

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JOÃO FELIPE RODRIGUES DE MORAES**

**INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA A DESCOLORAÇÃO DE EFLUENTES  
TÊXTEIS POR FOTOCATÁLISE: UMA ANÁLISE TEÓRICA**

**APUCARANA  
2025**

**JOÃO FELIPE RODRIGUES DE MORAES**

**INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA A DESCOLORAÇÃO DE EFLUENTES  
TÊXTEIS POR FOTOCATÁLISE: UMA ANÁLISE TEÓRICA**

**Integration of Technologies for the Decolorization of Textile Effluents by  
Photocatalysis: A Theoretical Analysis**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Têxtil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>.Dra Valquiria Aparecida Dos Santos Ribeiro.

**APUCARANA**

**2025**



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

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**JOÃO FELIPE RODRIGUES DE MORAES**

**INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA A DESCOLORAÇÃO DE EFLUENTES  
TÊXTEIS POR FOTOCATÁLISE: UMA ANÁLISE TEÓRICA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Têxtil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13 de fevereiro de 2025

---

Valquiria Aparecida Dos Santos Ribeiro  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Flavio Avanci De Souza  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Patricia Mellero Machado Cardoso  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**APUCARANA**

**2025**

Dedico este trabalho à minha família, pelos  
momentos de ausência.

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de, com grande entusiasmo, expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa. Em especial, à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Valquiria Aparecida dos Santos Ribeiro.

Não posso esquecer também da minha família, que sempre esteve ao meu lado como apoio incondicional. Em momentos críticos, foram eles que ofereceram o suporte necessário para superar as dificuldades, especialmente quando precisei de resgates emocionais. Afinal sem esse apoio, seria impossível navegar através do labirinto de informações, evitando que eu me perdesse completamente.

A todos os envolvidos, meu sincero agradecimento, se precisar de mais alguma coisa, estarei por aqui.

A competitividade de um país não começa nas indústrias ou nos laboratórios de engenharia. Ela começa na sala de aula.  
(Lee Iacocca)

## Resumo

A indústria têxtil destaca-se como uma das principais consumidoras de água e geradoras de efluentes industriais, caracterizados pela presença de corantes sintéticos, metais pesados e compostos orgânicos persistentes. O descarte inadequado desses efluentes pode resultar em significativos impactos ambientais, exigindo o desenvolvimento de tecnologias de tratamento mais eficazes e sustentáveis. Foram abordados os principais métodos de tratamento de efluentes, incluindo os processos convencionais primário, secundário, terciário e o processos oxidativos avançada (POAs), além da legislação ambiental vigente. A literatura revisada indica que a fotocatalise heterogênea apresenta elevada eficiência na degradação de poluentes orgânicos, promovendo a mineralização de compostos tóxicos em subprodutos de menor impacto ambiental. Contudo, desafios como a dependência de radiação ultravioleta, a necessidade de recuperação do catalisador e os custos energéticos ainda limitam sua implementação em larga escala. Estratégias como a dopagem do  $\text{TiO}_2$ , a integração da fotocatalise com processos biológicos e físico-químicos e a otimização dos parâmetros operacionais têm sido investigadas para aprimorar a eficiência e a viabilidade industrial da tecnologia. A fotocatalise heterogênea, quando aplicada em combinação com outras tecnologias de tratamento, representa um avanço significativo para a mitigação dos impactos ambientais

Palavras-chave: fotocatalise heterogênea; processos oxidativos avançados; dióxido de titânio.

## ABSTRACT

The textile industry stands out as one of the main consumers of water and generators of industrial effluents, characterized by the presence of synthetic dyes, heavy metals, and persistent organic compounds. The improper disposal of these effluents can result in significant environmental impacts, requiring the development of more effective and sustainable treatment technologies. The main effluent treatment methods were addressed, including conventional primary, secondary, tertiary processes and advanced oxidation processes (AOPs), as well as the current environmental legislation. The reviewed literature indicates that heterogeneous photocatalysis demonstrates high efficiency in the degradation of organic pollutants, promoting the mineralization of toxic compounds into by-products with lower environmental impact. However, challenges such as dependence on ultraviolet radiation, the need for catalyst recovery, and energy costs still limit its large-scale implementation. Strategies such as TiO<sub>2</sub> doping, the integration of photocatalysis with biological and physicochemical processes, and the optimization of operational parameters have been investigated to enhance the efficiency and industrial feasibility of this technology. Heterogeneous photocatalysis, when applied in combination with other treatment technologies, represents a significant advancement in mitigating environmental impacts.

Keywords: heterogeneous photocatalysis; advanced oxidation processes; titanium dioxide.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corpo hídrico poluído por tinturaria.....	22
Figura 2 - Vazamento de produto químico de coloração vermelha nos afluentes.....	23
Figura 3 - Representação do par elétron-buraco e algumas reações que ocorrem na superfície do semicondutor.....	29

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 - Classificação dos principais Processos Oxidativos Avançados.....</b>	<b>26</b>
<b>Tabela 2 - Valores potencial padrão de oxidação de espécies oxidantes.....</b>	<b>28</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Artigos de referências.....	33
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBEAS	Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais
P.A.	Grau de Pureza
pH	Potencial de Hidrogênio
POA	Processo de Oxidação Avançada
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultravioleta
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
SciELO	Scientific Electronic Library Online
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

## LISTA DE SÍMBOLOS

F	Flúor
-OH	Radical hidroxil
T	Temperatura
Fe	Ferro
pH	Potencial de Hidrogênio
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peroxido de hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
O <sub>3</sub>	Ozônio
FeSO <sub>4</sub>	Sulfato de ferro II
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
nM	Nanômetro
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
HgSO <sub>4</sub>	Sulfato de mercúrio
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de prata
C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> KO <sub>4</sub>	Biftalato de potássio
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Dicromato de potássio
°C	Celsius
O <sub>2</sub>	Oxigênio
ZnO	Óxido de zinco
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido férrico
WO <sub>3</sub>	Trióxido de tungstênio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
GO	Óxido de grafeno

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>17</b>
1.2.1	Objetivo específico .....	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>A indústria têxtil.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Industria têxtil e seus processos químicos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Legislação brasileira de descarte de efluente.....</b>	<b>21</b>
2.3.1	Política Nacional do Meio Ambiente.....	21
2.3.2	Resolução 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente.....	21
<b>2.4</b>	<b>Efluentes têxteis.....</b>	<b>22</b>
2.4.1	Tratamento primário.....	23
2.4.2	Tratamento secundário.....	24
2.4.3	Tratamento terciário.....	24
2.4.4	Processos oxidativos avançados.....	25
<b>2.5</b>	<b>Fotocatálise.....</b>	<b>27</b>
2.5.1	Fotocatálise homogênea.....	27
2.5.2	Fotocatálise heterogênea.....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As fibras têxteis são matérias-primas fibrosas com origem química ou natural (Hatch, 2009) e são compostas por macromoléculas lineares que constituem a base para a fabricação de tecidos. Elas passam pelo processo de fiação, o qual as transformam em fios. Vale destacar que as fibras podem ser categorizadas em dois tipos principais: curtas e longas. Além disso, as fibras naturais se dividem em: vegetais, animais e minerais, enquanto às fibras não naturais englobam as fibras artificiais e sintéticas (Romero, 1995).

Os fios produzidos se transformam em tecido plano (formado por entrelaçamento da trama e do urdume no ângulo de 90°) sendo composto por trama (fios que estão orientado na horizontal do tecido que tem título menor que o do urdume) e o urdume (fios que estão orientados na vertical do tecido que tem o título maior que o da trama), podendo ser ligados de diversas formas, gerando características diferentes para o tecido. Já a malha, que pode ser dividida em: malha de urdume e malha de trama, é formada por laçadas entre os fios, tornando-a mais maleável do que o tecido plano (SENAI-SP,2015)

Após a formação do tecido ou da malha, o tecido passa pelos processos de beneficiamentos, como: de desengomagem, purga, alvejamento, tingimento, estamparia e o acabamento, que visam agregar novas características visuais e/ou funcionais ao material. Em todo o fluxo de beneficiamento se utiliza de água, pois além da limpeza, ela é responsável por carregar as cargas de insumos químicos tais como sais, ácidos, dispersantes, álcalis, detergentes, amaciantes e vários tipos de corante (Senthil kumar e Grace Pavithra, 2019).

