólitos podem atuar como fotocatalisadores. Além disso, o latão calcinado a 500 °C apresentou maior formação de ambos os óxidos (ZnO e CuO) e maior eficiência fotocatalítica. O monólito TiO <sub>2</sub> /latão apresentou mais de 59% de degradação para uma concentração inicial de corante de 12,5 mg·L <sup>-1</sup> .

Mousavi <i>et al.</i> , 2022	Nesse estudo, um photocatalisador heterogêneo de nanocompósito de carbono magnético derivado de Fe-MOFs com grupos funcionais de superfície de ácido carboxílico ( $\text{Fe}@\text{C-COOH}$ ) foi alcançado. Em seguida, o $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{C@SiO}_2/\text{TiO}_2$ foi sintetizado com sucesso, para revestir a superfície das partículas intermediárias de $\text{TiO}_2$ . Além disso, foi conduzida a investigação do desempenho do nanocompósito photocatalítico magnético $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{C@SiO}_2/\text{TiO}_2$ na degradação do corante e na atividade photocatalítica no amarelo reativo 145 (RY145).	A caracterização estrutural dos materiais sintetizados comprovou que esses métodos geram grupos funcionais contendo oxigênio, como $-\text{OH}$ , $-\text{C}[\text{dbnd}]O$ e $-\text{COOH}$ , o que aumenta a polaridade e hidrofilicidade do photocatalisador. A oxidação photocatalítica do corante RY145 sob luz UVC foi discutida pela aparente taxa de reação de primeira ordem, e o modelo cinético de Langmuir-Hinshelwood seguiu um melhor ajuste. O desempenho ideal do compósito é em pH = 2, 15 mg/100 mL de dose de photocatalisador, concentração de 150 mg/L do corante RY145 a 25 °C de temperatura sob irradiação de lâmpada UVC por 90 min, e a taxa de reação aparente foi de $0,0165 \text{ min}^{-1}$ .
Sudhagar <i>et al.</i> , 2022	O método hidrotérmico foi utilizado para fazer a fase anatase de nanopartículas de $\text{TiO}_2$ , compostos $\text{TiO}_2/\text{La}_2\text{O}_3$ e $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Os estudos photocatalíticos foram analisados comparativamente através da degradação dos corantes têxteis azul de metileno (MB) e violeta cristal (CV).	O processo de degradação foi realizado tanto com luz UV quanto com irradiação de luz visível. A eficiência alcançada por $\text{TiO}_2$ , $\text{TiO}_2/\text{La}_2\text{O}_3$ e $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ foi de 87, 95, 45% e 80, 92, 29%, respectivamente, para corante MB e CV sob luz UV, enquanto sob luz visível foi de 34, 27, 84% e 29, 24, 81%, respectivamente, para corante MB e CV.
Assis <i>et al.</i> , 2021	A descoloração photocatalítica de corantes industriais, Azul Novacron (NB) e Amarelo Novacron (NY), foi investigada utilizando compostos à base de $\text{TiO}_2$ e paligorsquita natural (Pal-Ti10 e Pal-Ti30). As concentrações investigadas foram 10 ppm e 30 ppm; os compostos foram sintetizados utilizando 10 e 30% (p/p) de titânio sobre a paligorsquita; foram utilizados os dois valores de pH 2,0 e 6,0 e intensidades luminosas 9 e 18 W.	Testes realizados em pH 2,0, compósito Pal-Ti30, potência 18 W e 10 ppm de corante mostraram 100% de remoção de cor de ambos os corantes em 90 min. O processo de clareamento seguiu o modelo cinético de pseudo-primeira ordem, e as constantes aparentes ( $K_{app}$ ) foram $0,0216 \text{ min}^{-1}$ e $0,0193 \text{ min}^{-1}$ para os corantes NB e NY, respectivamente. Os resultados de carbono orgânico total (COT) mostraram mineralização de 61,70% e 58,06% para NB e NY, respectivamente, em 90 min de tratamento, e os subprodutos foram detectados por GC-MS.
Chandrabose <i>et al.</i> , 2021	Nesse estudo, foi analisada a remoção de poluentes corantes mistos (aniônicos e catiônicos) simultaneamente, combinando processos de adsorção e photocatálise. Foram sintetizados nanocompostos de $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ para diferentes porcentagens em peso de 2,5, 5, 10, 20, 30 e 50% de nanopartículas de $\text{MoS}_2$ semelhantes a flores, presintetizadas por um método hidrotérmico de duas etapas.	O processo integrado de adsorção e photocatálise proposto em dois estágios, usando 50% e 2,5% de $\text{TiO}_2$ revestido com $\text{MoS}_2$ , respectivamente, mostrou remoção completa do corante azul de metileno $\sim 5$ vezes mais rápido que o processo convencional de tratamento de água de estágio único (adsorção ou photocatálise). Além disso, foi comprovada a viabilidade do método de dois estágios proposto na remoção de poluentes de corantes mistos (aniônicos e catiônicos), que apresentou excelente desempenho mesmo na duplicação da concentração de corantes poluentes.
Imran <i>et al.</i> , 2021	A atividade photocatalítica do $\text{TiO}_2$ foi potencializada sob luz visível quando este foi co-dopado com Fe, Co e S através do método sol-gel. Os nanofotocatalisadores resultantes foram caracterizados por XRD, EDX acoplado com SEM, FT-IR, UV-Vis e UV-DRS. A proporção de	O corante foi degradado em cerca de 1,2 h, com degradação percentual de 99,3%. A fase anatase do $\text{TiO}_2$ foi confirmada por análise de DRX, enquanto a energia bandgap do $\text{TiO}_2$ puro foi reduzida após a adição de Fe, Co e S, de 3,2 eV para 1,6 eV. Além disso, devido às extraordinárias características photocatalíticas e ópticas, o material pode ser explorado de forma eficiente para tratamento de água sob

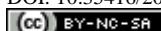


	concentração dos sais precursores de Fe e S foi mantida em 1% cada, e de Co variou entre 0,5% e 1,5%.	irradiação solar, o que poderia garantir uma solução mais econômica para o tratamento de águas residuais.
Poolwong <i>et al.</i> , 2021	Estruturas mesoporosas hierárquicas tridimensionais de dióxido de titânio (3D-HPT) foram sintetizadas por polimerização em emulsão automontada. Polimetilmetacrilato (PMMA) e pluronic 123 (P123) foram utilizados como modelos suaves e co-modelos para auxiliar a formação de estruturas porosas 3D hierárquicas. A estrutura cristalina do TiO <sub>2</sub> , a morfologia e a degradação do corante vermelho Remazol foram investigadas.	A estrutura 3D-HPT mostrou uma adsorção bastante melhorada do corante Remazol e facilitou a quebra photocatalítica eficiente do corante. Surpreendentemente, o 3D-HPT pode adsorver aproximadamente 40% do corante Remazol 24 ppm no escuro, o que é superior ao 3D-T e ao anatase comercial na mesma condição (aproximadamente 5%). Além disso, o 3D-HPT pode descolorir completamente o corante Remazol em apenas 20 minutos, o que é três vezes mais rápido que o anatase comercial, tornando-o um dos photocatalisadores mais ativos relatados para degradação do corante Remazol.
Elbadawy <i>et al.</i> , 2021	Este trabalho tem como objetivo estudar a degradação photocatalítica do poluente corante têxtil Acid Red 37, sob irradiação UV no fotorreator batelada em escala de bancada, projetando um sistema ótimo de óxidos nanometálicos TiO <sub>2</sub> , ZnO e suas misturas com diferentes proporções em peso. Os photocatalisadores foram sintetizados e totalmente caracterizados por DRX, EDS e TEM.	A melhor fotodegradação foi observada sob irradiação UV ao adicionar uma proporção de (3:1) (TiO <sub>2</sub> :ZnO) em pH = 6,5 quando a concentração do corante têxtil é $1,0 \times 10^{-4}$ mol/L. A eficiência dos sistemas de degradação photocatalítica estudados pode ser organizada na ordem: UV/ZnO < UV/TiO <sub>2</sub> < UV/TiO <sub>2</sub> /ZnO < UV/TiO <sub>2</sub> /ZnO/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> < UV/TiO <sub>2</sub> /ZnO/Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> < UV/TiO <sub>2</sub> /ZnO/NaIO <sub>4</sub> . O sistema designado como UV/TiO <sub>2</sub> /ZnO/(1,1–5,5) $\times 10^{-3}$ MnAlO <sub>4</sub> apresentou a maior eficiência de degradação photocatalítica, com maior rendimento quântico aparente (11,1–16,6)% e menor energia elétrica por pedido (37,0–22,2 kWh), indicando o menor consumo de energia em relação aos demais sistemas catalíticos examinados.
Niazi <i>et al.</i> , 2021	Neste trabalho, foram preparados dois photocatalisadores responsivos à luz solar, incluindo nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (NPs) e nanocompósitos de pontos quânticos de TiO <sub>2</sub> /grafeno (GQDs) para degradar um corante têxtil, Reactive Black 5 (RB5).	Os resultados mostraram que 100% de 50 ppm de RB5 poderiam ser degradados por NPs de TiO <sub>2</sub> e TiO <sub>2</sub> /GQDs em 60 e 30 min de irradiação solar, respectivamente. Assim, uma atividade photocatalítica muito melhor na degradação de RB5 foi alcançada por TiO <sub>2</sub> /GQDs sob irradiação solar em comparação com NPs de TiO <sub>2</sub> puros, devido ao seu menor gap (2,13 eV) e taxa de recombinação elétron/buraco.
Alahiane <i>et al.</i> , 2020	Esta pesquisa analisou a aplicação de fibras não tecidas revestidas com TiO <sub>2</sub> produzidas industrialmente para adsorção acoplada à degradação photocatalítica do corante têxtil sintético Direct Red 80.	O catalisador de TiO <sub>2</sub> testado, que exibiu capacidades de adsorção significativas devido à sua elevada área superficial específica, provou ser um photocatalisador eficaz para a fotodegradação do corante estudado. O efeito dos íons inorgânicos (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaCl, NaNO <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> COONa, NaHCO <sub>3</sub> e Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ) também foi estudado. Uma reação cinética de pseudo-primeira ordem foi ilustrada usando o modelo de Langmuir-Hinshelwood, e a constante de velocidade e a constante de equilíbrio de adsorção foram calculadas ( $k = 1,1873$ mg/L·min e $K_{LH} = 0,0660$ L/mg, respectivamente). A maior eficiência de fotodegradação foi obtida em pH = 3. A presença dos íons HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> diminuiu a taxa de fotodegradação, porém, Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> aumentaram a taxa de reação.
Mpelane <i>et al.</i> , 2020	Neste estudo, um novo nanocompósito de cinza volante de dióxido de titânio-carvão suportado por membrana de poli(acrilonitrila)	A carga ideal do photocatalisador C-TiO <sub>2</sub> -CFA na membrana PAN foi de 2% p/p e alcançou eficiências de degradação de 99,86% e 99,20% para os corantes MO e GY, respectivamente, em pH 3,5, usando uma