Devido à presença desses compostos químicos nas águas residuárias, o tratamento de efluente é crucial, pois, possibilita que a água de processos industriais, retornem ao meio ambiente com pequenas alterações como temperatura, cor e demanda química orgânica. No que se refere à sustentabilidade, um tratamento adequado impede a contaminação do corpo hídrico, dos solos e do ar, de forma a preservar os ecossistemas naturais e a saúde humana, uma vez que efluentes não tratados podem conter substâncias tóxicas e patógenos, representando sérios riscos para a saúde da população (Ingrassia *et al.*, 2024).

Há diversas regulamentações para garantir esse cuidado, tais como: A Lei nº 6.938/1981 da Política Nacional do Meio Ambiente e a resolução CONAMA 430 de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente.

### **1.1 Justificativa**

Os efluentes têxteis têm altos teores de toxicidade, e ao serem descartados sem o devido tratamento, podem causar impactos ambientais graves como poluição e contaminação de rios, lagos e oceanos afetando a vida aquática, terrestre e podendo também atingir a saúde humana, ao contaminar água potável.

Esta contaminação ocorre devido a presença de substâncias químicas nocivas, metais pesados, patógenos e nutrientes em excesso e as principais características são: sólidos suspensos, grande variação de pH, alta carga de cor, cheiro forte, temperatura elevada, turbidez e alta demanda química e biológica de oxigênio. Os efluentes têxteis não tratados, contendo substâncias químicas tóxicas e persistentes que podem causar eutrofização

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) emergem como uma solução promissora nessa busca por tecnologias limpas. Isto porque são métodos de tratamento de água que utilizam radicais livres, principalmente hidroxilas ( $\bullet\text{OH}$ ), altamente reativos e eficientes na degradação de uma ampla gama de poluentes orgânicos e inorgânicos.

As principais vantagens dos POAs é a ausência tanto de resíduos sólidos como de subprodutos agressivos ao ambiente, diferentemente de outros métodos de tratamento que podem gerar lodo ou outros materiais que necessitam de disposição final. Os POAs resultam em produtos geralmente inofensivos, como água, dióxido de carbono e sais inorgânicos, reduz significativamente o impacto ambiental do processo de tratamento e elimina a necessidade de gerenciamento adicional de resíduos.

Além disso, os POAs são versáteis e podem ser aplicados a diferentes tipos de efluentes, incluindo aqueles com cargas poluentes elevadas e compostos de difícil degradação como pesticidas e fármacos, tendo a capacidade de mineralizar completamente os poluentes e garantir a eficácia na remoção de contaminantes e a melhoria da qualidade da água tratada.

Portanto, a implementação de Processos Oxidativos Avançados (POAs) como estratégia de tratamento de efluentes representa um avanço significativo na

gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente diante dos desafios impostos pelos descartes gerados pela indústria têxtil.

O presente trabalho de revisão bibliográfica tem como objetivo destacar a eficiência dos POAs na eliminação desses poluentes, oferecendo uma solução tecnológica que alia eficácia e sustentabilidade. Além disso, busca contribuir tanto para o meio industrial, ao apresentar alternativas viáveis para o tratamento de efluentes, quanto para o meio acadêmico, ao consolidar conhecimentos e estimular pesquisas futuras nessa área.

## **1.2 Objetivo geral**

Reunir informações sobre os Processos Oxidativos Avançados - POAs para o tratamento de efluente da indústria têxtil.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Pesquisar material bibliográficos sobre os Processo Oxidativo Avançado- POAs.
- Selecionar pesquisas que abordam a fotocatalise heterogênea utilizando o catalisador dióxido de titânio no tratamento de efluentes têxteis.
- Avaliar a eficácia dos POAs no tratamento de resíduos têxteis.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesta seção, serão apresentados os conteúdos que fundamentaram a realização deste trabalho. A primeira parte aborda a história da indústria têxtil, contextualizando sua evolução e importância, na segunda parte são discutidos os processos químicos utilizados pela indústria têxtil, destacando suas características e impactos. A terceira parte traz um embasamento teórico sobre a legislação ambiental relacionada ao setor, com foco nas normas e regulamentações que orientam o tratamento de efluentes. Por fim, na última parte, explora a teoria da fotocatalise homogênea e heterogênea, fundamentando sua aplicação como uma tecnologia promissora para o tratamento de efluentes têxteis.

### **2.1 A indústria têxtil**

A fabricação têxtil tem uma longa história que remete à pré-história, que os humanos utilizavam tecidos desde a pré-história. Contém registros de 4000 a.c. que mostram o uso das fibras naturais como uma forma de se aquecer e demonstrar poder e riqueza. Com o passar do tempo, o surgimento e posterior desenvolvimento de tecnologias de fiação e tecelagem, transformou a produção têxtil em um setor vital para muitas economias, porque é responsável por fornecer empregos, influenciando a cultura e proporcionando acesso a vestuário, ao mesmo tempo em que enfrenta desafios relacionados à sustentabilidade (Fujita e Jorente, 2015).

No Brasil, a indústria têxtil tem uma história de 200 anos, que começou no período colonial com a fabricação caseira de roupas e tecidos, realizadas por mulheres que desempenhavam o papel de chefe de família que foi uma prática central em muitas sociedades pré-industriais. Essa atividade não apenas atendia às necessidades básicas do lar, mas também representava uma fonte de autonomia econômica e social para as mulheres. No entanto, esse cenário mudou radicalmente com o avanço de processos históricos e econômicos (Libby, 1997). A partir do final do século XIX e nas primeiras décadas do século XX, este ramo contribuiu para a criação de empregos, atraindo mão de obra rural para os centros urbanos e incentivou o desenvolvimento de uma cadeia produtiva associada, impulsionando setores como o algodão e a maquinaria têxtil.

A indústria têxtil desempenhou um papel central nas políticas de substituição de importações adotadas entre as décadas de 1930 e 1960. No decorrer desse período, o governo brasileiro incentivou a produção local e a proteção do mercado interno, criando um ambiente favorável para o desenvolvimento do setor têxtil no país (Deliberali Marson, 2024).

Para enfrentar os desafios ambientais, como poluições e contaminações, o setor têxtil tem se esforçado para desenvolver materiais e processos mais sustentáveis. Pesquisas recentes têm abordado a busca por alternativas inovadoras para a produção de têxteis, incluindo a utilização de biotecnologia e design (Melo *et al.*, 2007).

A indústria têxtil é diversificada, abrangendo a produção de fibras, fiação, tecelagem, malharia e confecção e sendo um dos com maior parcela em consumo recursos naturais, que entre 17% e 20% da poluição hídrica industrial global tenha origem em processos específicos da cadeia têxtil, particularmente água, um dos principais contribuintes para a economia global, especialmente em países em desenvolvimento onde a manufatura têxtil é um gerador de recursos para a economia e empregador de mão de obra (Toniollo, Zancan e Wüst, 2015).

## **2.2 Indústria têxtil e seus processos químicos**

O beneficiamento têxtil refere-se a uma série de processos que os tecidos passam após a tecelagem e a malharia, visando a sua transformação em produtos prontos para o uso, tendo a necessidade de sofrerem processos úmidos realizados, tais como: lavagem, desengomagem, alvejamento e mercerização, que são fundamentais para remover impurezas e melhorar a qualidade dos tecidos, tornando-os mais apropriados para o tingimento e outros processos subsequentes (Hosseinnezhad e Safapour, 2024).

A etapa de tingimento é a ação de colorir o artigo têxtil com corantes ou pigmentos, sendo um processo crítico no beneficiamento têxtil, pois é responsável por conferir as cores desejadas aos tecidos. O tingimento também é um dos principais geradores de efluentes têxteis, que podem causar danos ambientais se não forem tratados corretamente (Senthil Kumar e Grace Pavithra, 2019).

Segundo Gregory (2007), corantes são substâncias que conferem cor aos materiais têxteis, eles podem ser classificados em várias categorias, dependendo de suas propriedades químicas e métodos de aplicação sendo que cada classe de

corante (reativos, diretos, ácidos, dispersos, catiônicos) tem uma forma de se ligar às fibras.

Para a lã, seda e nylon, se utiliza o corante ácido, que se fixam às fibras em meio ácido, no qual a escolha do pH adequado é fundamental para a fixação (Lewis, 2011). Os corantes catiônicos têm afinidade com fibras acrílicas e poliésteres que são corantes que frequentemente utilizados em processos de tingimento de fibras sintéticas (Roy Choudhury, 2011).