	dopado com carbono ( $\text{C-TiO}_2\text{-CFA/PAN}$ ) foi preparado e avaliado na remoção de corantes têxteis (laranja de metila (MO) e amarelo dourado (GY)) na água.	concentração de corante de 10 ppm, sob irradiação solar, em 300 min. A nova membrana fotocatalítica 2% $\text{C-TiO}_2\text{-CFA/PAN}$ mostrou-se muito eficaz na remoção de corantes têxteis da água. Foram realizados três ciclos de reutilização e não foram observadas alterações significativas nas eficiências fotocatalíticas.
Kumaran <i>et al.</i> , 2020	Este trabalho concentra-se na síntese de óxido de grafeno (GO) utilizando o método de Hummer modificado. O nanocompósito preparado foi utilizado como catalisador em fotocatálise para tratar águas residuais afetadas por corantes.	O nanocompósito sintetizado foi empregado como catalisador para remover o corante orgânico Orange ME2RL de águas residuais sintéticas por fotocatálise, e também os parâmetros pH, tempo de contato, concentração de corante e dosagem de catalisador foram variados. Constatou-se que a maior remoção de cor, para concentração de corante de 60 mg/L, foi obtida na dosagem de catalisador de 25 mg, com tempo de contato de 24 minutos e valor de pH 6. A estabilidade e a reutilização do catalisador foram estudadas. A eficiência de remoção de cor do catalisador foi encontrada em 99,6%, 99,2%, 98,8%, 98,3% e 98% para o 1º, 2º, 3º, 4º e 5º ciclos de reutilização do catalisador. Esses estudos concluem que o catalisador pode ser usado para aplicações posteriores.
Ribeiro <i>et al.</i> , 2020	Neste estudo, filmes de $\text{TiO}_2$ suportados em tereftalato de polietileno ( $\text{TiO}_2\text{/PET}$ ) em folhas e formatos monolíticos foram preparados a partir de garrafas PET reutilizadas. O método de preparação baseou-se no <i>washcoating</i> de uma suspensão de $\text{TiO}_2$ com diferentes formulações (aditivos e fotocatalisador carregado), visando à aderência adequada.	As folhas e monólitos de $\text{TiO}_2\text{/PET}$ apresentaram cobertura homogênea e boa estabilidade após cinco ciclos de uso. O monólito $\text{TiO}_2\text{/PET}$ apresentou degradação aproximadamente 30% e 75% para as concentrações iniciais do corante de 25 e 15 mgL <sup>-1</sup> , respectivamente. Os sistemas imobilizados do tipo monólito mostraram-se uma tecnologia promissora devido ao seu baixo custo e ao baixo uso de reagentes e catalisadores. Além disso, esse tipo de sistema é mais promissor para processos contínuos.
Hussein <i>et al.</i> , 2019	Neste estudo, foram avaliadas as atividades fotocatalíticas do $\text{TiO}_2$ grau reagente analítico (AR) para identificar um fotocatalisador de baixo custo para degradação do corante. Foram observadas diferentes condições na presença de suspensão de $\text{TiO}_2$ . O efeito de vários parâmetros, como massa de dióxido de titânio e concentração do corante violeta de metila (MVT), na degradação fotocatalítica foi investigado.	Os resultados obtidos mostram que o MVT pode ser facilmente degradado por um processo assistido por $\text{TiO}_2$ em dispersões aquosas sob irradiação UVT. A degradação fotocatalítica do corante segue a cinética de primeira ordem, e parâmetros como a dosagem de massa de $\text{TiO}_2$ e a concentração do corante influenciaram a degradação. Os resultados indicaram que a carga do catalisador e a concentração inicial do corante afetaram a eficiência da degradação dos pós de $\text{TiO}_2$ .
Mounteer <i>et al.</i> , 2019	Quatro corantes reativos e três corantes de cuba foram misturados em diferentes combinações e tratados (10 mg/L de cada corante, 0,5 mg/L $\text{TiO}_2$ , pH 4) para avaliar a influência dos diferentes corantes na cor ADMI, na demanda química de oxigênio (DQO) e na toxicidade aguda.	O sistema $\text{TiO}_2\text{/UV}$ foi capaz de reduzir a cor ADMI nas misturas em 74–85%, mas em apenas 28% no efluente bruto da fábrica têxtil. As reduções de DQO foram muito menores, devido aos baixos valores de DQO das misturas (< 100 mg/L) e à recalcitrância dos componentes do efluente bruto. Embora a toxicidade tenha sido reduzida, o efluente da fábrica têxtil permaneceu gravemente tóxico após a fotocatálise, o que era esperado, dada a baixa remoção de DQO alcançada.

Fonte: Autores (2024).

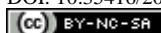


**Quadro 2 – Artigos pesquisados plataforma Web of Science**

<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>RESULTADOS</b>
Le <i>et al.</i> , 2023	Membranas de fibra oca photocatalítica de PVDF foram preparadas por revestimento com polidopamina (PDA) por 1–4 h, e depois com nanopartículas de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ).	Os resultados mostraram que o $\text{TiO}_2$ aderiu firmemente à membrana pré-tratada com PDA após tratamento ultrassônico. A camada de PDA protegeu as membranas da irradiação UV. A membrana de PVDF- $\text{TiO}_2$ sem pré-tratamento com PDA foi destruída após 24 horas de irradiação UV, enquanto, após 9 dias de irradiação contínua, as membranas tratadas com PDA por 2 horas permaneceram inalteradas. Em comparação com a membrana original, a aplicação de membranas de PVDF revestidas com PDA por 2 horas e $\text{TiO}_2$ por 1 hora aumentou a rejeição do Reactive Red 239 e as taxas de recuperação de fluxo em 13% e 40%, respectivamente, alcançando 60% de remoção de DQO. O fluxo de permeado e a taxa de rejeição de corante permaneceram estáveis após 5 ciclos (20 h de operação).
Helmy <i>et al.</i> , 2023	Este estudo concentrou-se no uso da metodologia de superfície de resposta (RSM) para avaliar sua capacidade de previsão e otimização na implantação de POAs na remoção de poluentes obstinados de águas residuais industriais.	Os resultados mostraram que a porcentagem de remoção do corante foi afetada principalmente pelas variáveis testadas, bem como por seus efeitos sinérgicos, que foram observados de acordo com os resultados experimentais. A análise de desempenho dos modelos RSM desenvolvidos mostrou um alto coeficiente de determinação (valor significativamente superior a $R^2 = 0,99$ ), garantindo, assim, equações de predição satisfatórias dos modelos de regressão de segunda ordem. Os resultados observados mostraram que, para concentração de corante de 50 ppm, $\text{H}_2\text{O}_2$ 0,9 ml, pH 3,4, $\text{TiO}_2$ 0,6 g e tempo de irradiação UV 60 min, foi observada a quebra máxima de 92%. A degradação do corante RR-147 é testada para ser realizada de forma mais eficaz pelo sistema UV/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{TiO}_2$ .
Keerthana <i>et al.</i> , 2022	Foi sintetizado um nanocompósito GO- $\text{TiO}_2$ usando o método solvotérmico a partir de nanopartículas de óxido de grafeno (GO) e nanopartículas de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), que foram sintetizadas individualmente usando o método de Hummer modificado e o método sol-gel.	O nanocompósito sintetizado reduziu efetivamente todos os corantes utilizados neste estudo em comparação com o photocatalisador padrão $\text{TiO}_2$ . A biocompatibilidade desse GO- $\text{TiO}_2$ foi estudada usando embriões de peixe-zebra, e os resultados demonstraram que o nanocompósito GO- $\text{TiO}_2$ era seguro para os embriões, sem causar qualquer atraso na eclosão ou anormalidade no desenvolvimento.
Das <i>et al.</i> , 2022	Aqui, o conjugado de óxido de nanografeno (GO) e nanopartícula de dióxido de titânio ( $n\text{TiO}_2$ ) foi proposto para a degradação photocatalítica de dois corantes azo tóxicos, vermelho Congo (CR) e azul de metileno (MB), sob irradiação solar.	Os nanoconjungados demonstraram excelente potencial de degradação para o vermelho Congo (CR) e o azul de metileno (MB) sob a luz solar. Dentre todos os photocatalisadores sintetizados com quantidade variável de GO e $n\text{TiO}_2$ , alguns demonstraram a maior eficiência de degradação. Em pH 7,0, observou-se a degradação de 95% de CR (40 ppm) e MB (20 ppm) em menos de 80 min. Quando os nanoconjungados foram reciclados por 5 vezes, sua potência de degradação foi mantida em 85% após o 3º ciclo, mas a eficácia da degradação caiu nos dois últimos ciclos (para 75% após o 5º ciclo).
Sultana <i>et al.</i> , 2021	Uma série de nanohíbridos bifuncionais contendo diferentes	Nanohíbrido fabricado com 80% $\text{TiO}_2$ (p/p) e 20% de quitosana (p/p) denominado como $\text{T}_{0.80}\text{CS}_{0.20}$



	proporções de quitosana e dióxido de titânio ( $TiO_2$ ) foi preparada através da técnica de precipitação e aplicada para remoção de um corante azo aniônico modelo, Remazol Orange 3R (RO), de solução aquosa.	removeu 98,8% de RO em apenas 8 min em pH 2,0 sob irradiação solar, na solução com 60 mg L <sup>-1</sup> de corante. Isto deveu-se principalmente ao papel simultâneo das atividades de adsorção e fotodegradação dos nanohíbridos. O desempenho de adsorção de $T_{0,80}CS_{0,20}$ foi investigado em termos da isoterma de Langmuir no escuro e a capacidade máxima de adsorção de $T_{0,80}CS_{0,20}$ para RO foi encontrada como sendo 243,9 mg g <sup>-1</sup> .
Chandan <i>et al.</i> , 2021	Este estudo investiga a adsorção combinada e a fotocatálise na degradação do corante têxtil utilizando nanocompósito polímero microporoso carregando nanopartículas $TiO_2$ de diferentes pesos (0,1-0,5 g) em espuma de poliuretano (PU). A degradação do corante azul de metileno (MB) de um modelo aquoso poluente foi realizada utilizando nanopartículas $TiO_2$ puras, espuma de PU descarregada e espuma de PU $TiO_2$ -carregada por exposição sob irradiações UV e solar.	Viu-se que a degradação (devido às nanopartículas de $TiO_2$ ) e a adsorção (devido à espuma de PU) ocorreram simultaneamente após a irradiação sob fonte solar e UV. Esse mecanismo foi confirmado por análise e comparação dos resultados de degradação do corante MB para nanopartículas $TiO_2$ puras (85% de corante degradado em 40 min), espuma de PU descarregada (40% de degradação em 40 min) e $TiO_2$ — espuma de PU carregada (95% de degradação em 20 min). Os dados experimentais mostram cinética pseudo-primeira-ordem para irradiação UV (constante de taxa de 0,016 h <sup>-1</sup> ), enquanto a irradiação solar segue a cinética de primeira ordem com constante de taxa de 0,265 h <sup>-1</sup> .
De Luca <i>et al.</i> , 2019	Foram preparados sistemas para a degradação do corante azo preto reativo 5, alguns contendo apenas óxido de titânio e outros contendo óxido de titânio e peróxido de hidrogênio.	A partir das análises, fica claro que o corante azo preto reativo 5, na ausência de agentes photocatalíticos, é bastante fotoestável; de fato, após trinta minutos de radiação UV, uma redução de apenas 8,9% foi registrada. Mesmo na presença de apenas peróxido de hidrogênio, o corante não alterou muito sua fotostabilidade, que foi de cerca de 11,2% após trinta minutos de radiação UV. Em vez disso, o óxido de titânio desempenha papel fundamental na fotodegradação induzida por UV do corante azo preto reativo 5, e a atividade photocatalítica do dióxido de titânio pode ser melhorada pelo uso simultâneo de peróxido de hidrogênio. O uso de apenas peróxido de hidrogênio não é suficiente para a fotodegradação completa do corante, embora a presença de peróxido tenha melhorado a fotoatividade do dióxido de titânio.
Pereira <i>et al.</i> , 2019	Um photocatalisador magnético contendo $TiO_2$ suportado na superfície composta (C/Fe) foi preparado a partir de lama vermelha, alcatrão e $TiO_2$ (aqui identificado como $TiO_2/C/Fe$ ). A condição mais bem observada (240 mg $TiO_2$ , pH 10, OD 7,6 mg L <sup>-1</sup> , I 1,20 mWcm <sup>-2</sup> e A 143 cm <sup>2</sup> ), a fim de degradar a matéria orgânica tanto em águas residuais têxteis reais quanto em uma solução sintética de 40 mg L <sup>-1</sup> RB utilizando $TiO_2/C/Fe$ .	O photocatalisador magnético mostrou que a constante de taxa de reação aumentou sete vezes quando as melhores condições foram utilizadas para a descoloração do RB. Nos ensaios com efluentes têxteis, $TiO_2$ e $TiO_2/C/Fe$ apresentaram 99% e 46% de descoloração, respectivamente. Além disso, houve redução da demanda química de oxigênio, sólidos solúveis e turbidez, que foi mais eficiente que os tratamentos industriais físico-químicos comuns. Assim, $TiO_2/C/Fe$ foi fotoativo e apresentou propriedades magnéticas.
Santana <i>et al.</i> , 2019	O photocatalisador magnético mostrou que a constante de taxa de reação aumentou sete vezes quando as melhores condições foram	O sistema UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / $TiO_2$ apresentou maior eficiência, com 99% de degradação do corante em 50 minutos, seguido do sistema UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / $TiO_{2sp}$ com 93% de degradação do corante. Considerando