Os Reativos, são os mais comuns utilizados em processos de tingimento, que se ligam quimicamente às fibras, por meio de ligações covalentes, principalmente em algodão e outras fibras celulósicas, que geram efluentes têxteis que requerem tratamento adequado (Joshi e Butola, 2013).

Para tingir poliéster e outras fibras sintéticas, utiliza-se os corantes dispersos (Gregory, 2007). Os corantes diretos são frequentemente utilizados em processos de tingimento de fibras naturais como o algodão (Sekar, 2011).

Durante o processo de tingimento uma parte da solução aquosa feita não se fixam nas fibras dos tecidos, configurando um problema de poluição e desperdício, os efluentes têxteis podem apresentar potencial tóxico e bioacumulativo. Para minimizar os impactos ambientais, é necessário um planejamento ambiental que propicie o aumento da remoção dos corantes, redução das perdas no tingimento e reuso da água, mas o reuso acaba sendo complicado de realizar, pois pode ter problemas de equalização do processo (Gregory, 2007).

O acabamento é um passo crucial no beneficiamento têxtil, pode ser definido pela ação de melhorar a aparência do tecido podendo também agregar uma nova função, textura ou propriedades funcionais, como resistência à água ou à chama. Apesar de representar uma pequena parte da indústria têxtil, é um dos setores com mais alto crescimento e valor agregado, pois permite melhoraria da qualidade e da durabilidade dos tecidos. No entanto, esses processos também são fonte de efluentes têxteis, que carregam detergentes e amaciantes graxos e siliconados, e são responsáveis pela de queima de gás natural e madeira para o aquecimento dos equipamentos e consumidores de recursos naturais (Joshi e Butola, 2013).

## **2.3 Legislação brasileira de descarte de efluente**

O Brasil, possui um conjunto de leis voltadas a preservação do ambiente e a mitigação dos impactos causados pelos setores produtivos, entre esse conjunto de leis, algumas estão relacionadas na sequência.

### **2.3.1 Política Nacional do Meio Ambiente**

A Lei nº 6.938/1981, conhecida como Política Nacional do Meio Ambiente, desempenha um papel fundamental na proteção do meio ambiente e na promoção da sustentabilidade pois, estabelece diretrizes e instrumentos para a proteção, preservação e recuperação do meio ambiente, no que diz respeito ao descarte de efluentes.

Essa normativa, define padrões e critérios para o lançamento de efluentes líquidos e resíduos sólidos, com o objetivo de proteger os recursos hídricos e prevenir a contaminação do meio ambiente. Além disso, prevê a criação de órgãos ambientais competentes para fiscalizar e monitorar o cumprimento das normas e regulamentações, garantindo que as atividades industriais e domésticas sejam realizadas de maneira sustentável.

### **2.3.2 Resolução 430/2011 do Conselho Nacional de Meio Ambiente**

A resolução CONAMA 430 de 2011 se trata da regulamentação dos descartes de efluente em corpos hídricos, estabelecendo padrões de qualidade para tal lançamento. Ela classifica as águas em categorias: classe especial, que tem o lançamento de efluente e de outras formas de poluentes vedado, e classe 1- 3 que são classificadas conforme o uso da comunidade e quais formas de tratamentos serão usados para tal.

A CONAMA 430 enfatiza a importância do monitoramento contínuo da qualidade da água, em que os efluentes estão sendo despejados, sendo, responsáveis pelas análises regulares e apresentação de relatórios detalhados aos órgãos ambientais competentes, como descrito nos artigos 25 e 28 da resolução. Tal prática permite a identificação de desvios de padrões pré-estabelecidos, tornando as implementações de medidas corretivas mais eficientes. Para tanto, são emitidos laudos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) conforme o artigo 26 da resolução.

Em caso de descumprimento das normas estabelecidas, a CONAMA 430 prevê penalidades severas, incluindo multas, suspensão de atividades e outras sanções administrativas, a fim de assegurar o cumprimento das diretrizes e a proteção dos recursos hídricos.

## 2.4 Efluentes têxteis

Os efluentes gerados durante o beneficiamento têxtil contêm uma vasta gama de poluentes, como os corantes e pigmentos, que podem ser tóxicos e carcinogênicos. Estudo como do Rosa, 2010 demonstraram que a reutilização de efluentes tratados via fotocatalise heterogênea e homogênea em novos processos de beneficiamento, pode reduzir os impactos ambientais, que são causados pelo descarte inadequado, como mostra a Figura 1.

A presença de metais pesados nos efluentes pode causar impactos não somente com a poluição da água, como também do solo. Portanto, faz-se necessário monitorar a toxicidade do lodo gerado no tratamento e estudar formas de reaproveitamento, como a incorporação em argila para fabricação de blocos cerâmicos (Gregory, 2007).

**Figura 1 - Corpo hídrico poluído por tinturaria**



**Fonte: Freitag/Portal da Cidade de Brusque/SC (2019)**

Os subprodutos do óleo, como a graxa e resíduos de fibras, também podem ser fontes de poluição e contribuir para a formação de efluentes tóxicos. Nesse sentido, a atuação das lavanderias têxteis tem contribuído para o aumento da poluição

do ar, do solo e da água, além da poluição atmosférica, pois, a poluição ambiental ao liberar efluentes contendo produtos químicos tóxicos nos corpos hídricos, emitir gases poluentes na atmosfera e descartar resíduos sólidos de forma inadequada. O uso intensivo de água, corantes e solventes pode contaminar rios e solos, enquanto a queima de combustíveis fósseis, como lenha em caldeiras, agrava o efeito estufa e compromete a qualidade do ar (Muthu, 2014).

**Figura 2 - Vazamento de produto químico de coloração vermelha nos afluentes**



Fonte: Junior/ND+ (2012)

Os tratamentos de efluentes podem ser classificados em primários, secundários, terciários ou avançados. Os primários envolvem etapas de coagulação, floculação e decantação, enquanto os secundários envolvem processos biológicos tais como os métodos (aeróbicos ou anaeróbicos). Os tratamentos terciários ou avançados contam com a adsorção, biorremediação, ultrafiltração, POAs.

#### 2.4.1 Tratamento primário

O tratamento primário de efluente refere-se ao processo de purificação de águas residuais, visando remover sólidos suspensos e matérias orgânicas do efluente antes que ele seja submetido aos outros tratamentos, nessa etapa existe 3 sub-etapas fundamentais: a coagulação, a floculação e a decantação, que em conjunto maximiza a eficiência da remoção de impurezas.

A coagulação é o primeiro passo no tratamento primário e envolve a adição de produtos químicos coagulantes no efluente, que neutralizam as cargas elétricas das partículas suspensas, promovendo a aglomeração das partículas (El Mouhri *et al.*, 2024).

Em seguida o efluente passa pelo processo de floculação, no qual recebe floculantes para que os coágulos formados no processo de coagulação, se tornem

maiores e mais pesados que a água e afundem para facilitar sua remoção (Ait-Hmane *et al.*, 2024).

A decantação é ação da gravidade sobre os flocos formado na floculação, esse processo resulta em uma camada de lodo no fundo do tanque para a sedimentação. Com o efluente clarificado e com a carga de sólidos reduzida pode-se seguir para os tratamentos subsequente (Allegre *et al.*, 2004).

#### 2.4.2 Tratamento secundário

O tratamento secundário é a etapa que tem o objetivo de remover matéria orgânicas e poluentes biodegradáveis que não foram removidos durante o tratamento primário, utilizando microrganismos aeróbico e anaeróbicos para decompor a matéria orgânica. No tratamento aeróbico se utiliza microrganismo que necessitam de oxigênio para realizar a remoção da matéria presente. Dessa forma, o efluente é alimentado com oxigênio a partir de um sistema de aeração (Rico-Martínez *et al.*, 2023).

Já no tratamento anaeróbico, utiliza microrganismos que não necessita de oxigênio para sobreviver e para decompor matéria orgânica, o que resulta em geração de biogás que pode se tornar fonte de energia, sendo eficaz para tratamento de efluente que tenha alta carga orgânica (Tonon e Rocha *et al.*, 2022).

#### 2.4.3 Tratamento terciário

O tratamento terciário é fase final do processo de purificação do efluente, destinado a remover contaminantes residuais que não foram eliminados nos processos anteriores. Nele é utilizado de substância adsorventes, para remover corantes dos efluentes, sendo um processo físico no qual os átomos, íons ou moléculas, aderem-se a superfície do substrato sólido ou líquido (Jorge, Tavares e Santos, 2015).

Outra parte do tratamento refere-se a ultrafiltração, que é associada ao tratamento convencional e pode diminuir o volume gerado e as características refratárias dos efluentes, que incluem surfactantes, amaciantes, fixadores, e agentes de acabamento. Esses produtos químicos são fontes de poluição e contribuem para a formação de efluentes tóxicos que tornam inviável a reutilização da água (Senthil Kumar e Grace Pavithra, 2019; Shukla, 2007).

A biorremediação ocorre após a ultrafiltração, a partir da utilização de microrganismos como o fungo *Aspergillus niger* que remove 95% do corante da classe azo, por meio da quebra da ligação do cromóforo, mostrando-se um método eficiente para descolorir e tratar efluentes têxteis (Kandelbauer, Cavaco-Paulo e Gübitz, 2007).

#### 2.4.4 Processos oxidativos avançados (POAs)

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) representam um conjunto de métodos inovadores para o tratamento de água, destacando-se pelo uso de radicais livres altamente reativos, com ênfase particular nos radicais hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ). Esses radicais possuem uma elevada capacidade de oxidação, permitindo a degradação e decomposição de uma ampla gama de poluentes orgânicos e inorgânicos presentes nos efluentes (Araújo *et al.*, 2016).

A principal característica que confere aos POAs sua eficácia notável é a capacidade de mineralização completa dos poluentes, isso significa que compostos complexos, muitas vezes difíceis de tratar por métodos convencionais podem ser totalmente convertidos em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e sais inorgânicos, resultando em um efluente final de menor impacto ambiental (Fioreze, Santos e Schmachtenberg, 2014).

Os radicais hidroxila são gerados através de diversas técnicas, incluindo fotocatalise, ozonização e processos eletroquímicos. A eficiência do método específico depende da natureza dos poluentes, da natureza do efluente, das condições operacionais e dos objetivos do tratamento. A eficácia dos POAs está relacionada à sua capacidade de oxidar e mineralizar totalmente os materiais indesejáveis do efluente tais como os poluentes recalcitrantes como os corantes têxteis, pesticidas, fármacos e outros compostos orgânicos persistentes e compostos inorgânico (Khader *et al.*, 2024).

Além disso, os POAs têm sido amplamente estudados e aplicados devido à sua versatilidade e ao potencial de integração com outros processos de tratamento, como sistemas biológicos e métodos de adsorção. A integração deles no tratamento de efluentes pode resultar em sistemas híbridos altamente eficientes, capazes de lidar com uma variedade de desafios ambientais (Fioreze, Santos e Schmachtenberg, 2014).

Os Processos Oxidativos Avançados representam uma abordagem promissora e efetiva para o tratamento de águas contaminadas, contribuindo

significativamente para a mitigação dos impactos ambientais causados pela descarga de efluentes industriais e urbanos. Dessa forma, eles são essenciais para aprimorar as tecnologias existentes e desenvolver novas soluções para os crescentes desafios na gestão de recursos hídricos. (Martins, 2011).

Abaixo (Tabela 1), estão listados os principais tipos de POAs, cada um com suas particularidades e mecanismos de ação

**Tabela 1 - Classificação dos principais Processos Oxidativos Avançados**

POAs sem irradiação		POAs com irradiação	
Processo	Faz uso de:	Processo	Faz uso de:
Ozonólise	O <sub>3</sub>	Fotólise	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e UV
Fenton	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e FeSO <sub>4</sub>	Fotocatálise	catalisador e hν
Eletrólise	eletrodo de corrente elétrica	Foto - Fenton	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e FeSO <sub>4</sub> e hν
Sonólise	Ultrassom		

**Fonte: IBEAS (2014)**

A ozonização é um processo que utiliza o ozônio (O<sub>3</sub>) como agente oxidante. O ozônio é um forte oxidante que pode reagir com uma ampla gama de poluentes orgânicos e inorgânicos presentes na água e nos efluentes. A reação do ozônio com a matéria orgânica pode ocorrer diretamente ou através da formação de radicais hidroxila ( $\bullet$ OH), que são altamente reativos. Este processo é eficiente para a remoção de compostos recalcitrantes, como pesticidas e corantes, e é amplamente utilizado devido à sua capacidade de desinfecção (Poznyak, Chairez Oria e Poznyak, 2019).

O método Fenton refere-se a forma de degradar a cor de uma substância aquosa utilizando de oxidação avançada, sendo que Fenton mostra que H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tem maior potencial de formar radicais livre utilizando o ferro (Fe) com catalizador em meio ácido (Ameta *et al.*, 2018).

A combinação de peróxido de hidrogênio e radiação UV com íons Fe<sup>2+</sup> ou Fe<sup>3+</sup>, respectivamente íons ferrosos e os íons férricos que resulta na produção de mais radicais hidroxila, o que aumenta a taxa de degradação de poluentes orgânicos. Este método é denominado processos Foto-Fenton. Durante a reação de Fenton, íons Fe<sup>3+</sup> se acumulam no sistema, interrompendo a reação após o consumo de todos os íons Fe<sup>2+</sup>. Na reação Foto-Fenton, ocorre a regeneração fotoquímica dos íons ferrosos por meio da foto redução de íons férricos. Os íons ferrosos recém-formados reagem novamente com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, gerando radicais hidroxila e íons férricos (Ameta *et al.*, 2018).

## 2.5 Fotocatálise

O princípio fundamental da fotocatálise, tanto heterogênea quanto homogênea, baseia-se na excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução de um material semicondutor, induzida pela absorção de energia fotônica. Esse processo gera pares elétron-lacuna ( $e^-/h^+$ ), que são responsáveis por desencadear reações redox capazes de degradar poluentes presentes no meio.

A principal distinção entre os dois tipos de fotocatálise reside na fase em que o catalisador se encontra em relação ao efluente. Na fotocatálise homogênea, o catalisador está na mesma fase que o efluente, geralmente dissolvido em solução aquosa. Já na fotocatálise heterogênea, o catalisador encontra-se em uma fase distinta do efluente, sendo comumente utilizado na forma de sólidos, como óxidos metálicos, por exemplo  $TiO_2$  e  $ZnO$  que atuam como semicondutores. Essa diferença na disposição do catalisador influencia diretamente a eficiência do processo, a facilidade de separação e a aplicabilidade em diferentes contextos de tratamento de efluentes (Pelizzetti e Serpone, 1986).

A fotocatálise cria buracos na banda de valência que podem reagir com moléculas de água adsorvidas, formando radicais hidroxila e paralelamente, os elétrons excitados podem interagir com moléculas de oxigênio adsorvidas na superfície do catalisador, gerando espécies reativas de oxigênio, como o radical superóxido. Ambos os radicais desempenham um papel crucial na oxidação e mineralização dos poluentes (Mandade, 2021).

### 2.5.1 Fotocatálise homogênea

A fotocatálise homogênea é um processo importante na química ambiental e industrial, uma vez que consegue degradar e acelerar as reações químicas através da ação de um catalisador na mesma fase que o efluente. O substrato é utilizado comumente na fase líquida, o que facilita a absorção de luz na faixa visível ou na ultravioleta. Assim, atua excitando o catalisador e o conduzindo a um estado mais ativo, capaz de oxidar os poluentes existentes no efluente (Pelizzetti e Serpone, 1986).

Após o catalisador fotossensível ser excitado para um estado mais ativo, no qual seus elétrons da camada de valência são estimulados, transferindo-os para o reagente e promovendo a formação de radicais livres altamente reativos. A cinética das formações dos radicais livres é influenciada pela frequência da onda de luz

incidente, pela concentração do catalisador, pela presença de oxigênios dissolvidos e pelo pH do meio. A escolha dos catalisadores é fundamental, pois os fotocatalisadores devem ter alta capacidade de gerar radicais livres com alta eficiência (Tabela 2) (Texeira e Jardim, 2004).