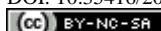


	utilizadas para a descoloração do RB. Nos ensaios com efluentes têxteis, TiO <sub>2</sub> e TiO <sub>2</sub> /C/Fe apresentaram 99 e 46% de descoloração, respectivamente. Além disso, houve redução da demanda química de oxigênio, sólidos solúveis e turbidez, que foi mais eficiente do que os tratamentos industriais físico-químicos comuns. Assim, TiO <sub>2</sub> /C/Fe foi fotoativo e apresentou propriedades magnéticas.	que o catalisador suportado apresenta vantagens de execução e altas taxas de degradação, o planejamento fatorial foi realizado para esse sistema, obtendo melhor degradação (100% em 35 minutos). O uso de rede neural artificial mostrou-se eficiente para prever a degradação de um corante têxtil, com erro absoluto de 0,0181. Após o tratamento, houve diminuição da toxicidade do corante.
Basturk <i>et al.</i> , 2019	No presente estudo, um nano TiO <sub>2</sub> foi utilizado como catalisador para a descoloração fotocatalítica dos corantes Azul de Metileno (MB) e Vermelho Reativo 198 (RR198) na fase aquosa. As remoções de cor foram de 95% e 66% para RR198 e MB, respectivamente.	A remoção fotocatalítica eficiente dos corantes selecionados diminuiu com o aumento da concentração inicial do corante e aumentou com a dosagem do catalisador, bem como com a intensidade da irradiação. O efeito do pH variou de acordo com o tipo de corante, como aniônico ou catiônico. Os dados cinéticos revelaram que a descoloração seguiu o modelo de Langmuir-Hinshelwood. Os parâmetros termodinâmicos mostraram que o processo era viável e exotérmico. O uso de métodos fotocatalíticos foi uma escolha viável para a remoção de anilina e corantes azo.
Suhadolnik <i>et al.</i> , 2019	A degradação do corante Reactive Red 106 foi estudada sob operação fotoeletrocatalítica. Os produtos químicos produzidos à base de água foram determinados com cromatografia líquida de ultra-alta eficiência (UHPLC), acoplada a detectores de espectroscopia ultravioleta-visível (UV-vis) ou de massa (MS).	A solução foi descolorida com sucesso (100%) sob operação microfluídica projetada ou dentro do volume fechado de um bêquer. No entanto, a taxa dentro deste último foi mais rápida, enquanto diferentes espécies intermediárias foram formadas na célula eletroquímica anódica ou catódica. A conversão máxima alcançada no lado do ânodo foi de 80% da concentração inicial do corante, enquanto 63% do corante foi degradado no lado do cátodo. Finalmente, uma configuração de entrada ampliada foi projetada para tratar maiores capacidades de matéria-prima.

Fonte: Autores (2024).

Os quadros 1 e 2 apresentaram os trabalhos que foram selecionados seguindo a metodologia PRISMA, já citada. Foram escolhidos os trabalhos que estavam de acordo com a proposta para a elaboração do trabalho, que seria o uso da fotocatálise heterogênea com o dióxido de titânio como catalisador.

Diante dos artigos analisados, entende-se que as pesquisas avançam cada dia mais sobre o tema que está sendo investigado. A pesquisa mostrou que os estudos mais recentes apostam principalmente na junção de dois ou mais elementos para a obtenção de um catalisador eficiente, como foi o caso do estudo realizado sobre a junção de TiO<sub>2</sub> – Dióxido de Titânio e C<sub>6</sub>H<sub>11</sub>NO<sub>4</sub> – Quitosana, que aqui foi utilizada no tratamento de um efluente modelo. No entanto, os resultados foram mais que satisfatórios para aquilo a que ele foi planejado.

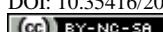


Também se identificou que muitos estudos estão sendo feitos com a adição de outros elementos que podem potencializar o tratamento, como no caso da adição de peróxido de hidrogênio — H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e a dopagem do TiO<sub>2</sub> com enxofre — S, com o intuito de atingir resultados ainda mais satisfatórios do que aqueles já encontrados com o uso apenas do catalisador, sem a adição de nenhum outro item.

Durante a pesquisa, identificou-se a diversidade de aplicações que são feitas da fotocatálise, bem como o potencial de utilização do dióxido de titânio. Lima *et al.* (2023) conseguiram comprovar o poder fotocatalítico do TiO<sub>2</sub>, observando uma degradação de corante 59% maior para o corante com uma concentração inicial de 12,5 mg L<sup>-1</sup>, quando comparado com outros elementos que foram utilizados como catalisadores, como o ZnO e o CuO. Já Sudhagar *et al.* (2022) utilizou o método hidrotérmico para fazer a fase anatase de nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, compósitos TiO<sub>2</sub>/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. O processo de degradação foi realizado tanto com luz UV quanto com irradiação de luz visível. A eficiência alcançada por TiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi de 87, 95, 45% e 80, 92, 29%, respectivamente, para os corante MB e CV sob luz UV, enquanto sob luz visível é de 34, 27, 84% e 29, 24, 81%, respectivamente, para os corantes Azul de Metíleno e Violeta Cristal.

Imran *et al.* (2021) utilizou o dióxido de titânio co-dopado com Fe, Co e S através do método sol-gel para estudo em efluente modelo. O corante utilizado para a criação desse efluente foi degradado em cerca de 1,2 h, com degradação percentual de 99,3. A fase anatase do TiO<sub>2</sub> foi confirmada por análise de DRX, enquanto a energia bandgap do TiO<sub>2</sub> puro foi reduzida após a adição de Fe, Co e S, de 3,2 eV para 1,6 eV. Já Elbadawy *et al.* (2021) utilizou o composto dopado com ZnO e suas misturas com diferentes proporções de peso para estudar a degradação fotocatalítica do poluente corante têxtil Acid Red 37 sob irradiação UV, no fotorreator batelada em escala de bancada, projetando um sistema ótimo de óxidos nanometálicos.