**Tabela 2 - Valores potencial padrão de oxidação de espécies oxidantes**

Oxidante	Potencial de oxidação (V)
Flúor	3,03
Radical Hidroxila (-OH)	2,80
Oxigênio (atômico)	2,42
Ozônio	2,07
Peroxido de hidrogênio	1,78
Permanganato de potássio	1,68
Hipoclorito	1,49
cloro	1,36
Dióxido de cloro	1,27
Oxigênio molecular	1,23

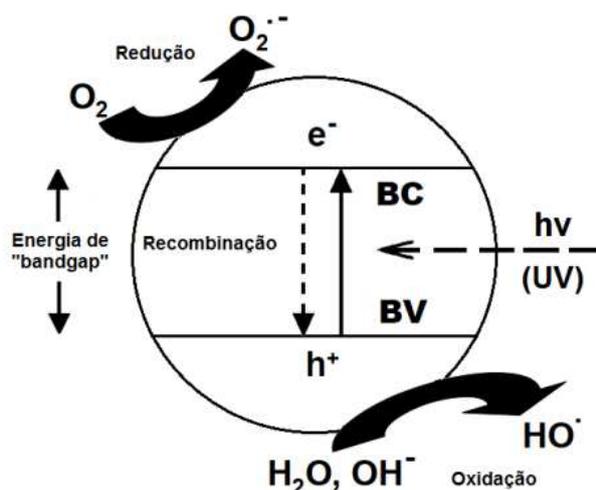
**Fonte: Adaptado de Texeira e Jardim (2004)**

### 2.5.2 Fotocatálise heterogênea

A fotocatalise heterogênea surge com uma tecnologia promissora no campo da química ambiental, particularmente na degradação de poluentes orgânicos e inorgânicos presentes em efluentes industriais e no tratamento de águas residuais que utiliza de catalisadores e semicondutores que, ao serem irradiados com luz, geralmente na faixa do ultravioleta, geram pares elétron-buraco que atuam na superfície do catalisador, promovendo reações redox que resultam na degradação de contaminantes (Nogueira e Jardim, 1998).

A fotocatalise heterogênea envolve o uso de um catalisador sólido, tipicamente dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), que é ativado por radiação ultravioleta (UV) formando pares de elétrons e lacunas que são gerados na superfície do catalisador (Nogueira e Jardim, 1998). Os pares de elétrons e lacunas podem reagir com a água e o oxigênio adsorvidos na superfície do  $\text{TiO}_2$ , conforme demonstrado na Figura 3, gerando radicais hidroxila ( $\cdot\text{OH}$ ) e superóxido ( $\text{O}_2^-$ ), que são altamente reativos e capazes de degradar poluentes orgânicos (Meera e Mahalakshmi, 2024).

**Figura 3 - Representação do par elétron-buraco e algumas reações que ocorrem na superfície do semicondutor**



Fonte: IBEAS (2014)

Um dos semicondutores mais amplamente estudados para aplicações em fotocatalise heterogênea é o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) devido à sua alta atividade fotocatalítica, estabilidade química e biocompatibilidade, no entanto, a eficiência fotocatalítica do  $\text{TiO}_2$ , que restringe sua absorção à região UV do espectro solar, representando apenas uma pequena fração da radiação solar total (Khan, 2023).

Além do  $\text{TiO}_2$ , outros materiais como  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$  e nitretos de carbono têm sido investigados como fotocatalisadores alternativos. A escolha do material adequado depende de fatores como a energia da banda proibida, a morfologia do material, a superfície específica e a capacidade de formar pares de elétron instáveis e reativos, a eficiência da fotocatalise também é influenciada por parâmetros operacionais, como a intensidade da luz incidente, o pH do meio reacional, a concentração dos poluentes e a presença de oxidantes auxiliares (Chowdhury *et al.*, 2023).

A aplicação da fotocatalise heterogênea não se limita ao tratamento de efluentes industriais que também tem sido explorado em áreas como a purificação do ar, a desinfecção de água, a síntese de compostos químicos e a produção de hidrogênio a partir da água, no entanto, para a implementação em larga escala, desafios significativos permanecem, incluindo a necessidade de desenvolvimento de fotocatalisadores mais eficientes, duráveis e econômicos, bem como a otimização dos

reatores fotocatalíticos para maximizar a exposição à luz e a interação entre os poluentes e a superfície do catalisador (Hakki *et al.*, 2018).

As lacunas positivas geradas são altamente reativas e podem interagir com moléculas de água adsorvidas na superfície do  $\text{TiO}_2$ , levando à formação de radicais hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) que são espécies reativas de oxigênio extremamente potentes, capazes de oxidar uma vasta gama de poluentes orgânicos, incluindo compostos aromáticos, pesticidas, corantes industriais e outros contaminantes recalcitrantes (Rani e Shanker, 2020).

A eficiência da fotocatalise heterogênea depende de vários fatores, incluindo a morfologia e área superficial do catalisador, a intensidade e comprimento de onda da radiação UV, a concentração de poluentes, e a presença de substâncias competidoras ou inibidoras na solução. O controle desses parâmetros é crucial para otimizar a eficácia do processo e garantir a máxima degradação dos contaminantes, a oxidação pode decompor completamente os poluentes em produtos inofensivos para a saúde da biosfera, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (Kim *et al.*, 2007).

Uma das principais vantagens da fotocatalise heterogênea é a sua capacidade de mineralizar completamente os contaminantes, transformando-os em substâncias inofensivas como água e dióxido de carbono (Ferreira e Daniel, 2004). Este aspecto de não gerar subprodutos tóxicos ou carcinogênicos é particularmente relevante no tratamento de efluentes industriais complexos, onde a remoção de compostos tóxicos e recalcitrantes é de extrema importância, a utilização de fotocatalisadores, como o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), proporciona uma reatividade elevada e uma estabilidade química notável, garantindo a longevidade do processo e a redução dos custos operacionais (Rani e Shanker, 2020).

A versatilidade da fotocatalise heterogênea, que pode ser aplicada em diferentes fases líquida, gasosa e sólida ampliando seu campo de aplicação para o contexto do tratamento de águas residuais, por exemplo, a tecnologia tem demonstrado eficiência na remoção de uma ampla gama de contaminantes, incluindo pesticidas, fármacos e corantes têxteis, destacando-se pela sua capacidade de lidar com concentrações baixas de poluentes e pela minimização da formação de subprodutos nocivos (Gaur, Patel e Shahabuddin, 2024; Zeghioud *et al.*, 2018).

A fotocatalise heterogênea alinha-se aos princípios da sustentabilidade, especialmente quando utiliza a luz solar como fonte de energia. Essa característica

não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, mas também minimiza o impacto ambiental associado ao consumo energético. No entanto, para a maioria dos efluentes industriais, o uso direto da luz solar nem sempre é viável devido às limitações de escala, localização ou condições operacionais, nesses casos é necessário recorrer a fontes artificiais de luz que embora eficazes, demandam energia elétrica, o que pode representar um desafio adicional em termos de eficiência energética e custos, mas também promove uma abordagem ecologicamente correta, a incorporação de materiais abundantes e não tóxicos como fotocatalisadores contribui ainda mais para a viabilidade ambiental do processo (Alotaibi *et al.*, 2024).

Possibilidade de reutilização dos catalisadores após um ciclo de reação, os catalisadores podem ser regenerados e reutilizados, mantendo sua eficiência ao longo de múltiplos ciclos, com isso contribui para a sustentabilidade do processo, reduzindo custos operacionais e a necessidade de reposição constante de materiais catalíticos, tornando-a uma tecnologia valiosa para o enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos (Ani *et al.*, 2024).

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho, surgiu no contexto de realizar pesquisa acadêmica sobre processo de oxidação avançada através da fotocatalise heterogêneo com o uso do  $\text{TiO}_2$  aplicados nos efluentes têxteis. Reunindo materiais publicados nas bases de conhecimentos na forma de artigos científicos e livros.

Uma revisão bibliográfica, a exemplo de outros formatos de estudo de revisão, constitui uma abordagem de pesquisa fundamentada na análise de literatura científica pertinente a um tema específico, esse método investigativo visa sintetizar as evidências disponíveis relacionadas a uma estratégia de intervenção ou área de conhecimento, utilizando procedimentos explícitos e sistemáticos para a realização da busca, avaliação crítica e integração das informações selecionadas (Linde K,2003).

A coleta de materiais para a presente revisão foi realizada entre os meses de setembro de 2023 e dezembro de 2023, as fontes de pesquisa incluíram portais renomados de produção científica, tais como a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), a SciELO (Scientific Electronic Library Online), o Google Acadêmico e o ScienceDirect, para refinar a coleta de dados foram utilizadas palavras chaves como: fotocatalise heterogênea; efluente têxtil; tingimento; descoloração.

Após a análise completa realizada por meio leitura, resumos e anotações dos materiais selecionados com base de estudo realizados para tratamento de efluentes derivados da indústria têxtil, os artigos e capítulos de livros que foram excluídos não demonstravam contribuição significativa ou não estavam alinhados com os temas e objetivos deste estudo, a revisão teve como propósito utilizar os conceitos bibliográficos disponíveis para sistematizar e apresentar informações sobre os (POAs). O objetivo principal foi fornecer dados relevantes que favoreçam uma compreensão aprofundada do método, contribuindo para ampliar o conhecimento e promover estudos aplicados à indústria têxtil, os materiais selecionados para revisão foram escolhidos de forma que completam os materiais já existente sobre o tema abordado durante o trabalho e que apoiam a execução do objetivo proposto neste trabalho.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fotocatalise heterogênea tem sido amplamente celebrada como uma solução inovadora para a degradação de poluentes têxteis, mas sua trajetória do laboratório para a indústria revela uma complexidade que vai além dos resultados promissores publicados em estudos controlados, conforme mostrado na Quadro 1, que evidência a diferença entre realizado no laboratório para escala industrial.

**Quadro 1 - Artigos de referências**

Nome do artigo	Principais resultados	Referência
Photocatalytic Treatment of Textile Effluent Using Titania–Zirconia Nano Composite Catalyst (2015)	O catalisador $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ apresentou maior eficiência na remoção de DQO e corantes em comparação ao $\text{TiO}_2$ puro. - O pH, a carga catalítica e a taxa de fluxo de ar influenciaram diretamente a eficiência do processo.	(Das e Basu, 2015)
Treatment of Textile Dyehouse Wastewater by $\text{TiO}_2$ Photocatalysis	Remoção completa da cor e redução da DQO entre 40% e 90%. - O pH ácido (3) e a adição de $\text{H}_2\text{O}_2$ aumentaram a eficiência do processo.	(Pekakis, Xekoukoulotakis e Mantzavinos, 2006)
Heterogeneous Photocatalysis Using $\text{TiO}_2$ Modified with Hydrotalcite and Iron Oxide	catalisador $\text{HT/Fe/TiO}_2$ teve melhor desempenho do que o $\text{TiO}_2$ puro na remoção de cor e toxicidade. - Bandgap reduzido para 2,34 eV, permitindo absorção de luz visível.	(Arcanjo <i>et al.</i> , 2018)
Photocatalytic activity improvement	O $\text{TiO}_2$ puro é eficiente na degradação de corantes sob	(Al-Mamun <i>et al.</i> , 2019)

<p>and application of UV-TiO<sub>2</sub> photocatalysis in textile wastewater treatment: A review</p>	<p>radiação UV, mas tem baixa ativação sob luz visível.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- A recuperação do catalisador é um desafio para aplicações industriais.</li> </ul>	
<p>Heterogeneous photocatalytic treatment of simulated dyehouse effluents using novel TiO<sub>2</sub>-photocatalysts</p>	<p>A eficiência da fotocátalise foi constante entre pH 4 e 9, mas reduziu em pH alto devido à formação de carbonatos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Efluentes mais concentrados diminuíram a eficiência do processo devido ao efeito de sombreamento e competição por sítios ativos.</li> </ul>	<p>(Arslan, 2000)</p>
<p>Combined photocatalytic and biological process for textile wastewater treatments</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A fotocátalise isolada removeu 98% da cor e até 80% do TOC no efluente sintético.</li> <li>- No efluente real, o TiO<sub>2</sub>/UV removeu 97% da cor e 63% do TOC.</li> <li>- O processo híbrido fotocátalise + biológico melhorou a eficiência e reduziu os custos operacionais.</li> </ul>	<p>(Silva, Gonçalves e Raddi, 2019)</p>
<p>Role of advance oxidation processes (AOPs) in textile wastewater treatment: A critical review</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O descarte seguro das águas residuais hospitalares e têxteis continua a ser um desafio, refletindo a necessidade de soluções mais robustas.</li> <li>- A indústria têxtil é identificada como uma das maiores fontes de poluição industrial, respondendo</li> </ul>	<p>(Jamil, 2024)</p>

	por 17-20% da poluição industrial total.	
Synthesis of hydrotalcite and titanium dioxide (HT-TiO <sub>2</sub> ) composite for application in heterogeneous photocatalytic processes	- A capacidade de adsorção de poluentes, especificamente do corante aniônico índigo carmine. - Durante os testes fotocatalíticos, as melhores condições do desenho experimental resultaram em uma remoção de até 99,96% em 2 horas.	(Denti <i>et al.</i> , 2025)

Fonte: Autoria própria (2025)

Estima-se que entre 17% e 20% da poluição hídrica industrial global tenha origem em processos específicos da cadeia têxtil, que consome volumes desproporcionais de água doce, mas também descarregam efluentes altamente tóxicos, contaminados com corantes sintéticos de alta persistência, metais pesados e compostos orgânicos voláteis, entre outros poluentes. Diante desse cenário, a inovação em tecnologias de tratamento de efluentes deixa de ser uma alternativa opcional para tornar-se uma exigência inadiável, como a fotocatalise heterogênea utilizando nanopartículas de TiO<sub>2</sub> ativadas por luz UV/visível ou sistemas híbridos de ozonização com irradiação ultravioleta, destacam-se por sua capacidade de degradar moléculas recalcitrantes, como os corantes azo e ftalatos, transformando-as em subprodutos inertes e mitigando riscos ambientais (Jamil, 2024).

Um dos paradoxos centrais reside na dependência de luz ultravioleta (UV) para ativação do TiO<sub>2</sub> como semicondutor mais utilizado. Embora estratégias como dopagem tenham reduzido seu *band gap* (é a quantidade de energia necessária para que um elétron passe da banda de valência para a banda de condução, para operar sob luz visível), a eficiência em condições reais muitas vezes não corresponde às expectativas (Arcanjo *et al.*, 2018).

A degradação de corantes sob luz solar simulada frequentemente desconsideram variáveis críticas da aplicação prática, como a variação sazonal na irradiância e a presença de partículas em suspensão em efluentes industriais, fatores

que comprometem a penetração luminosa, essa discrepância entre modelos laboratoriais, baseados em matrizes simplificadas, e a complexidade química de efluentes reais coloca em questionamento a validade de projeções otimistas, evidenciando uma lacuna entre condições controladas e cenários operacionais (Arslan, 2000).

A questão da toxicidade de subprodutos também merece destaque. Enquanto a mineralização completa é frequentemente anunciada como vantagem, a formação de intermediários halogenados (como AOX) em pH ácido, expõe um risco ambiental subestimado (Arcanjo *et al.*, 2018). Esses compostos, muitas vezes mais persistentes que os corantes originais, exigem monitoramento rigoroso, o que adiciona custos e complexidade ao processo, além disso, a liberação acidental de nanopartículas de catalisadores ( $\text{TiO}_2$  ou  $\text{ZnO}$ ) no meio ambiente, devido a falhas na etapa de separação, pode gerar impactos ecotoxicológicos de longo prazo, como a bioacumulação em organismos aquáticos.

Economicamente, a fotocatalise heterogênea enfrenta uma concorrência desigual com tecnologias consolidadas enquanto a ozonização oferece degradação rápida e a eletrocoagulação apresenta custos operacionais moderados, os gastos com energia UV, síntese de catalisadores avançados e substituição frequente de componentes elevam o custo-benefício da fotocatalise, sendo que, os sistemas fotocatalíticos demandam até 3,2 vezes mais energia que a ozonização, principalmente devido à baixa eficiência quântica dos semicondutores (Arcanjo *et al.*, 2018).

A imobilização de catalisadores em suportes, proposta como solução para facilitar sua recuperação, materiais como  $\text{TiO}_2$  ancorado em fibras de carbono ou membranas cerâmicas reduzem a perda de catalisador, mas comprometem a área superficial ativa – um trade-off que diminui a eficiência em até 40%. A deposição de subprodutos orgânicos nos poros do suporte que exige limpezas periódicas com solventes ou tratamentos térmicos, gerando novos resíduos e aumentando a pegada de carbono do processo (Pekakis, Xekoukoulotakis e Mantzavinos, 2006).