Elbadawy *et al.*, (2021) encontraram que a melhor fotodegradação foi observada sob irradiação UV ao adicionar uma proporção de (3:1) (TiO<sub>2</sub>:ZnO) em pH = 6,5 quando a concentração do corante têxtil é  $1,0 \times 10^{-4}$  mol/L. A eficiência dos sistemas de degradação fotocatalítica estudados pode ser organizada na ordem: UV/ZnO < UV/TiO<sub>2</sub> < UV/TiO<sub>2</sub>/ZnO < UV/TiO<sub>2</sub>/ZnO/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> < UV/TiO<sub>2</sub>/ZnO/Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> < UV/TiO<sub>2</sub>/ZnO/NaIO<sub>4</sub>. O sistema designado como UV/TiO<sub>2</sub>/ZnO/(1,1–5,5)  $\times 10^{-3}$  M NaIO<sub>4</sub> apresentou a maior eficiência de degradação fotocatalítica, com maior rendimento quântico aparente (11,1–16,6)% e menor energia elétrica



por pedido (37,0–22,2) kWh, indicando o menor consumo de energia em relação aos demais sistemas catalíticos examinados.

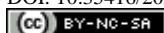
Nos trabalhos lidos, viu-se que um dos fatores que mais influenciam na aplicação da fotocatálise com o dióxido de titânio é o pH, seja utilizando apenas o composto, seja em conjunto com outros elementos, como foi o caso de Mousavi *et al.*, (2022) que utilizou o dióxido de titânio com um nanocompósito de carbono magnético derivado de Fe-MOFs com grupos funcionais de superfície de ácido carboxílico ( $\text{Fe}@\text{C}-\text{COOH}$ ) e encontrou o desempenho ideal do compósito é em  $\text{pH} = 2$ , 15 mg/100 mL de dose de photocatalisador, concentração de 150 mg/L do corante RY145.

Já Assis *et al.* (2021), que utilizaram os pHs 2,0 e 6,0 para a descoloração photocatalítica de corantes industriais Azul Novacron (NB) e Amarelo Novacron (NY), empregando compósitos à base de  $\text{TiO}_2$  e paligorsquita natural (Pal-Ti10 e Pal-Ti30), mostraram que testes realizados em pH 2,0, com o compósito Pal-Ti30, potência de 18 W e 10 ppm de corante resultaram em 100% de remoção da cor de ambos os corantes em 90 min. Além desse resultado, foi também constatada, pelo teste do COT, a mineralização de 61,70% e 58,06% para NB e NY, respectivamente, nos 90 min de tratamento. Esse tempo de 90 minutos também foi utilizado por Mousavi *et al.* (2022), que igualmente encontraram resultados satisfatórios.

Observa-se uma variação muito grande do pH no material analisado. No estudo dos artigos foram identificados experimentos como o de Assis *et al.* (2021), que utilizaram pH igual a 2,0; Mpelane *et al.* (2020), que testaram pH em 3,5; e Elbadawy (2021), que utilizou pH igual a 6,5, mostrando a flexibilidade da fotocatálise, que pode ser aplicada tanto no tratamento de efluentes mais neutros quanto naqueles mais ácidos.

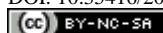
## **Considerações finais**

A partir da análise dos 26 artigos que foram selecionados das duas bases de dados, pode-se ver o avanço das pesquisas em busca de soluções inteligentes e sustentáveis para a degradação dos componentes dos diversos tipos de efluentes existentes. Catalisadores menos agressivos ao meio ambiente e com possibilidade de reuso, sistemas econômicos e capazes de reutilização do efluente tratado. Viu-se também que pesquisas buscam uma interação entre processos químicos e processos biológicos, sendo feitas análises de como seriam os resultados com um pós-tratamento do efluente já tratado, obtendo-se resultados interessantes para o descarte do efluente no meio ambiente.



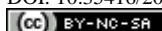
As diversas aplicações da fotocatálise heterogênea com o dióxido de titânio mostram a versatilidade desse procedimento, indo do tratamento de efluentes líquidos até gasosos. São vistos tratamentos utilizando a fotocatálise que vão desde o tratamento de esgotos domésticos até a purificação de gás liberado no processamento industrial de uma empresa, mostrando que outras pesquisas e outros testes merecem e devem ser propostos utilizando a fotocatálise heterogênea.

Os mapas gerados por meio do *software* Vosviewer apresentaram a grande diversidade de pesquisadores mundo afora que se debruçam em busca de soluções para a preservação da natureza e o bem-estar do meio ambiente. Mostraram também países que desempenham hoje um papel muito significativo nesse cuidado e na preocupação de como postergar a saúde da Terra e a boa relação entre homem e natureza, sem que o meio racional interfira no meio irracional, de modo que exista uma harmonia proveitosa, sem prejuízos e danos para ambos.