A integração com processos biológicos, por outro lado, surge como uma via promissora, mas não isenta de contradições, embora sistemas híbridos (fotocatalise + biorreatores) tenham demonstrado aumento na remoção de carbono orgânico total (TOC), a inibição de microrganismos por nanopartículas residuais expõe uma fragilidade. A toxicidade do  $\text{TiO}_2$  para bactérias nitrificantes, mesmo em

concentrações tão baixas quanto 20 mg/L, revela que a compatibilidade entre etapas químicas e biológicas não é trivial, isso demanda não apenas otimização operacional, mas também avanços em materiais biocompatíveis ou barreiras físicas eficientes para remoção total do catalisador antes do tratamento biológico (Arcanjo *et al.*, 2018).

No campo dos materiais, a dopagem dupla (metais + não metais), mas sua viabilidade industrial permanece questionável, a síntese de compósitos como HT/Fe/TiO<sub>2</sub> envolve etapas complexas como calcinação (é o tratamento térmico a que é submetido, notadamente carbonatos e hidratos, para remoção de CO<sub>2</sub>, água e outros gases “ligados fortemente, quimicamente”), funcionalização com surfactantes, purificação que elevam custos e consomem recursos (Denti *et al.*, 2025). Enquanto um artigo recente comemora a reutilização de um catalisador por 10 ciclos, raros estudos avaliam a degradação estrutural do material após exposição prolongada a radiação e meios corrosivos. A falta de padronização nos protocolos de teste, como tempo de irradiação, intensidade luminosa, dificulta a comparação direta entre estudos, fragmentando o conhecimento e retardando progressos (Al-Mamun *et al.*, 2019).

Sistemas que combinam pré-tratamento físico-químico, fotocatalise sob luz solar direta (em reatores de baixo custo com espelhos parabólicos) e biorremediação final poderiam equilibrar eficiência e custos, com o uso de inteligência artificial para otimizar parâmetros em tempo real pode reduzir o tempo de escalonamento e minimizar erros operacionais e ajudar a criar padrões de análise de indicadores a mitigar os custos associado aos erros operacionais (Silva, Gonçalves e Raddi, 2019).

A fotocatalise heterogênea não é uma solução isolada, mas parte de um ecossistema de tecnologias que devem coexistir, mas o seu valor reside na capacidade de tratar poluentes recalcitrantes que outras técnicas não conseguem degradar. Enquanto a indústria têxtil busca alternativas para reduzir seu legado poluidor, a comunidade científica deve evitar otimismo prematuras e concentrar esforços em resolver as lacunas críticas que separam a promessa laboratorial da realidade industrial.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente preocupação com a poluição hídrica da indústria têxtil impulsiona a busca por tecnologias inovadoras de tratamento de efluentes, e a fotocatalise heterogênea surge como uma alternativa promissora devido à sua capacidade de degradar poluentes persistentes. No entanto, sua implementação em escala industrial enfrenta desafios significativos, como a dependência de luz UV para ativação dos catalisadores, custos elevados de operação, eficiência reduzida em cenários reais e a possível formação de subprodutos tóxicos.

Diante desses desafios, a fotocatalise heterogênea não deve ser vista como uma solução única e isolada, mas sim como parte de um sistema integrado de tratamento, combinando-se com outros métodos para equilibrar eficiência e custos. Estratégias como a dopagem, o uso de reatores solares de baixo custo e a integração com processos biológicos têm potencial para tornar essa tecnologia mais viável.

Portanto, embora a fotocatalise ofereça uma alternativa inovadora para mitigar o impacto ambiental da indústria têxtil, sua implementação requer cautela e um planejamento estratégico que leve em consideração os desafios técnicos, econômicos e ambientais. A transição para processos menos poluentes exige não apenas inovação, mas também uma abordagem equilibrada entre eficiência, custos e sustentabilidade, garantindo que as soluções adotadas sejam efetivas e viáveis a longo prazo.

## REFERÊNCIAS

- Ait-hmane, A. *et al.* Treatment of olive mill wastewater by coagulation–flocculation with aluminum sulphate / aluminum polyhydroxichlorosulfate and effect on phytotoxicity. **Desalination and Water Treatment**, v. 318, p. 100340, 1 abr. 2024.
- Allegre, C. *et al.* Coagulation–flocculation–decantation of dye house effluents: concentrated effluents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 116, n. 1, p. 57–64, 10 dez. 2004.
- Al-mamun, M. R. *et al.* Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO<sub>2</sub> photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 5, p. 103248, out. 2019.
- Alotaibi, M. A. *et al.* Síntese verde de derivados de xanteno através de fotocatalise conduzida por luz visível usando TiO<sub>2</sub> sensibilizado com corante de amora. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 978, p. 173388, 25 mar. 2024.
- Ameta, R. *et al.* Fenton and Photo-Fenton Processes. *Em: Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 49–87.
- Ani, I. J. *et al.* Sinergia adsorção-fotocatálise de TiO<sub>2</sub>–ZnO mesoporoso reutilizável para degradação fotocatalítica do antibiótico doxiciclina. **Heliyon**, v. 10, n. 9, p. e30531, 15 maio 2024.
- Araújo, K. S. DE *et al.* Advanced oxidation processes: a review of fundamentals and applications in the treatment of urban and industrial wastewaters. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, p. 387–401, jun. 2016.
- Arcanjo, G. S. *et al.* Heterogeneous photocatalysis using TiO<sub>2</sub> modified with hydrotalcite and iron oxide under UV–visible irradiation for color and toxicity reduction in secondary textile mill effluent. **Journal of Environmental Management**, v. 211, p. 154–163, abr. 2018.
- Arslan, I. Heterogeneous photocatalytic treatment of simulated dyehouse effluents using novel TiO<sub>2</sub>-photocatalysts. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 26, n. 3, p. 193–206, 8 maio 2000.
- Chowdhury, P. R. *et al.* Fotocatálise: TiO<sub>2</sub>, ZnO e espécies de óxidos de ferro. *Em: HUSSAIN, C. M.; NASSAR, N. N. (Eds.). Nanoremediation*. [s.l.] Elsevier, 2023. p. 101–126.
- Das, L.; Basu, J. K. Photocatalytic treatment of textile effluent using titania–zirconia nano composite catalyst. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 24, p. 245–250, abr. 2015.
- Deliberali marson, M. As origens e evolução da indústria têxtil no Brasil: uma perspectiva global e de longo prazo. **Revista Paginas**, v. 16, n. 41, 23 abr. 2024.

Denti, A. F. *et al.* Synthesis of hydrotalcite and titanium dioxide (HT-TiO<sub>2</sub>) composite for application in heterogeneous photocatalytic processes. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 459, p. 116068, fev. 2025.

Mouhri, G. *et al.* Evaluating the effectiveness of coagulation–flocculation treatment on a wastewater from the Moroccan leather tanning industry : An ecological approach. **Heliyon**, v. 10, n. 5, p. e27056, 15 mar. 2024.

Ferreira, I. V. L.; DANIEL, L. A. Fotocatálise heterogênea com TiO<sub>2</sub> aplicada ao tratamento de esgoto sanitário secundário. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 335–342, dez. 2004.

Fioreze, M.; SANTOS, E. P. D.; SCHMACHTENBERG, N. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 79–91, 7 abr. 2014.

Fujita, R. M. L.; JORENTE, M. J. A indústria têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. **Modapalavra e-periódico**, v. 8, n. 15, p. 153–174, 1 jan. 2015

Gaur, R.; PATEL, J.; SHAHABUDDIN, S. Chapter 20 - Photocatalysis as an effective and sustainable approach for environmental remediation. *Em*: HADI DEHGHANI, M.; KARRI, R. R.; TYAGI, I. (Eds.). . **Sustainable Remediation Technologies for Emerging Pollutants in Aqueous Environment**. [s.l.] Elsevier, 2024. p. 411–429.

Gregory, P. Toxicology of textile dyes. *Em*: **Environmental Aspects of Textile Dyeing**. [s.l.] Elsevier, 2007. p. 44–73.

Hakki, A. *et al.* Hydrogen Production by Heterogeneous Photocatalysis. *Em*: **Encyclopedia of Interfacial Chemistry**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 413–419.

Hatch, K. L. The use of classification systems and production methods in identifying manufactured textile fibers. *Em*: **Identification of Textile Fibers**. [s.l.] Elsevier, 2009. p. 111–130.

Hosseinnezhad, M.; SAFAPOUR, S. Chapter 1 - Sources, chemistry, classification, challenges, and prospects of renewable dyes and pigments. *Em*: UL ISLAM, S. (Ed.). . **Renewable Dyes and Pigments**. [s.l.] Elsevier, 2024. p. 1–18.

Pinto, T. T.; Machado, A. M. R.; Ruotolo, L. A. M. Fotocatálise heterogênea aplicada na degradação de solução residual de formaldeído com o uso de chapa de titânio anodizada. In: **V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, 2014, Belo Horizonte. Anais.IBEAS, 2014.

Ingrassia, E. B. *et al.* When the use of derived wastes and effluents treatment is part of a responsible industrial production: A review. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 201, p. 109826, 1 jul. 2024.

Jamil, T. Role of advance oxidation processes (AOPs) in textile wastewater treatment: A critical review. **Desalination and Water Treatment**, v. 318, p. 100387, abr. 2024.

Jorge, I. R.; Tavares, F. P.; Santos, K. G. D. **Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em bagaço de cana de açúcar**. Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. **Anais... Em: XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS**. São Carlos, Brasil: Editora Edgard Blücher, out. 2015Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/20637>>. Acesso em: 12 jun. 2024

Joshi, M.; BUTOLA, B. S. Application technologies for coating, lamination and finishing of technical textiles. **Em: Advances in the Dyeing and Finishing of Technical Textiles**. [s.l.] Elsevier, 2013. p. 355–411.

Kandelbauer, A.; CAVACO-PAULO, A.; GÜBITZ, G. M. Biotechnological treatment of textile dye effluent. **Em: Environmental Aspects of Textile Dyeing**. [s.l.] Elsevier, 2007. p. 212–231.

Khader, E. H. *et al.* Recent advances in photocatalytic advanced oxidation processes for organic compound degradation: A review. **Desalination and Water Treatment**, v. 318, p. 100384, 1 abr. 2024.

Khan, M. M. Chapter 3 - Semiconductors as photocatalysts: UV light active materials. **Em: MANSOOB KHAN, M. (Ed.). . Theoretical Concepts of Photocatalysis**. [s.l.] Elsevier, 2023. p. 33–51.

Kim, J.-K. *et al.* Application of a microbial toxicity assay for monitoring treatment effectiveness of pentachlorophenol in water using UV photolysis and TiO<sub>2</sub> photocatalysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 148, n. 1–2, p. 281–286, set. 2007.

Lewis, D. M. 1 - The colouration of wool. **Em: CLARK, M. (Ed.). . Handbook of Textile and Industrial Dyeing**. Woodhead Publishing Series in Textiles. [s.l.] Woodhead Publishing, 2011. v. 2p. 3–39.

Libby, D. C. Notas sobre a Produção Têxtil Brasileira no Final do Século XVIII: Novas Evidências de Minas Gerais. **São Paulo**, 1997.

Mandade, P. Introduction, basic principles, mechanism, and challenges of photocatalysis. **Em: Handbook of Nanomaterials for Wastewater Treatment**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 137–154.

Martins, L. M. Estudo da aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes têxteis visando o seu reuso. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. 2011.

Meera, A.; MAHALAKSHMI, M. Explorando o papel dos derivados da casca da semente de tamarindo para a maior eficiência de degradação fotocatalítica do meso-TiO<sub>2</sub>: através da geração aprimorada de radicais ânions superóxido e absorção de luz visível. **Journal of Molecular Structure**, v. 1298, p. 137033, 15 fev. 2024.

Melo, M. O. B. C. *et al.* Inovações tecnológicas na cadeia produtiva têxtil: análise e estudo de caso em indústria no nordeste do Brasil. **Revista Produção Online**, v. 7, n. 2, 24 out. 2007.

Muthu, S. S. Measuring the environmental impact of textiles in practice: calculating the product carbon footprint (PCF) and life cycle assessment (LCA) of particular textile products. *Em: Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain*. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 163–179.

Nogueira, R. F. P.; JARDIM, W. F. A fotocatalise heterogênea e sua aplicação ambiental. **Química Nova**, v. 21, n. 1, p. 69–72, fev. 1998.

Pekakis, P. A.; XEKOUKOULOTAKIS, N. P.; MANTZAVINOS, D. Treatment of textile dyehouse wastewater by TiO<sub>2</sub> photocatalysis. **Water Research**, v. 40, n. 6, p. 1276–1286, mar. 2006.

Pelizzetti, E.; SERPONE, N. (EDS.). **Homogeneous and Heterogeneous Photocatalysis**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1986.

Poznyak, T. I.; CHAIREZ ORIA, I.; POZNYAK, A. S. Ozonation as main method for organic contaminants degradation in three different phases: liquid, solid, and gaseous. *Em: Ozonation and Biodegradation in Environmental Engineering*. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 3–23.

RANI, M.; SHANKER, U. Green synthesis of TiO<sub>2</sub> and its photocatalytic activity. *Em: Handbook of Smart Photocatalytic Materials*. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 11–61.

Rico-martínez, R. *et al.* Chapter 13 - Aerobic and anaerobic methods for the degradations of antibiotic-resistant genes and antibiotic-resistant bacteria from waste streams. *Em: SINGH, P.; SILLANPÄÄ, M. (Eds.). Degradation of Antibiotics and Antibiotic-Resistant Bacteria from Various Sources*. Developments in Microbiology. [s.l.] Academic Press, 2023. p. 297–315.

Romero, L. L. **Fibras artificiais e sintéticas**. 1995.

Rosa, J. M. **Sustentabilidade no beneficiamento têxtil: produção de tingimentos com reuso de efluente tratado por fotocatalise via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**. 2010.

Roy choudhury, A. K. 2 - Dyeing of synthetic fibres. *Em: CLARK, M. (Ed.). Handbook of Textile and Industrial Dyeing*. Woodhead Publishing Series in Textiles. [s.l.] Woodhead Publishing, 2011. v. 2p. 40–128.

Sekar, N. 12 - Direct dyes. *Em: CLARK, M. (Ed.). Handbook of Textile and Industrial Dyeing*. Woodhead Publishing Series in Textiles. [s.l.] Woodhead Publishing, 2011. v. 1p. 425–445.

Senthil Kumar, P.; GRACE PAVITHRA, K. Water and Textiles. *Em: Water in Textiles and Fashion*. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 21–40.

Shukla, S. R. Pollution abatement and waste minimisation in textile dyeing. *Em: Environmental Aspects of Textile Dyeing*. [s.l.] Elsevier, 2007. p. 116–148.

Silva, L. S.; GONÇALVES, M. M. M.; RADDI, L. R. Combined photocatalytic and biological process for textile wastewater treatments. *Water Environment Research*, v. 91, n. 11, p. 1490–1497, nov. 2019.

Teixeira, C.P.A.B.; Jardim, W.F. **Processos Oxidativos Avançados. Conceitos Teóricos. Caderno Temático**, v.3, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química-IQ. Laboratório de Química Ambiental-LQA. Agosto de 2004

Toniollo, M.; Zancan, N. P.; Wüst, C. **Indústria têxtil: sustentabilidade, impactos e minimização**. 2015.

Tonon e Rocha, N. L. *et al.* Chapter 16 - Pesticides removal from aqueous streams through anaerobic and aerobic biological treatment processes. *Em: SINGH, P.; SINGH, S.; SILLANPÄÄ, M. (Eds.). . Pesticides in the Natural Environment*. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 383–418.

Zeghioud, H. *et al.* Reactive species monitoring and their contribution for removal of textile effluent with photocatalysis under UV and visible lights: Dynamics and mechanism. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, v. 365, p. 94–102, out. 2018.

Junior, C. ND MAIS. **Empresa Dohler multada em mais de R\$350 mil por infração Ambiental**. Disponível em: [HTTPS://NDMAIS.COM.BR/NOTICIAS/EMPRESA-DOHLER-MULTADA-EM-MAIS-DE-R-350-MIL-POR-INFRACAO-AMBIENTAL/](https://ndmais.com.br/noticias/empresa-dohler-multada-em-mais-de-r-350-mil-por-infracao-ambiental/). ACESSO EM: 3 FEV. 2025

Freitag, C. PORTAL DA CIDADE BRUSQUE. **Moradores denunciam tinturaria do Rio Branco por descarte de efluentes em rio**. Disponível em: <https://brusque.portaldacidade.com/noticias/cidade/moradores-denunciam-tinturaria-do-rio-branco-por-descarte-de-efluentes-em-rio-4454>. Acesso em: 3 fev. 2025.

SENAI-SP. **Tecnologia dos Processos Têxteis**. São Paulo: Editora Senai-SP, p. 56-59, 2015