## REFERÊNCIAS

- ALAHIANE, S.; SENNAOUI, A.; SAKR, F.; DINNE, M.; QOURZAL, S.; ASSABBANE, A. Synchronous role of coupled adsorption-photocatalytic degradation of Direct Red 80 with nanocrystalline TiO<sub>2</sub>-coated non-woven fibres materials in a static batch photoreactor. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, 2020. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100396.
- ASSIS, L. M.; DAMASCENO JUNIOR, E. M.; ALMEIDA, J. M. F.; SILVA, I. N.; BARBOSA, R. V.; SANTOS, L. M.; DIAS, E. F.; FERNANDES, N. S.; MARTINEZ-HUITLE, C. A. Photocatalytic degradation of Novacron blue and Novacron yellow textile dyes by the TiO<sub>2</sub>/palygorskite nanocomposite. **Environmental Science and Pollution Research**, 2021. DOI: 10.1007/s11356-021-15519-5.
- BASTURK, E.; İŞIK, M.; KARATAS, M. Removal of aniline (Methylene blue) and azo (reactive red 198) dyes by photocatalysis via nano TiO<sub>2</sub>. **Desalination and Water Treatment**, v. 143, p. 306–313, 2019. DOI: 10.5004/dwt.2019.23522
- CHANDAN, M. R.; GOYAL, S.; RIZWAN, M.; HUSSAIN SHAIK, A. Removal of textile dye from synthetic wastewater using microporous polymer nanocomposite. **Bulletin of Materials Science**, 2021. DOI: 10.1007/s12034-021-02559-3S
- CHANDRABOSE, G.; DEY, A.; GAUR, S. S.; PITCHAIMUTHU, S.; JAGADEESAN, H.; BRAITHWAITE, N. S. J.; SELVARAJ, V.; KUMAR, V.; KRISHNAMURTHY, S. Removal and degradation of mixed dye pollutants by integrated adsorption-photocatalysis technique using 2-D MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanocomposite. **Chemosphere**, v. 279, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130467
- DAS, S.; SINGH, V.; PAUL, S. Surface conjugation of titanium dioxide nanoparticles on nano-graphene oxide enhances photocatalytic degradation of azo dyes under sunlight. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 26, p. 40226–40240, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-18796-w
- DE LUCA, P.; FOGLIA, P.; SICILIANO, C.; NAGY, J. B.; MACARIO, A. Water contaminated by industrial textile dye: study on decolorization process. **Environments - MDPI**, v. 6, n. 9, 2019. DOI: 10.3390/environments6090101
- DÓRIA, A. R.; GONZAGA, I. M. D.; PUPO, M. M. S.; BANDA, G. R. S.; EGUILUZ, K. I. B. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicações no tratamento de efluentes industriais. In: CONECTE – XI Congresso de Engenharia, Ciência e Tecnologia, 2018. **Anais** [...]. [S. l.], 2018.
- ELBADAWY, H. A.; SADIK, W. A.; ELHUSSEINY, A. F.; HUSSEIN, S. M. Design of economic photocatalytic system with low energy consumption, and high quantum yield, for the degradation of acid red 37 textile dye. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 148, p. 1191–1206, 2021. DOI: 10.1016/j.psep.2021.02.036
- HELMY, M.; HEGAZY, M.; MOHAMED, A.; HASSAN, K. Predicting the degradation of reactive red-147 dye in textile wastewater using response surface methodology technique. **Applied Water Science**, v. 13, n. 1, 2023. DOI: 10.1007/s13201-022-01826-w



HUSSEIN, F. H.; AJOBREE, A. M.; MUSA, Z. O.; ABDULRAZZAK, F. H.; ALQARAGOLY, M. B.; ALKAIM, A. F. Is it photocatalytic degradation of textile dyes a friendly method? Methyl violet dye as a model for application in aqueous solutions in the presence of commercial TiO<sub>2</sub>. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, v. 8, n. 2, Special Issue 3, p. 1455–1457, 2019. DOI: 10.35940/ijrte.B1268.0782S319

IMRAN, M.; SAEED, Z.; PERVAIZ, M.; MEHMOOD, K.; EJAZ, R.; YOUNAS, U.; NADEEM, H. A.; HUSSAIN, S. Enhanced visible light photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> co-doped with Fe, Co, and S for degradation of Cango red. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 255, 2021. DOI: 10.1016/j.saa.2021.119644

KEERTHANA, V.; GIRIGOSWAMI, A.; JOTHIKA, S.; KAVITHA, D.; GOPIKRISHNA, A.; SOMANATHAN, T.; GIRIGOSWAMI, K. Synthesis, characterization and applications of GO-TiO<sub>2</sub> nanocomposites in textile dye remediation. **Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science**, v. 46, n. 4, p. 1149–1161, 2022. DOI: 10.1007/s40995-022-01337-y

KUMARAN, V.; SUDHAGAR, P.; KONGA, A. K.; PONNIAH, G. Photocatalytic degradation of synthetic organic reactive dye wastewater using GO-TiO<sub>2</sub> nanocomposite. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 29, n. 2, p. 1683–1690, 2020. DOI: 10.15244/pjoes/109027

LE, T. M. H.; WANG, R.; SAIRIAM, S. Self-protecting PVDF-PDA-TiO<sub>2</sub> membranes towards highly efficient and prolonged dye wastewater treatment by photocatalytic membranes. **Journal of Membrane Science**, v. 683, 2023. DOI: 10.1016/j.memsci.2023.121789

LIMA, F. S.; MEDEIROS, A. R.; ROSENBERGER, A. G.; BALLMANN, E.; DRAGUNSKI, D. C.; MUNIZ, E. C.; CAETANO, J. Photodegradation of dyes using electrospun polymeric membranes containing titanium oxide and iron. **Materials Chemistry and Physics**, v. 309, 2023. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128278

MACEDO, J. S. **Avaliação do uso de água e geração de efluentes no processo de beneficiamento de jeans:** estudo de caso lavanderias industriais de Toritama/PE. 2022. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. The PRISMA Group – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **PLoS Med**, 2009.

MOUTEER, A. H.; ARCANJO, G. S.; COIMBRA, E. C. L.; DA SILVA, L. M. M. ADMI color and toxicity reductions in raw textile mill effluent and dye mixtures by TiO<sub>2</sub>/UV is limited by presence of vat dyes. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 5, p. 4260–4265, 2019. DOI: 10.1007/s11356-018-2814-4

MOUSAVI, S. E.; YOUNESI, H.; BAHRAMIFAR, N.; TAMUNAIDU, P.; KARIMI-MALEH, H. A novel route to the synthesis of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@C@SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanocomposite from the metal-organic framework as a photocatalyst for water treatment. **Chemosphere**, v. 297, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.133992.



MPELANE, A.; KATWIRE, D. M.; MUNGONDORI, H. H.; NYAMUKAMBA, P.; TAZIWA, R. T. Application of novel C-TiO<sub>2</sub>-CFA/PAN photocatalytic membranes in the removal of textile dyes in wastewater. **Catalysts**, v. 10, n. 8, p. 1–17, 2020. DOI: 10.3390/catal10080909

NIAZI, Z.; GOHARSHADI, E. K.; MASHREGHI, M.; JORABCHI, M. N. Highly efficient solar photocatalytic degradation of a textile dye by TiO<sub>2</sub>/graphene quantum dots nanocomposite. **Photochemical and Photobiological Sciences**, v. 20, n. 1, p. 87–99, 2021. DOI: 10.1007/s43630-020-00005-7

PEREIRA, L. de O.; LELO, R. V.; COELHO, G. C. M.; MAGALHÃES, F. Degradation of textile dyes from synthetic and wastewater samples using TiO<sub>2</sub>/C/Fe magnetic photocatalyst and TiO<sub>2</sub>. **Journal of the Iranian Chemical Society**, v. 16, n. 10, p. 2281–2289, 2019. DOI: 10.1007/s13738-019-01694-3

POOLWONG, J.; KIATBOONYARIT, T.; ACHIWAWANICH, S.; BUTBUREE, T.; KHEMTHONG, P.; KITYAKARN, S. Three-dimensional hierarchical porous TiO<sub>2</sub> for enhanced adsorption and photocatalytic degradation of remazol dye. **Nanomaterials**, v. 11, n. 7, 2021. DOI: 10.3390/nano11071715

RAMOS, M. D. N.; CLAUDIO, C. C.; REZENDE, P. H. V.; CABRAL, L. P.; SANTOS, L. A.; COSTA, G. G.; MESQUITA, P. L.; AGUIAR, A. (2020). Critical analysis of the characteristics of industrial effluents from the textile sector in Brazil. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 913–929, 2020. DOI: 10.21577/1984-6835.20200073

RIBEIRO, L. N.; FONSECA, A. C. S.; SILVA, E. F. M.; OLIVEIRA, E. D. C.; RIBEIRO, A. T. S.; MARANHÃO, L. C. A.; PACHECO, J. G. A.; MACHADO, G.; ALMEIDA, L. C. (2020). Residue-based TiO<sub>2</sub>/PET photocatalytic films for the degradation of textile dyes: a step in the development of green monolith reactors. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 147, 2020. DOI: 10.1016/j.cep.2019.107792

SANTANA, I. L. S.; BARBOSA, A. A.; SILVA, M. G.; AQUINO, R. V. S.; NEVES, N. S. C. S.; Silva, J. P.; FERREIRA, I. H. R.; ROCHA, O. R. S. (2019). Titanium dioxide immobilization in recycled aluminum net for degradation of textile dye by heterogeneous photocatalysis through neural networks. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 23, p. 27, 2019. DOI: 10.5902/2236117037718

SILVA, D. P.; LONGO, R. M. A sustentabilidade na indústria da moda: uma análise bibliométrica sobre o tema nos últimos 10 anos. In: SUSTENTARE, IV.; WIPIS, VII. Workshop Internacional Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos, 2022. **Anais** [...]. [S. l.], nov. 2022.

SUDHAGAR, S.; KUMAR, S. S.; PREMKUMAR, I. J. I.; VIJAYAN, V.; VENKATESH, R.; RAJKUMAR, S.; SINGH, M. UV- and visible-light-driven TiO<sub>2</sub>/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocatalysts: synthesis and enhanced photocatalytic activity. **Applied Physics A: Materials Science and Processing**, v. 128, n. 4, 2022. DOI: 10.1007/s00339-022-05293-7

SUHADOLNIK, L.; POHAR, A.; NOVAK, U.; LIKOZAR, B.; MIHELIČ, A.; ČEH, M. Continuous photocatalytic, electrocatalytic and photo-electrocatalytic degradation of a reactive textile dye for wastewater-treatment processes: batch, microreactor and scaled-up



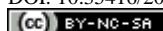
operation. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 72, p. 178–188, 2019.  
DOI: 10.1016/j.jiec.2018.12.017

SULTANA, T.; DEY, S. C.; MOLLA, M. A. I.; HOSSAIN, M. R.; RAHMAN, M. M.; QUDDUS, M. S.; MONIRUZZAMAN, M.; SHAMSUDDIN, S. M.; SARKER, M. Facile synthesis of TiO<sub>2</sub>/Chitosan nanohybrid for adsorption-assisted rapid photodegradation of an azo dye in water. **Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis**, v. 133, n. 2, p. 1121–1139, 2021. DOI: [10.1007/s11144-021-02009-5](https://doi.org/10.1007/s11144-021-02009-5)

TEIXEIRA, C. P. A. B.; JARDIM, W. F. **Processos oxidativos avançados:** conceitos teóricos. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004. (Caderno Temático, v. 3).

VIANA, M. A. **Avaliação da eficiência de estação de tratamento de efluente de lavanderia de beneficiamento de jeans no arranjo produtivo local têxtil do agreste pernambucano – um estudo de caso.** 2019. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2019.

WOLFF, G. S.; BERGER, C.; ELIAS, M. A.; KUREK, A. P.; SUAVE, J. Fotocatálise heterogênea: uma revisão sobre os métodos promissores de imobilização de dióxido de titânio. **Revista Técnico-Científica do IFSC**, v. 1, n. 12, p. 1–?, 2022.



**CRediT Author Statement**

- Reconhecimentos:** Gostaria de agradecer a Universidade Federal de Pernambuco – UFPE pelo tão grande apoio dado as pesquisas desenvolvidas.
- Financiamento:** Não houve nenhum financiamento para essa pesquisa.
- Conflitos de interesse:** Não há nenhum conflito de interesse. Esse trabalho é o resultado de uma pesquisa acadêmica.
- Aprovação ética:** Sim, o trabalho respeitou a ética científica e o trabalho não passou por nenhum comitê de ética.
- Disponibilidade de dados e material:** Todos os materiais utilizados foram encontrados em meio digital em plataformas de pesquisas reconhecidas da comunidade acadêmica e científica, e o material está disponível para acesso quando desejado.
- Contribuições dos autores:** Jefferson Lira foi o autor e pesquisador principal do artigo, Gilson Lima e Rogério Ferreira, desempenharam as funções de orientador e coorientador respectivamente do trabalho, direcionando e orientando a pesquisa e revisando a escrita do artigo.

**Processamento e editoração: Editora Ibero-Americana de Educação**  
Revisão, formatação, normalização e tradução

